مجله

جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریهٔ علمی)

سال سیزدهم، شماره ۵۲، زمستان ۱۴۰۳، شاپا: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

- پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه
  فریبا اسفندیاری درآباد، مسعود رحیمی، مهرداد وهاب‌زاده
- ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان
  محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌الهی پیر، فاطمه رحالی
- مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت سلماس (آذربایجان‌غربی) با استفاده از ANFIS
  مریم بیاتی خطیبی، روح‌الله محمد زاده، صدرا کریم زاده
- ارزیابی آسیب‌پذیری طبیعی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری به مخاطرات محیطی چندگانه
  فریده سعیدیان پور، علی جعفری، داوود مافی غلامی
- مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی رفتار آتش در استان گیلان
  رقیه جهدی، محمد واثق الحاجی خلف
- ارتباط پارامترهای کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی البرز مرکزی
  علی رجبی اسلامی، منیژه قهرودی تالی، علیرضا صالحی پور میلانی
- مقایسه روش های مختلف تصمیم گیری چند معیاره در اولویت بندی سیل خیزی زیرحوضه های آبخیز کشف رود
  مریم زارع، محمود آذری، محسن رضائی عارفی
- بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه
  پویا اللهوردی پور، محمدتقی ستاری
- تحلیل مکانی و زمانی زمین لرزه های ایران در طی سال های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳
  حمید گنجائیان
- شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و سناریوهای RCP در حوضه آبخیز حاجیار
  سیداسدالله حجازی، محمدحسین رضائی مقدم، جمشید پاراحمدی، فریبا گرمی، علی بی‌غم
- ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص های کیفی اکولوژیکی
  مهین ساعد پناه، جمیل امان‌اللهی
- ارزیابی داده های هواشناسی و تصاویر ماهواره ای در شناسایی پدیده گردوغبار مناطق بیابانی
  پیمان معدنچی، حمزه سعیدیان، محمود دمی زاده
- رفتارشناسی فضایی - زمانی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی روستای حسین آباد کالپوش
  مهدیه غیور بلورفروشان، سیدرضا حسین زاده، غلامرضا لشکری پور، مسعود میثالی، حکیمه مریی هروی
- نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی
  مهری جهانسوزی، حسین فراهانی، جمشید عیثالی، بهروز محمدی یگانه
- شناسایی کانون-های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده های سنجش‌ازدوری
  سعید نگهبان، حمید گنجائیان، سیدسعدی قیصریان، عطرین ابراهیمی









فصلنامه

جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال سیزدهم، شمارهٔ پنجاه و دوم، زمستان ۱۴۰۳

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

- **پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه**
  فریبا اسفندیاری درآباد، مسعود رحیمی، مهرداد وهاب‌زاده
- **ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان**
  محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌اللهی پیر، فاطمه رجائی
- **مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت سلماس (آذربایجان‌غربی) با استفاده از ANFIS**
  مریم بیاتی خطیبی، روح‌الله محمد زاده، صدرا کریم زاده
- **ارزیابی آسیب‌پذیری طبیعی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری به...**
  فریده سعیدیان پور، علی جعفری، داوود مافی غلامی
- **مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی رفتار آتش در استان گیلان**
  رقیه جهدی، محمد واثق الحاجی خلف
- **ارتباط پارامترهای کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی...**
  علی رجبی اسلامی، منیژه قهرودی تالی، علیرضا صالحی پور میلانی
- **مقایسه روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره در اولویت بندی سیل خیزی زیرحوضه‌های آبخیز کشف رود**
  مریم زارع، محمود آذری، محسن رضائی عارفی
- **بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه**
  پویا اللهویردی پور، محمدتقی ستاری
- **تحلیل مکانی و زمانی زمین لرزه های ایران در طی سال های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳**
  حمید گنجائیان
- **شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و سناریوهای RCP در...**
  سیداسدالله، حجازی، محمدحسین رضائی مقدم ، جمشید یاراحمدی، فریبا کرمی، علی بی‌غم
- **ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص های کیفی اکولوژیکی**
  مهین ساعد پناه، جمیل امان‌اللهی
- **ارزیابی داده های هواشناسی و تصاویر ماهواره ای در شناسایی پدیده گردوغبار مناطق بیابانی**
  پیمان معدنچی، حمزه سعیدیان، محمود دمی زاده
- **رفتارشناسی فضایی – زمانی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد کالپوش**
  مهدیه غیور بلورفروشان، سیدرضا حسین زاده، غلامرضا لشکری پور، مسعود مینائی، حکیمه مربی هروی
- **نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی**
  مهری جهانسوزی، حسین فراهانی، جمشید عینالی، بهروز محمدی یگانه
- **شناسایی کانون¬های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده های سنجش‌ازدوری**
  سعید نگهبان، حمید گنجائیان، سیدسعدی قیصریان، عطرین ابراهیمی

دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامهٔ جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد
مدیر مسؤل: دکتر سیدرضا حسین‌زاده
سردبیر: دکتر سیدرضا حسین‌زاده
هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

Prof. Victor R. Baker (Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona)
Prof. Ziyadin Çakir (Department of Geology, Istanbul Technical University)
Prof. Gao-Lin Wu (Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences)
Assistant Prof. Masoud Irannezhad (Civil Engineering University of Oulu, Finland)

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

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

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

بر اساس آئین‌نامه کمسیون نشریات وزارت علوم تحقیقات و فنآوری 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 شاندیز
ویراستاری ادبی : دکتر جواد میزبان **حروف نگاری و صفحه آرایی:** نفیسه اسماعیلی **طراحی جلد :** امیراسفندیار عامل‌محرابی

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 ادبیّات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، کد پستی ۹۱۷۷۹۴۸۸۸۳

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

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

این مجلّه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام(ISC)
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)
- پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)
- DOAJ (Directory of Open Access Journals)
- EBSCO Information Services

بسم الله الرحمن الرحیم

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال سیزدهم، شمارهٔ پنجاه و دوم، زمستان ۱۴۰۳

شاپا چاپی : ۲۳۲۲-۱۶۸۲

شاپا الکترونیکی : ۳۰۷۶-۲۳۸۳

راهنمای تدوین و نحوه ارسال مقاله برای چاپ در فصلنامه علمی ـ 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 همایش‌ها 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 نشانیhttps://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.
- یادداشت‌های فنی یا مقالات روش‌شناسی.
- مطالعات موردی.

تبصره:

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

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

آماده‌سازی مقاله

برای دریافت اطلاعات تکمیلی در خصوص نحوه نگارش 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 قالب‌بندی:

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 روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، منابع

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

محدودیت‌های تعداد کلمات :

متن اصل مقاله :۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ کلمه

چکیده مبسوط انگلیسی : ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه

کلمات کلیدی: حداقل ۳ و حداکثر 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 به‌صورت تک‌ستونه ارسال شود.

کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله پس از حذف جداول و شکل ها از ۱۵صفحه تجاوز نکند.

حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۳/۵، از راست و چپ ۳ سانتی‌متر باشد و فاصله سطرها ۱/۵ (۵ lines) تنظیم شود.

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

تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.

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

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

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

در کل متن، نیم‌فاصله‌ها رعایت شود.

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

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

فونت:

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

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

عنوان فارسی 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 به‌صورت ایتالیک درج شوند.

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

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

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

پاورقی در هر صفحه به‌صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود و فونت آن برای زبان فارسی B Nazanin, 10 و زبان انگلیسی Times New Roman, 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 می روند، 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 آن ها در متن به صورت متوالی شماره گذاری کنید.

زیرنویس را به همراه جداول ارائه دهید.

هر یادداشت در خصوص جدول را در زیر بدنه جدول قرار دهید.

از قوانین عمودی و سایه زدن در 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 جدول‌های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می‌باشد.

عنوان جدول‌ها 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 هاو 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 ۱، 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.

فرمول‌ها و روابط ریاضی

برای نمایش روابط و فرمول‌های ریاضی از جدول دو ستونی با خطوط نامرئی استفاده شود.

تمام روابط ریاضی به‌ترتیب از ۱ شماره‌گذاری شوند و شمارهٔ هر رابطه با پرانتز جدا می‌شود.

روابط باید با اندازه فونت ۱۱ و قلم Times New Roman باشد.

واحدهای اندازه‌گیری

کلیه واحدهای اندازه‌گیری بر اساس سیستم متریک (SI) باشند.

برای نوشتن واحدها از حالت نمایی استفاده شود (مثلاً به‌جای m/s از m s-1 استفاده شود).

منابع

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

استناد به منبع در متن مقاله (استنادهای درون‌متنی) و همچنین منابع انتهای مقاله (برون‌متنی) باید به انگلیسی نوشته شود و سال نشر نیز سال میلادی باشد.

اگر در مقاله از منبع فارسی استفاده شده باشد، باید اطلاعات منبع به زبان انگلیسی برگردانده شود.

اگر منبع مورداستفاده در مقاله، فارسی باشد؛ برای تبدیل اطلاعات کتابشناختی آن به انگلیسی، باید تمام اطلاعات آن (مانند نام نویسنده (نویسندگان)، عنوان منبع (نام نشریه، کتاب، گزارش، پایان‌نامه) و سایر اطلاعات موردنیاز) از صفحه عنوان انگلیسی یا سایت اینترنتی منبع گرفته شود. از ترجمه شخصی اطلاعات منابع فارسی خودداری نمایید.

برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین دارند، به صفحه انگلیسی سایت منبع مراجعه کنید.

تمامی ارجاعات داخل متن باید به منبع مربوطه لینک شوند.

از ذکر منابع بی‌نام و غیرقابل‌دسترس خودداری شود.

منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می‌شود.

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

نام منبع (نشریه، کتاب و غیره) و ناشر مخفف نباشد و به‌طور کامل آورده شود.

برای استناد به مقاله‌هایی که هنوز منتشر نشده‌اند، به‌جای سال نشر از (In press) استفاده شود.

برای مقاله منتشرشده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، درصورتی‌که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.

منابعی که در اصل به زبان فارسی هستند بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت [In Persian] در انتها مشخص شوند.

برای مقاله‌های منتشرشده که DOI دارند، آوردن DOI در پایان هر منبع الزامی است DOI با آدرس دقیق ذکر شود.

برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه رفرنس دهی در بخش منابع(انتهای مقالات) اینجا کلیک کنید.

هزینه‌های مرتبط با انتشار

هزینه پردازش مقاله: نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی برای بررسی اولیه مقالات هیچ وجهی از نویسندگان دریافت نمی‌کند. اما مقالاتی که پس از طی کردن فرآیند داوری مورد پذیرش قرار بگیرند باید مبلغ 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. مرتضی اکبری، (دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، دانشگاه فردوسی مشهد)

۲. جمیل امان اللهی، (دانشیار حفاظت و کیفیت محیط زیست،گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی،دانشگاه کردستان)

۳. ابوالقاسم امیراحمدی(استاد ژئومورفولوژی ،دانشکده جغرافیا و علوم محیطی ، دانشگاه حکیم سبزواری)

۴. شهرام بهرامی (دانشیار جغرافیای طبیعی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی)

۵. خدیجه بوزرجمهری(دانشیار جغرافیاوبرنامه ریزی روستایی،گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی،دانشگاه فردوسی مشهد)

۶. مهرداد چراغی (استاد محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان)

۷. مجید حبیبی نوخندان(دانشیار اقلیم شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو)

۸. ساره حسینی (استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان)

۹. شهریار خالدی (استاد جغرافیای طبیعی ، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی)

۱۰. منصور خیری زاده، (دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه تبریز)

۱۱. محمد دارند ، (استاد آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان)

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. ایمان روستا (دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد،)

۱۵. طاهره صادقلو (دانشیار جغرافیاوبرنامه ریزی روستایی،گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی،دانشگاه فردوسی مشهد)

۱۶. منیژه قهرودی تالی (استاد جغرافیای طبیعی ،گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین ، دانشگاه شهید بهشتی)

۱۷. وحید محمدنژاد(دانشیار ژئومورفولوژی ، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه ارومیه)

۱۸. زهره مریانجی (دانشیار اقلیم شناسی، دانشگاه سیدجمال الدین اسدآبادی)

۱۹. رئوف مصطفی زاده (دانشیار علوم و مهندسی آبخیز ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی)

۲۰. غلامرضا مقامی مقیم (دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان)

۲۱. مهران مقصودی (دانشیار جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران)

۲۲. رضا منصوری (استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان)

۲۳. مینائی، مسعود (دانشیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد)

۲۴. اسماعیل نجفی (استادیار گروه جغرافیای (ژئومورفولوژی) دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان)

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
• **پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه** فریبا اسفندیاری درآباد، مسعود رحیمی، مهرداد وهاب‌زاده	۱
• **ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان** محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌اللهی پیر، فاطمه رجائی	۲۷
• **مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت سلماس (آذربایجان‌غربی) با استفاده از ANFIS** مریم بیاتی خطیبی، روح‌الله محمد زاده، صدرا کریم زاده	۴۸
• **ارزیابی آسیب‌پذیری طبیعی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری به...** فریده سعیدیان پور، علی جعفری، داوود مافی غلامی	۷۴
• **مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی رفتار آتش در استان گیلان** رقیه جهدی، محمد واثق الحاجی خلف	۱۰۲
• **ارتباط پارامترهای کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی...** علی رجبی اسلامی، منیژه قهرودی تالی، علیرضا صالحی پور میلانی	۱۳۰
• **مقایسه روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره در اولویت بندی سیل خیزی زیرحوضه‌های آبخیز کشف رود** مریم زارع، محمود آذری، محسن رضائی عارفی	۱۵۹
• **بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه** پویا اللهویردی پور، محمدتقی ستاری	۱۹۷
• **تحلیل مکانی و زمانی زمین لرزه های ایران در طی سال های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳** حمید گنجائیان	۲۲۲
• **شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و سناریوهای RCP در...** سیداسدالله، حجازی، محمدحسین رضائی مقدم ، جمشید یاراحمدی، فریبا کرمی، علی بی‌غم	۲۴۴
• **ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص های کیفی اکولوژیکی** مهین ساعد پناه، جمیل امان‌اللهی	۲۶۹
• **ارزیابی داده های هواشناسی و تصاویر ماهواره ای در شناسایی پدیده گردوغبار مناطق بیابانی** پیمان معدنچی، حمزه سعیدیان، محمود دمی زاده	۲۹۱
• **رفتارشناسی فضایی – زمانی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد کالپوش** مهدیه غیور بلورفروشان، سیدرضا حسین زاده، غلامرضا لشکری پور، مسعود مینائی، حکیمه مربی هروی	۳۱۴
• **نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی** مهری جهانسوزی، حسین فراهانی، جمشید عینالی، بهروز محمدی یگانه	۳۴۴
• **شناسایی کانون¬های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدوری** سعید نگهبان، حمید گنجائیان، سیدسعدی قیصریان، عطرین ابراهیمی	۳۸۶

بسمه‌تعالی

توافقنامه همکاری علمی

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

دکتر فریبرز قریب
رییس هیات مدیره انجمن کواترنری ایران

بسمه تعالی

توافقنامه همکاری علمی

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

دکتر مجتبی یمانی
رییس هیات مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.1-26 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.87847.1482 Open access

Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm

Fariba Esfandyari Darabad[a*], Masoud Rahimi[b] ,Mehrdad Vahabzadeh[c]

[a] *Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*
[b] *Assistant professor in Geomorphology, Faculty of Literature and Human sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
[c] *Masters graduat in, Geomorphology and Environmental Management, Faculty of Social Sciences University of Mohaghegh Ardabili Ardabil, Iran.*

Received: 30 April 2024 ***Revised: 29 May 2024*** ***Accepted: 20 August 2024***

Extended Abstract

Introduction

Rockfalls are a type of slope movement process that does not require a transporting medium (e.g., water) and predominantly occur under the influence of gravity (Dikau, 2006). The detachment of a single rock block or a volume of blocks from steep slopes is followed by motions mainly through the air. The fall trajectory is strongly controlled by the mean slope gradient, enabling different motion modes such as free-falling, bouncing, and rolling. Consequently, rockfalls present an unpredictable threat, especially along highways and railways, where they can cause damage to infrastructure or endanger human lives (Bostjančić et al., 2020). In high mountain regions, rockfall activity is thought to be changing due to accelerated climate warming and permafrost degradation, potentially resulting in increased activity and larger volumes involved in individual falls (Stoffel et al., 2024). Therefore, it is crucial to assess areas prone to rockfalls in mountainous regions. The aim of this research is to zone the risk of rockfalls long the Khalkhal–Shahroud road using a multi-layer perceptron algorithm.

[*] . Corresponding author: Fariba Esfandyari Darabada Email: esfandyari@uma.ac.ir Tel:+989120503281
How to cite this Article: Esfandyari Darabad, F. , Rahimi, M. , & vahabzadeh, M. (2024). Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),1-26.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Material and Methods

The multi-layer perceptron algorithm is a modern machine learning model capable of solving complex problems. In this study, the necessary data were obtained from topographic maps at a scale of 1:25,000, geological maps at a scale of 1:100,000, a digital elevation model (DEM) with 12.5-meter resolution from the ALOS-PALSAR satellite, Sentinel data (spatial resolution of 10 meters), Google Earth satellite images, and field studies. In rockfall hazard zoning using GIS, the most critical component is the preparation of a rockfall distribution map or rockfall inventory. Fieldwork was conducted to identify rockfalls and prepare the inventory.

Results and Discussion

To identify the factors contributing to rockfall occurrence, field studies identified eight key factors: elevation, vegetation, slope aspect, distance from faults, distance from roads, geology, land use, and slope gradient. After pre-processing, all layers were entered into SPSS Modeler software, and the model was designed with 8 input neurons, 8 intermediate neurons, and 1 output neuron. The results revealed that, in the multi-layer perceptron algorithm, the geological layer had the highest weight value (0.20), followed by the land use layer (0.14) and distance from roads (0.12). In the model validation phase, the results demonstrated an AUC value of 0.9810 in the training phase and 0.9876 in the testing phase, indicating high model validity in both phases.

Conclusion

This research aimed to identify areas at risk of rockfall along the Khalkhal–Shahroud road using a multi-layer perceptron algorithm. The results highlight the significant influence of geological conditions on rockfall occurrences, emphasizing the need to consider slope instability in all spatial planning efforts in this region. It is recommended that future studies explore other machine learning models, such as support vector machines, to further evaluate rockfalls and related slope movements.

Key Words: Rockfall Hazard Zonation, Multilayer Perceptron Algorithm, Road Hazards, Khalkhal Road, Slope Stability Analysis.

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۲۶-۱

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.87847.1482 دسترسی آزاد

پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

فریبا اسفندیاری درآباد[۱]- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

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

مهرداد وهاب‌زاده- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۲/۱۱ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۵/۳۰

چکیده

ریزش سنگ یکی از پدیده‌هایی است که رخداد آن سبب ایجاد خسارات زیادی به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌شود؛ بنابراین ارزیابی نواحی مستعد رخداد ریزش سنگ در مناطق کوهستانی، امری ضروری است. هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه است. برای شناسایی عوامل مهم در رخداد ریزش سنگ با توجه به مطالعات میدانی ۸ عامل شناسایی‌شده که شامل ارتفاع، پوشش گیاهی، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شیب است. تمامی لایه‌ها بعد از فرایند پیش‌پردازش، وارد نرم‌افزار SPSS Modeler شده و مدل‌سازی با ۹ نورون ورودی، ۸ نورون میانه و ۱ خروجی طراحی‌شده است. نتایج این پژوهش نشان داد در الگوریتم پرسپترون چندلایه، بیشترین ارزش وزنی را برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ اختصاص داده است. به لحاظ پراکنش طبقات خطرپذیری، ۹۸ درصد از طبقات خطرپذیری زیاد تا خیلی زیاد در بخش جنوبی منطقه گسترش دارد و بخش شمالی منطقه به لحاظ داشتن خطرپذیری در طبقه کم تا متوسط قرار گرفته است. همچنین در بخش اعتبار سنجی مدل، نتایج نشان داد که مقدار AUC در بخش آموزش عدد ۰/۹۸۱۰ و در بخش تست شبکه عدد ۰/۹۸۷۶ بوده است که این نیز نشان می‌دهد مدل در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار

[۱] .نویسنده مسئول : ۰۹۱۲۰۵۰۳۲۸۱

Email: esfandyari@uma.ac.ir

بالایی بوده و در رتبه عالی قرارگرفته است. درنهایت پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای بررسی و ارزیابی ریزش سنگ و حرکات دامنه‌ای در این منطقه، از مدل‌های دیگر یادگیری ماشین استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: پهنه بندی خطر ریزش، الگوریتم پرسپرون چند لایه، مخاطرات جاده ایی، تجزیه و تحلیل پایداری دامنه، جاده خلخال.

۱- مقدمه

توسعه نظام شهری و روند افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر سبب توسعه سیستم حمل‌ونقل و شبکه ارتباطی در سرتاسر جهان شده است. ایجاد و توسعه شبکه ارتباطی یکی از عوامل مؤثر در آسیب و تغییر سیستم‌های مورفودینامیک در محیط طبیعی به‌ویژه مناطق کوهستانی محسوب می‌شود (Jaccard, Abbruzzese & Howald, 2020). ریزش سنگ به‌عنوان نوعی از حرکت دامنه‌ای طبقه‌بندی می‌شود که شامل جدا شدن یک یا چندین بلوک سنگ از یک صخره عمودی یا نزدیک به عمود بوده و با سقوط آزاد، جهش، غلتیدن مشخص می‌شود (Jiang, Li & Zhou, 2021). رخداد ناگهانی و سریع همراه با حجم مواد ریزش شده باعث شده است که مخاطره ریزش سنگ به‌عنوان یکی از ویرانگرترین و خطرناک‌ترین پدیده‌های ژئومورفیک شناخته شود (Guzzetti, Reichenbach & Ghigi, 2004). مکانیسم‌های ریزش سنگ به‌واسطه تأثیرات متعددی ایجاد می‌شود که به عوامل مختلفی اشاره دارد. این عوامل شامل تنش‌های کششی، تغییر شکل حرارتی، ساختارهای اتصال، افزایش فشار آب در حفره‌های موجود در توده‌های سنگ، فرسایش سطوح به دلیل باران شدید، فرآیندهای یخزدن و آب‌شدن در مناطق سرد، تجزیه شیمیایی و هوازدگی سنگ و زلزله می‌باشد (Nakajima, Abe, Shinoda, Nakamura & Nakamura, 2021). همچنین از فعالیت‌های مهم انسانی در ریزش سنگ، عواملی از قبیل بارگذاری مواد بر روی دامنه، معدن‌کاوی، احداث سد، مخازن آب و عوارض خطی از قبیل جاده‌ها، راه‌آهن، خطوط لوله نفت و گاز، بسیار تأثیرگذارند (Abedini & Piroozi, 2020). شناخت عوامل مؤثر بر رخداد ریزش سنگ و تحلیل خطرات ناشی از این پدیده در مناطق مختلف از نیازهای اساسی و بسیار حیاتی برنامه‌ریزان است. بنابراین ایجاد یک استراتژی ایمن برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی و کاهش خسارات ناشی از وقوع آن جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار بسیار مهم و

ضروری بوده و ارائه یک مدل مناسب و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت محیط منطقه مطالعاتی، کمک شایانی به مراکز ذیصلاح نماید (Hatamifar, Mousavi & Alimoradi, 2012).

محور ارتباطی خلخال به بخش شاهرود به‌عنوان یک جاده درجه ۲ شناخته می‌شود که بخش شاهرود را به شهرستان خلخال وصل می‌کند که در یک دهه اخیر با توسعه شبکه ارتباطی در منطقه و عبور شبکه راه‌ها و نیز اهمیت اقتصادی، گردشگری و ترانزیتی، این محور مواصلاتی موردتوجه قرار گرفته است. محور ارتباطی خلخال به بخش شاهرود به خاطر قرارگیری در منطقه‌ی کوهستانی و شرایط ژئومورفیک و زمین‌شناسی خاص، مستعد وقوع حرکات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش سنگ است که در چند دهه‌ی اخیر با وقوع این نوع مخاطره، سبب ایجاد آسیب به تأسیسات انسانی و خسارات جانی و مالی فراوانی شده است؛ بنابراین شناخت نواحی مستعد حرکات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش سنگ برای کاهش خسارات به وجود آمده امری ضروری است. هدف این پژوهش پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه می‌باشد. نگهبان و همکاران (Negahban, Jahan Tighmand & Rahimi Herabadi, 2020) به جایگاه روش‌شناسی اثباتی و فرا اثباتی در مخاطرات ژئومورفولوژیک در آزادراه رودبار- رستم‌آباد پرداختند. این محققین به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین مناطق خطرناک به‌لحاظ ریزش سنگ در شیب بالا، فاصله کم از آبراهه، حساسیت بالای سنگ‌های آتش‌فشانی و کاربری اراضی بایر است. عابدینی و همکاران (Abedini, Mozafari & Faal Naziri, 2019) به بررسی و مقایسه کارآیی مدل‌های ارزش اطلاعات و ضریب نسبت فراوانی و آنتروپی شانون در پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ جاده زنجان ـ تهم ـ طارم پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که در روش ارزش اطلاعات ۰/۲۳ درصد خطر خیلی‌زیاد تا زیاد تعلق گرفت. اصغری سراسکانرود و مظفری (Asghari Saraskanrod & Mozafari, 2020) به ارزیابی و مقایسه مدل‌های ضریب نسبت فراوانی و تحلیل شبکه در پهنه‌بندی ریزش سنگ پرداختند. ارزیابی مدل‌ها نشان داد، در مدل تحلیل شبکه شاخص‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۸۸ به‌دست آمده که نسبت مدل ضریب نسبت فراوانی از کیفیت و دقت بالاتری برخوردار است. اسکندری و همکاران (Eskandari, Nazarpour & Khayat, 2023) به

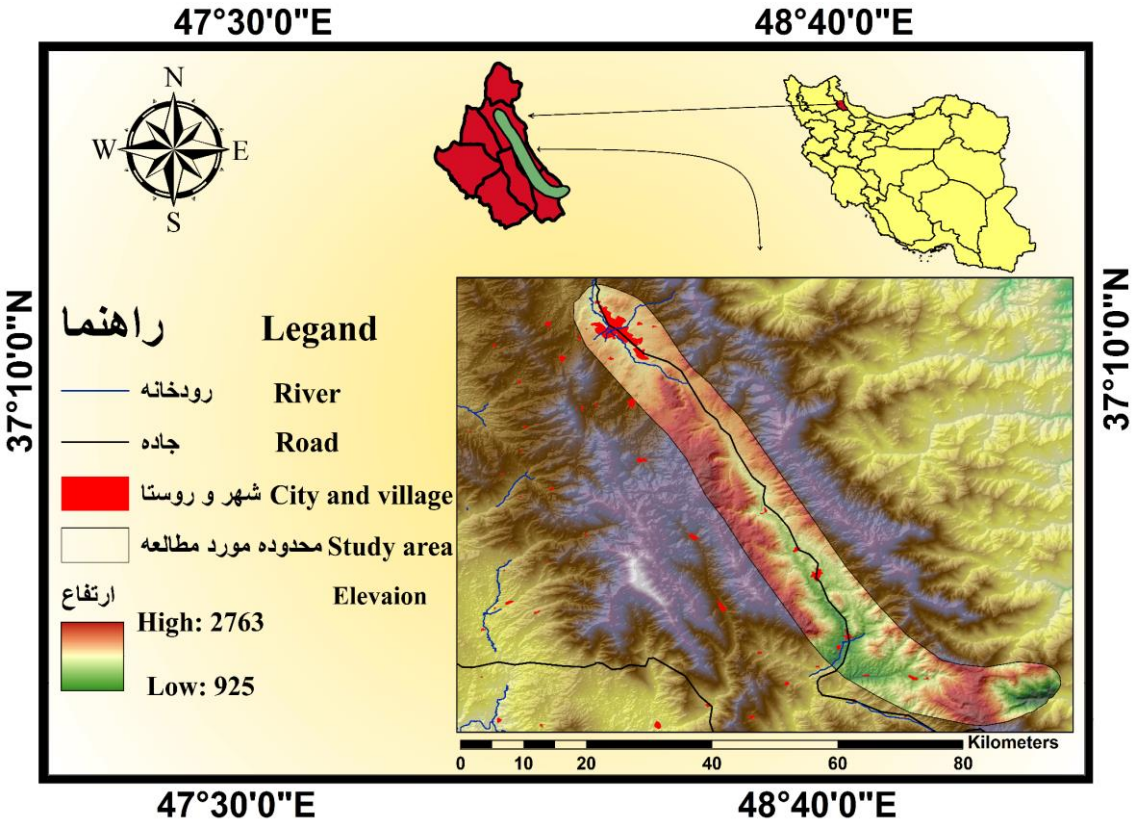
پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در آزادراه خرم‌آباد – پل زال پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که معیار فاصله از جاده با وزن ۰/۱۶ و جنس سنگ با وزن ۰/۱۶ مهم‌ترین معیارهای سنجش خطر ریزش سنگ هستند. امامی و یوسفی (Emami & Yousefi, 2023) به مقایسه کارایی برخی از مدل‌های یادگیری ماشین در تهیه نقشه حساسیت پذیری به حرکات توده‌ای (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری) پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که ارتفاع، زاویه شیب، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها عوامل بحرانی در وقوع حرکات توده‌ای هستند. فانوس و همکاران (Fanos, Pradhan, Alamri & Lee, 2020) به ارزیابی خطر ریزش سنگ با استفاده از داده‌های اسکن لیزری و مدل‌سازی سه‌بعدی در GIS (مطالعه موردی کشور مالزی) پرداختند و نتایج نشان داد که مدل هیبریدی پیشنهادی می‌تواند مناطق منبع ریزش سنگ را در مقیاس منطقه‌ای به‌دقت شناسایی کند. المولات و همکاران (Elmoulat, Brahim, Elmahsani, Abdelouafi & Mastere, 2021) به ارزیابی تأثیر فضایی سقوط سنگ بر اساس دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های حساسیت ریزش سنگ در مراکش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. بر اساس نتایج، عوامل فاصله از گسل با امتیاز ۰/۷۴ درصد و عامل شیب با امتیاز ۰/۶۶ بیش‌ترین نقش را در ریزش سنگ داشته است. نانه کران و همکاران (Nanehkaran, Licai, Chen, Azarafza & Yimin, 2022) به استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارائه نقشه‌های حساسیت خطر برای خرابی‌های ریزش‌سنگ در کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد قسمت شمالی منطقه موردمطالعه دارای خطرات بالایی برای شکست‌های ریزش سنگ است و مدل MLP نتایج محافظه‌کارانه‌تری نسبت به طبقه‌بندی کننده‌های دیگر ارائه می‌دهد. سیریللو و همکاران (Cirillo, Zappa, Tangari, Brozzetti & Ietto, 2024) به تجزیه‌وتحلیل سقوط سنگ از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد و مدل‌های سه‌بعدی در منطقه ایتالیا پرداختند. نتایج نشان‌داد که واژگونی سنگ و لغزش مسطح و فروپاشی خمشی مستقیم فراوان‌ترین نوع مخاطره در این منطقه محسوب می‌شود. لوکس و همکاران (Lucks, Stilla, Hoegner & Holst, 2024) به پایش فتوگرامتری ریزش سنگ در محیط‌های آلپ با استفاده از M3C2 و بردارهای حرکت ردیابی شده پرداختند و نتایج نشان داد که روش ارائه‌شده وضوح فضایی نقاط مشاهده‌شده را در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری سنتی با استفاده از نقاط مشخص‌شده بهبود می‌بخشد. مخاطرات دامنه‌ای به‌ویژه ریزش‌سنگ یکی

از خطرناک‌ترین مخاطرات طبیعی است که می‌تواند خسارات جانی و مالی زیادی را ایجاد کند. محور خلخال به شاهرود نیز به علت قرارگیری در یک منطقه کوهستانی، رخداد ریزش سنگ خسارات زیادی را در منطقه ایجاد کرده است. بنابراین شناخت نواحی مستعد برای اخذ تدابیر پیشگیرانه و مدیریت بحران، امری ضروری به شمار می‌رود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

محور ارتباطی خلخال به شاهرود به طول ۶۰ کیلومتر در جنوبی‌ترین نقطه شهرستان خلخال در محدوده سیاسی استان اردبیل با مختصات جغرافیایی "۳۹ ′۱۷ °۳۷ تا "۴۹ ′ ۳۵ °۳۷ عرض شمالی و"۴۱ ′۲۷ °۴۸ تا "۴۷ ′۳۵ °۴۸ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). از ارتفاعات منطقه می‌توان به رشته‌کوه‌های تالش (باغرو داغ) در شرق و ارتفاعات غربی (فلات آذربایجان) اشاره کرد که بیش‌ترین ارتفاع منطقه ۲۴۰۰ متر و کم‌ترین ارتفاع ۱۳۲۸ متر است. در مسیر جاده خلخال به شاهرود سازندهای مختلفی دیده می‌شود، در نزدیکی خلخال سنگ‌های جدیدتر به سن پلیوسن و ائوسن که شامل آندرزیت و گنگلومرا است قرار دارد. از ۵ کیلومتری روستای خمس تا جنوبی‌ترین بخش منطقه بیش‌تر سنگ‌های منطقه از نوع آهک و شیل را شامل می‌شود که قدیمی‌ترین آن‌ها مربوط به اواخر پالئوزویک است. منطقه به‌لحاظ تکتونیک بسیار فعال بوده و تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی چین‌خوردگی‌های مختلفی در منطقه به‌صورت طاقدیس و ناودیس دیده می‌شود. طی این فعالیت تکتونیک گسل‌ها و شکستگی‌های مختلفی در منطقه دیده می‌شود که از اصلی‌ترین آن‌ها، گسل هروآباد یا شاهرود چای اشاره است. همچنین میکرو گسل‌های مختلفی در منطقه دیده وجود دارد که طی مطالعات میدانی شناسایی‌شده است (Vahabzadeh, 2023).



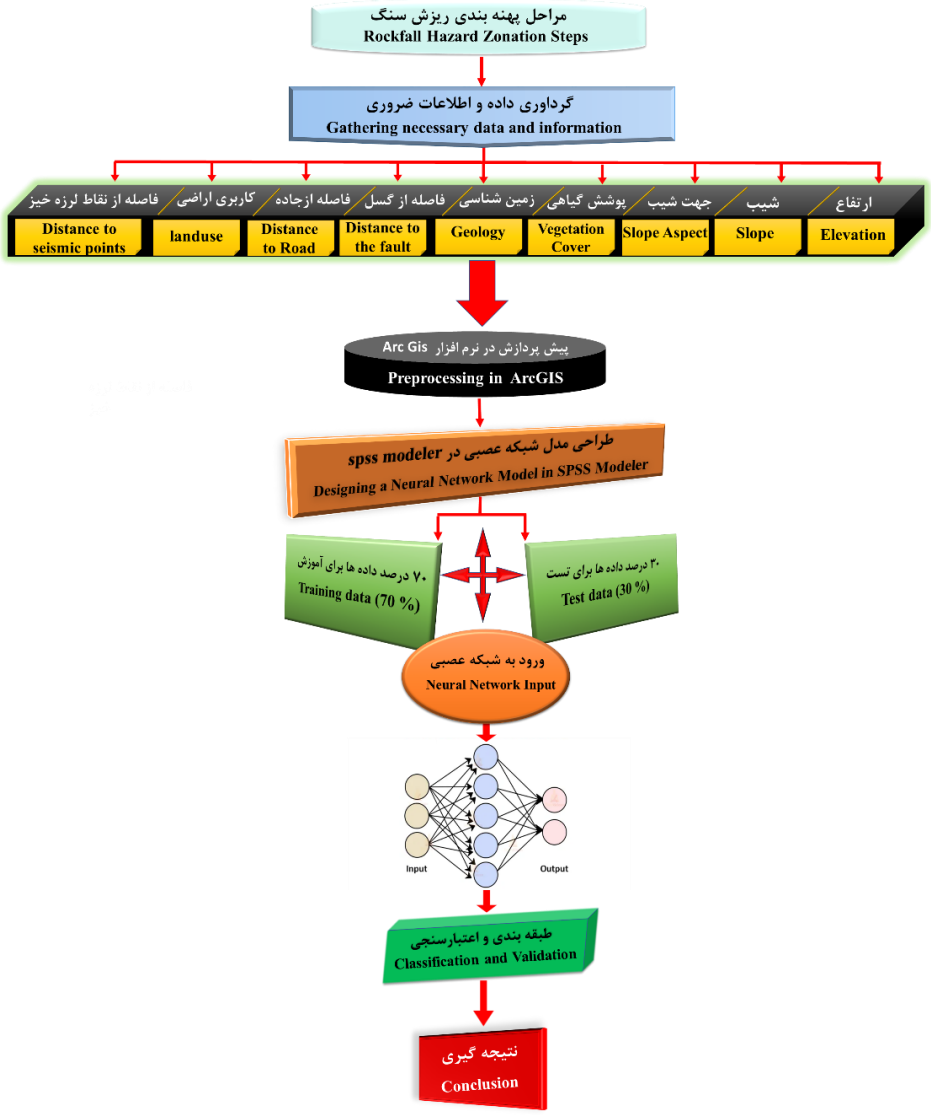
شکل ۱-نقشه محدوده موردمطالعه

Fig.1. Study area location

۲-۲- روش انجام پژوهش

یکی از اساسی‌ترین مراحل انجام هر پژوهش جمع‌آوری داده و اطلاعات مختلف است در این پژوهش نیز داده و اطلاعات مختلفی به کار گرفته‌شده است که شامل: نقشه زمین‌شناسی استان اردبیل با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ که اطلاعات مربوط به گسل‌ها و لیتولوژی از این نقشه استخراج‌شده است. نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ که نقشه جاده‌ها و شبکه آبراهه اصلی از این نقشه استخراج‌شده و داده‌های میدانی نقاط ریزشی از طریق بازدید میدانی و دستگاه GPS برداشت‌شده است. داده‌ها و اطلاعات مهم سنجش‌ازدوری شامل: لایه پوشش گیاهی و لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل ۲ برای ماه ژوئن سال ۲۰۲۴ استخراج شده است. همچنین در بررسی دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی، ضریب کاپا ۰/۸۹ و صحت کلی

۹۲/۱۸ محاسبه گردید. نقشه ارتفاعی، نقشه شیب، نقشه جهت شیب از تصاویر ماهواره‌ای ALOS – PALSAR با قدرت تفکیک ۱۲ متری استخراج شده است. این پژوهش متکی بر کارهای میدانی، تحلیلی و آماری است. جهت تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها و اجرای مدل‌های تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS، SPSS Modeler، ENVI استفاده شده است (Vahabzadeh, 2023). تمام داده‌های مورداستفاده برای آماده‌سازی در مرحله اول وارد نرم‌افزار Arc GIS شده و پردازش مقدماتی روی تمام لایه‌ها انجام‌شده است (شکل ۲)



شکل ۲–مراحل روش تحقیق

Fig.2. Steps of the research method

در این پژوهش آماده‌سازی تمام لایه‌های موردنیاز در پروسه پهنه‌بندی ریزش‌سنگ به‌صورت رسترپایه انجام‌شده است. بنابراین تمام لایه‌های موردنیاز بعد از ایجاد شدن در نرم‌افزار Arc GIS باهم ادغام‌شده و یک تصویر رستری جدیدی ایجادشده است. در این روش هر پیکسل شامل تمامی اطلاعات لایه‌های مورداستفاده را شامل می‌شود. لذا برای هر پیکسل با مشخصات تمامی لایه‌های دخیل، در صورت رخداد ریزش سنگ عدد یک و در صورت عدم رخداد ریزش سنگ مقدار صفر در نظر گرفته شده است (Esfandiary Darabad, Rahimi, Navidfar & Mehrvarz, 2020). این کار به‌این‌علت است که الگوریتم پرسپترون چندلایه تنها اطلاعات باینری را درک کرده و قادر است بر اساس مقادیر باینری سایر روابط و متغیرها را شناسایی و پیش‌بینی کند. مزیت این روش عدم هیچ‌گونه تغییرات از جانب کارشناس بر نتایج احتمالی پژوهش است (Yan et al., 2023). تصویر ادغام‌شده بعد از طبقه‌بندی برای مدل‌سازی الگوریتم پرسپترون چندلایه برای پهنه‌بندی ریزش سنگ وارد نرم‌افزار SPSS Modeler شده است. لایه اطلاعاتی آماده‌شده در محیط نرم‌افزار SPSS Modeler با نسبت ۷۰ درصد برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای اعتبار نتایج مدل طراحی‌شده است.

۲-۳- الگوریتم پرسپترون چندلایه

یکی از اجزای کلیدی در شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم پرسپترون چندلایه هستند که در پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری ادغام‌شده‌اند. الگوریتم پرسپترون چندلایه یک سازوکار محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آن‌ها، یک سری اطلاعات جدید را ارائه دهد (Lee, Ryu, Lee & Won, 2006). الگوریتم پرسپترون چندلایه اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت می‌کنند و برای هر یک از لایه‌های ورودی وزن اختصاص می‌دهد و وزن لایه‌ها را باهم ترکیب می‌کند. وزن‌های اختصاص داده شده درنهایت به لایه میانی منتقل می‌شوند و گره‌ها عملیات پردازش را بر روی وزن‌ها انجام می‌دهند (Delashmit & Manry, 2005). گره‌ها اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت کرده و با استفاده از وزن‌های خود، پردازش‌های مختلفی را اجرا می‌کنند و نتیجه این پردازش به‌صورت لایه خروجی از شبکه بهره‌مند می‌شود (Rana, Rawat, Bijalwan & Bahuguna, 2018). الگوریتم پرسپترون چندلایه شامل یک یا چندلایه میانی هستند که نورون‌های این لایه به‌عنوان نورون‌های مخفی شناخته می‌شوند و افزودن چندین لایه میانی باعث

افزایش توانایی شبکه در تحلیل‌های با پیچیدگی بالاتر می‌شود (Demuth, Beale, De Jess & Hagan, 2014). این الگوریتم‌ها به‌عنوان «شبکه‌های نظارت‌شده» شناخته می‌شوند به این معنا که نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل را می‌توان با مقادیر شناخته‌شده متغیرهای هدف مقایسه کرد (Rana et al., 2018). یکی از مزایای اصلی الگوریتم پرسپترون چندلایه در مقایسه با تکنیک‌های آماری کلاسیک، انعطاف‌پذیری و عدم وجود مفروضات توزیعی آن‌ها است (Yan et al., 2023). به‌عنوان‌مثال، الگوریتم پرسپترون چندلایه را می‌توان برای پیش‌بینی نتایج قطعی و پیوسته استفاده کرد. تعلیم الگوریتم پرسپترون چندلایه پیش‌خور شامل اختصاص وزن بین نورون‌ها بوده و در هر بار وزندهی، مجموعه‌های از ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب به‌عنوان نمونه به خدمت گرفته می‌شوند (Riedmiller & Lernen, 2014). الگوهای احتمالاتی با یکدیگر برابر در نظر گرفته می‌شوند به این معنی که هیچ الگویی نسبت به سایر الگوها از اهمیت بیش‌تری برخوردار نیستند (Ramdhani et al., 2022). در ابتدا، وزن بین نورون‌ها به‌صورت تصادفی تعیین می‌گردد و سپس الگوی ارائه‌شده به شبکه با نتایج مطلوب مقایسه می‌شود، مسلماً خروجی‌های اولیه به نتایج مطلوب شبیه نبوده و دارای خطای نسبی نسبت به فاصله اقلیدسی بین خروجی محاسبه‌شده و نتایج مطلوب می‌باشد و از بین کم‌ترین میانگین خطا، وزن‌ها مطابق با میزان خطا، اصلاح‌شده و میزان آن‌ها کاهش می‌یابد (Zhao, Tian, Li & Ma, 2018).

۲-۴- روش طبقه‌بندی جنکس[1]

روش طبقه‌بندی جنکس در نرم‌افزار Arc Gis به‌عنوان یک روش مؤثر برای ترتیب‌دهی مقادیر در کلاس‌های مختلف ارائه‌شده است. این الگوریتم از یک‌روند تکراری برای گروه‌بندی داده‌ها استفاده می‌کند 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 & Kazemitabar, 2020). مراحل این روش به شرح زیر بوده و تا زمانی که واریانس هر طبقه به کم‌ترین مقدار خود برسد، ادامه می‌یابد (Abdi Bastami, Memarian, Tajbakhsh & Azamy Rad, 2019).

۱. محاسبه مجموع مربع انحراف بین طبقات (*SDBC*)[2]

[1] Jenks

۲. محاسبه مجموع مربع انحراف از میانگین [1](SDAM)

۳. محاسبه مجموع مربع انحراف از میانگین طبقات [2](SDCM)

پس از محاسبه مقادیر SDBC، از طبقه‌ای با بیش‌ترین مقدار SDBC به‌طرف طبقه‌ای که کم‌ترین مقدار SDBC را دارد یک واحد جابه‌جایی اعمال و انحراف طبقات جدید محاسبه می‌شود و این مراحل تا زمان به حداقل رسیدن مقدار انحراف طبقات ادامه می‌یابد که منجر به یافتن بهترین برازش واریانس[3] (GVF) می‌گردد. مقادیر GVF بین صفر و یک متغیر بوده که صفر بدترین و یک بهترین برازش می‌باشد: (Abdi Bastami er al., 2019).

رابطه (۱): $$GVF=(SDAM-SDCM)/SDAM$$

۲-۵- اعتبار سنجی خروجی الگوریتم پرسپترون چندلایه

برای اعتبارسنجی داده‌ها و نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ از منحنی ROC در رابطه با خروجی داده‌ها استفاده‌شده است. منحنی ROC یک ابزار مؤثر روش‌ها برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های پیش‌بینی بوده که نشان‌دهنده این است که چقدر سیستم در تشخیص رخدادهای مثبت و منفی موفق است (Gasemyan, Abedini, Roostai & Shirzadi, 2021). این منحنی یک محور x دارد که مقادیر عددی ورودی ریزش سنگ را که به‌عنوان عامل بی‌تأثیر در ریزش سنگ طبقه‌بندی شدند بر محور y که مقادیر عددی ورودی ریزش سنگ که به‌درستی شناخته شده‌اند را نمایش می‌دهد (Vahabzadeh, 2023).

رابطه (۲): (Gasemyan et al., 2021) $$X=\frac{n(tn)}{(n(tn)+n(fn))}$$

رابطه (۳): (Gasemyan et al., 2021) $$y=\frac{n(tp)}{(n(tp)+n(fn))}$$

[2] Squared Deviations between Classes (SDBC)

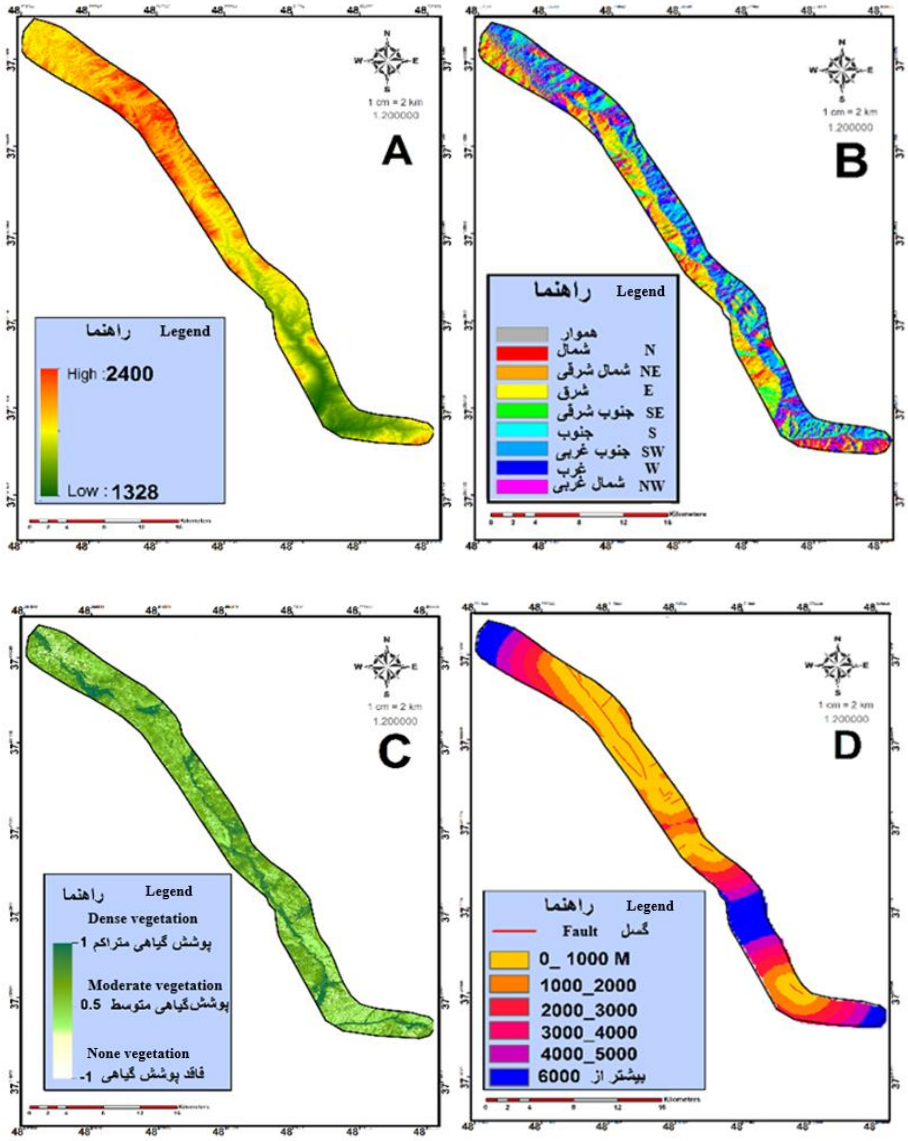
[1] Squared Deviations from the Array Mean (SDAM)

[2] Squared Deviations from the Class Means (SDCM)

[3] Goodness of Variance Fit (GVF)

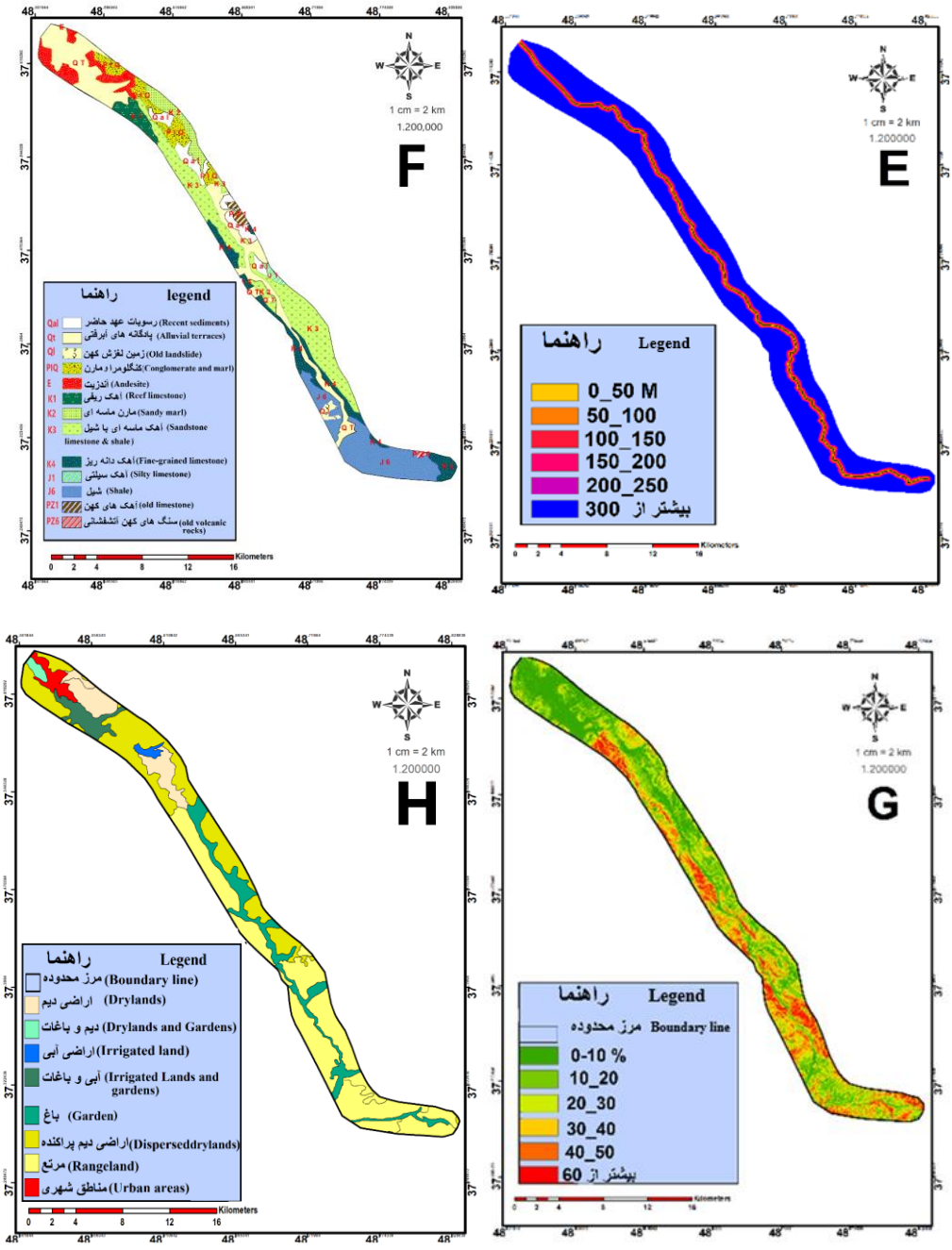
۳- نتایج و بحث

جهت مدل‌سازی و تهیه نقشه پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه، ۹ عامل انتخاب شده است (شکل ۳ تا ۵) که بعد از پیش‌پردازش و طبقه‌بندی وارد الگوریتم پرسپترون چندلایه شدند و مدل‌سازی انجام شده است.



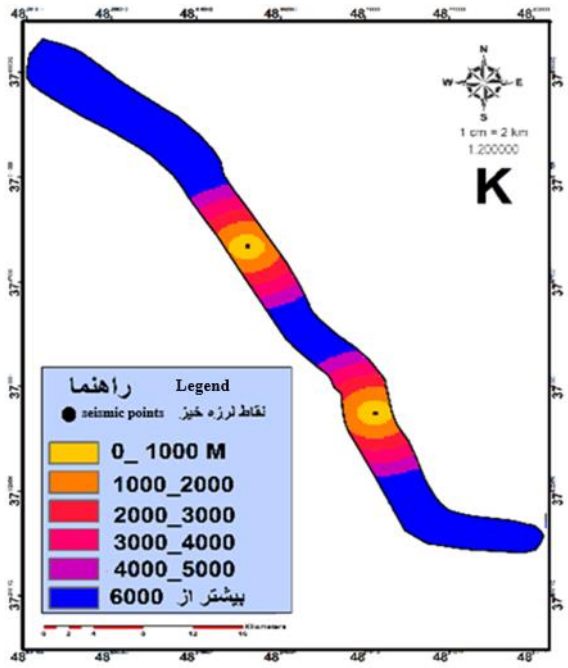
شکل ۳- A نقشه ارتفاع، B نقشه جهت شیب، C نقشه پوشش گیاهی، D نقشه فاصله از گسل

Fig.3. A Elevation Map **B** slope Aspect Map **C** Vegetation map **D** Distance to the fault



شکل ۴- E نقشه فاصله از جاده، F نقشه زمین‌شناسی، G نقشه شیب، H نقشه کاربری اراضی

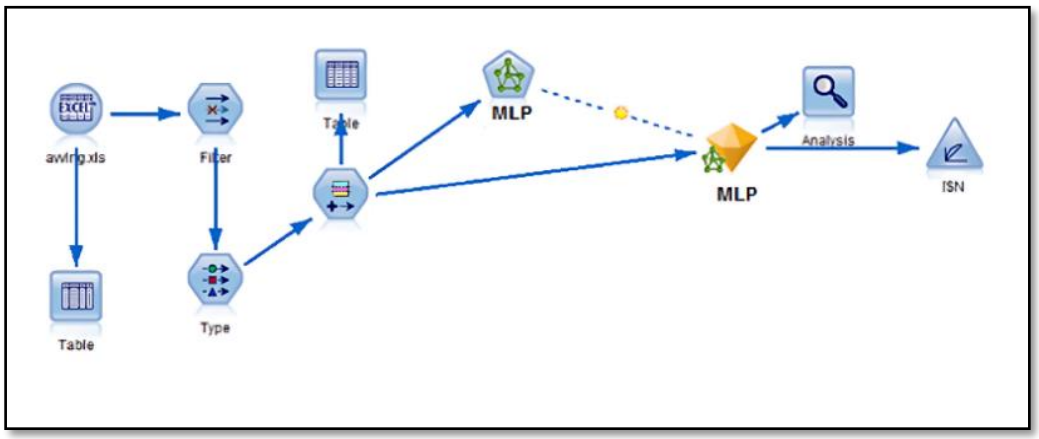
Fig.4. E Distance from Road **F** Geology Map **G** Slope Map **H** landuse Map



شکل ۵- K نقشه فاصله از نقاط لرزه‌خیز

Fig.5. K Distance from seismic points

در مرحله بعد اقدام به ساخت مدل در نرم‌افزارSPSS Modeler شده است. مدل اجرایی برای تحلیل خطر ریزش سنگ با ۹ نورون ورودی و ۸ نورون میانه و ۱ خروجی طراحی و اجرا شده است. در بخش اعتبار اولیه (شکل ۹) نشان‌دهنده این است که مدل طراحی‌شده ۹۸/۴ درصد در بخش فرایند آموزش و تخصیص درست داده‌ها موفق بوده است و می‌توان به نتایج آن اعتماد کرد. عموماً اعتبار اولیه مدل اگر بالای ۵۰ درصد باشد در روند مدل‌سازی و تحلیل می‌توان از خروجی آن استفاده کرد و در این پژوهش اعتبار اولیه از رتبه بسیار خوبی برخوردار است.



شکل ۶- مدل طراحی‌شده در SPSS Modeler

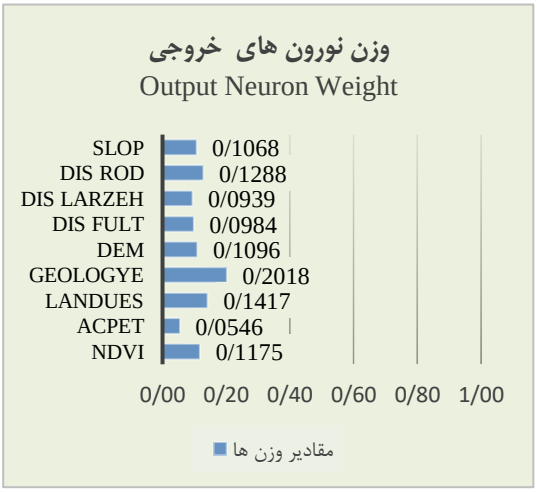
Fig.6. A model created in the SPSS Modeler

با توجه به (جدول ۱) نتایج نشان‌دهنده این است که در الگوریتم پرسپترون چندلایه بیش‌ترین ارزش وزنی برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ بوده که نشان‌دهنده این است که ریزش سنگ و خطرات ناشی از آن بیش‌تر وابسته به این متغیرها است. همچنین کم‌ترین مقادیر وزنی نیز مربوط به لایه‌های جهت شیب با مقدار ۰/۰۵، فاصله از گسل ۰/۰۹۸، فاصله از نقاط لرزه‌خیز ۰/۰۹۳ بوده که نشان‌دهنده این است که مقادیر اختصاص داده‌شده مدل بیش‌تر از عوامل تکتونیکی، بر روی پارامترهای محیطی وابسته است. همچنین نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات امیرپور کوهساره (Amirpour Kohsareh, 2018) که به بررسی مخاطرات ژئومورفولوژیکی دامنه‌های جاده ارتباطی اردبیل سرچم با تأکید بر ریزش و لغزش با استفاده از مدل منطق فازی پرداخته است، دارای شباهت و تفاوت‌هایی می‌باشد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عامل زمین‌شناسی و شیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش و ریزش در منطقه دارد و متغیرهای فاصله از جاده، جهت شیب و ارتفاع در درجه دوم تأثیرات زیادی را می‌گذارند. همچنین در مقایسه با نتایج این تحقیق نیز مؤثرترین عامل در رخداد ریزش سنگ عامل زمین‌شناسی و کاربری اراضی همراه با فاصله از جاده می‌باشد که با توجه به نتایج دو پژوهش، شباهت‌های زیادی وجود دارد. همچنین در بخش مدل‌سازی در این تحقیق از الگوریتم پرسپترون چندلایه استفاده شده درحالی‌که در تحقیق امیرپور کوهساره (Amirpour Kohsareh, 2018) از مدل منطق فازی استفاده شده است.

با توجه به عملکرد و نوع معماری هر دو مدل، الگوریتم پرسپترون چندلایه با توجه به معماری و الگوبرداری از شبکه عصبی مغز انسان، در طبقه‌بندی و پیش‌بینی متغیرها عملکرد خوبی نسبت به مدل منطق فازی دارد.

شکل ۷- نمودار وزنی خروجی مدل

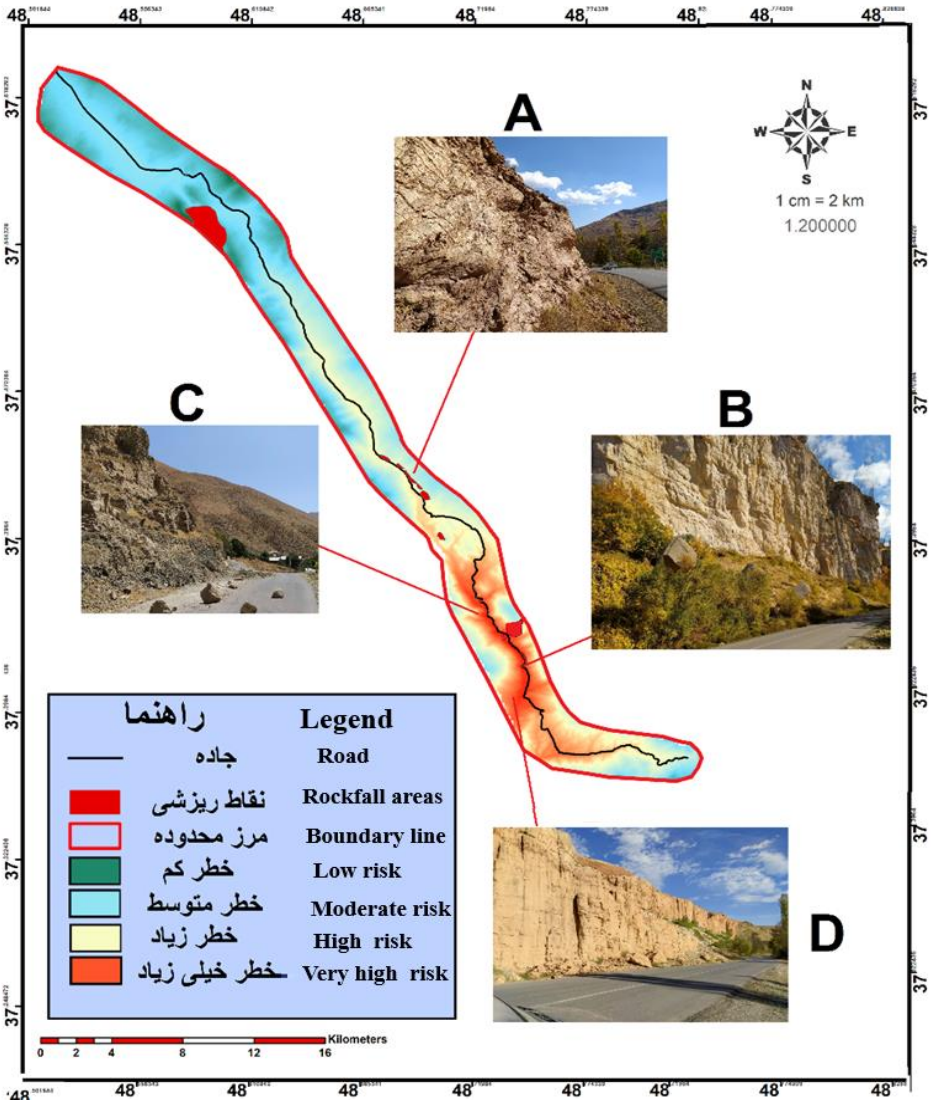
Fig.7. Weighted graph of the model output



جدول ۱-مقادیر وزنی خروجی مدل

Table1- Weighted values of the model output

نورون ورودی	وزن نورون خروجی
Input Neuron	**Output Neuron Weight**
NDVI	0.1175
ASPECT	0.0546
LANDUES	0.1417
geology	0.2018
DEM	0.1096
dis fault	0.0984
dis larzeh	0.0939
dis rod	0.1288
SLOPE	0.1068



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه: A محدوده روستای اسبو، B محدوده روستای شال، C محدوده روستای شال، D محدوده روستای گیلوان

Fig.8. Rockfall risk zoning map using multilayer perceptron algorithm:

A Asbou vilage **B** Shal vilage **C** Shal vilage **D** Gilvan vilage

در ادامه بعد از اتمام مدل‌سازی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ، نقشه نهایی در چهار طبقه با روش جنکس طبقه بندی شده است. مساحت مناطق خطرناک در چهار رتبه به‌صورت: کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی‌شده است. طبق (جدول ۲) نیز مساحت طبقات خطرپذیری نشان‌دهنده این است که در

الگوریتم پرسپترون چندلایه بیش‌ترین طبقه به لحاظ خطرپذیری دارای مقدار ۲۷/۹۹ کیلومترمربع، برای طبقه خطرپذیری زیاد مقدار ۳۱/۶۱ کیلومترمربع، در بخش خطرپذیری متوسط نیز مقدار ۴۰/۰۱ کیلومترمربع، در طبقه خطرپذیری کم نیز مقدار ۳۰/۵۵ کیلومترمربع اختصاص داده شده است. به لحاظ پراکنش طبقات خطرپذیری ۹۸ درصد از طبقات خطرپذیری زیاد تا خیلی زیاد در بخش جنوبی منطقه گسترش دارد و بخش شمالی منطقه به لحاظ داشتن خطرپذیری در طبقه کم تا متوسط قرار دارد. همچنین براساس تحلیل تأثیرگذاری عوامل ۹ گانه در رخداد ریزش سنگ، در عامل زمین‌شناسی بیش‌تر ریزش سنگ‌ها در لایه‌های سنگی مربوط به آهک و شیل می‌باشد. همچنین پهنه خطرپذیری زیاد تا خیلی‌زیاد نیز در بخش سنگ‌های آهک و شیل به سن ژوراسیک و کرتاسه گسترش دارند. لایه کاربری اراضی برای منطقه در ۸ طبقه، طبقه‌بندی شده است و از بین این طبقات، اراضی مرتعی بیش‌ترین تأثیر را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد، بیش‌تر این مراتع به‌صورت کوه‌ها و تپه‌های چین‌خورده است و این عامل در کنار استخراج سنگ‌آهک باعث شده ریزش سنگ در این بخش رخ دهد. فاصله از جاده به علت کوهستانی بودن منطقه در تأثیرگذاری رخداد ریزش سنگ، بسیار مهم است. لایه فاصله از جاده در ۶ طبقه و بین بازه ۵۰ تا ۳۰۰ متر اختصاص داده شده است. طبقات ۵۰ تا ۲۰۰ متری با جهت جغرافیایی جنوبی بیش‌ترین نقش را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد. لایه شیب نیز در طبقات ۳۰ تا ۶۰ درجه بالاترین تأثیر را در منطقه دارد همچنین جهت شیب نیز در جهت‌های جنوب، جنوب غربی، جنوب شرقی بیش‌ترین تأثیر را در رخداد ریزش سنگ در منطقه دارد. عامل پوشش گیاهی نیز بین منفی ۱ تا مثبت ۱ طبقه‌بندی شده است، طبقات ۰/۵ تا ۱ بالاترین تأثیر را دارد. بیش‌تر پوشش گیاهی در منطقه به‌صورت گون و درختچه‌های متراکم است و رویش این پوشش گیاهی در شکاف و صخره سنگ‌های آهک باعث فشار به دیواره‌ها شده و سبب ریزش سنگ می‌شود. عامل فاصله از گسل و نقاط لرزه‌خیز نیز به‌عنوان عوامل تکتونیکی در طبقات ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متری طبقه‌بندی شده است و نسبت به سایر عوامل نقش کم‌تری دارند.

جدول ۲- مساحت طبقات خطرناک

Table-2 Range of the hazard classes

مساحت Area (km^2)	طبقات ارزیابی خطر ریزش سنگ بر اساس مدل پرسپترون چندلایه Range of the rockfall hazard classes using multilayer perceptron algorithm
30.55	خطرپذیری کم (Low risk class)
40.01	خطرپذیری متوسط (Moderate risk class)
37.61	خطرپذیری زیاد (High risk class)
27.99	خطرپذیری خیلی زیاد (Very high risk class)

۳-۱- اعتباری سنجی نتایج با نمودار ROC

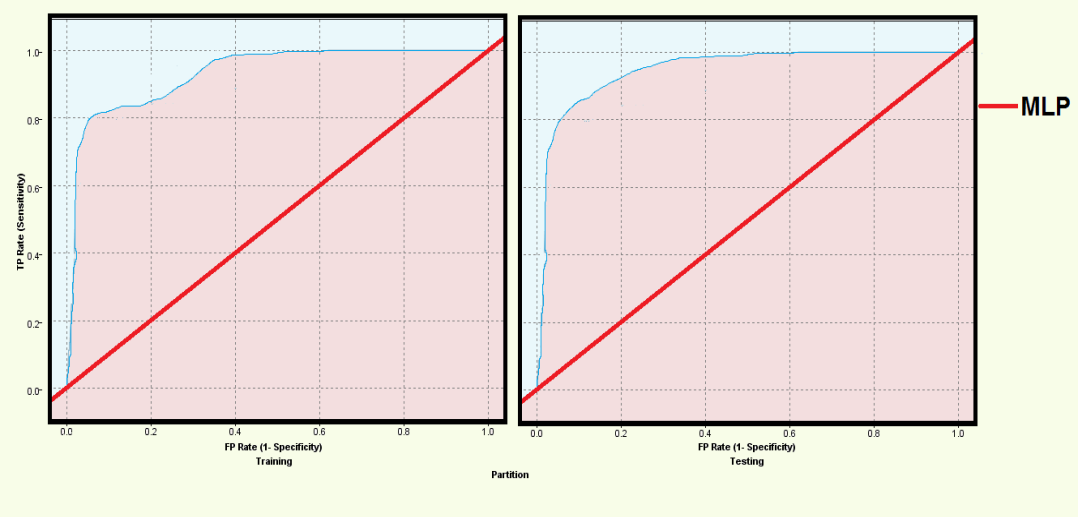
مقادیر ROC بین بازه ۰ تا ۱ بوده بنابراین هرچه مقدار ROC به ۱ نزدیک‌تر باشد مدل دارای اعتبار بالاتری است. این منحنی هم برای داده‌های آموزشی و هم برای داده‌های تست شبکه اجرا شده است. همچنین اعتبارسنجی بخش تست شبکه نیز به‌عنوان بخش نهایی در اعتبار سنجی شناخته می‌شود که برحسب نوع و میزان آموزش کیفیت داده‌های خروجی نیز متغیر است. با توجه به (جدول ۳) که میزان موفقیت مدل الگوریتم پرسپترون چندلایه را در شناخت مناطق فعال به‌لحاظ خطر ریزش سنگ نشان می‌دهد، مدل طراحی‌شده با مقدار ۹۸/۳۱ درصد در بخش آموزش توانسته مناطق خطرناک را شناسایی کند و تنها ۱/۶۲ درصد دارای خطا بوده و مناطق خطرناک به لحاظ خطر ریزش سنگ را نتوانسته مشخص کند. در بخش آموزش جمعاً ۷۰ درصد داده‌های کل استفاده‌شده که دارای مقدار ۴۶۹۸ عدد می‌باشد. از این تعداد ۴۶۲۲ عدد در زون خطرناک شناسایی‌شده و ۷۶ عدد دارای خطا بوده است. همچنین در بخش مهم تست الگوریتم پرسپترون چندلایه نیز خروجی مدل نمایان گر این است که دقت مدل برای شناسایی مناطق خطرناک ۹۸/۳۱ درصد بوده و تنها مقدار ۱/۶۹ درصد در شناخت مناطق خطرناک دچار خطا بوده است. از داده‌های مورداستفاده در بخش تست شبکه جمعاً ۳۰ درصد به مقدار ۲۰۱۲ عدد استفاده‌شده که از این مقدار ۱۹۷۸ عدد در زون خطرناک و تنها ۳۴ عدد به‌اشتباه شناسایی‌شده است.

جدول ۳- نتایج آموزش و تست مدل

Table3- Training and testing model results

Partition	Training		Testing	
Correct	4,622	98/38%	1978	**98/31%**
Wrong	76	1/62%	34	**1/69%**
Total	4,698		2012	

با توجه به شکل ۹ که در بخش اول مربوط به قسمت آموزش الگوریتم پرسپترون چندلایه است، میزان اعتبار نشان‌دهنده این است که مدل به‌خوبی آموزش‌دیده و توانسته بخش زیادی از مناطق خطرناک به لحاظ ریزش سنگ را شناسایی کند. معیار این منحنی به‌گونه‌ای 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 بالایی مدل در بخش آموزش می‌باشد (Vahabzadeh, 2023). بنابراین آموزش صحیح مدل سبب شده که نتایج خروجی در بخش تست نیز روند اعتبار بالا را نشان دهند. مقدار AUC عدد ۰/۹۸۱۰ در بخش آموزش و ۰/۹۸۷۶ در بخش تست شبکه را نمایش می‌دهد که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی بوده و نتایج خروجی آن قابل‌اعتماد است.



شکل ۹- نمودار اعتبار سنجی ROC

Fig.9. ROC curves estimated for validity model

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه پرداخته است. بدین منظور از داده‌ها و اطلاعات مختلفی استفاده‌شده که شامل نقشه زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی، داده‌های سنجش‌ازدوری می‌باشد. ریزش سنگ 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، بیش‌ترین ارزش وزنی برای لایه زمین‌شناسی با مقدار ۰/۲۰ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۲ بوده است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که ریزش سنگ و خطرات ناشی از آن بیشتر وابسته به این متغیرها می‌باشد. همچنین کم‌ترین مقادیر وزنی نیز مربوط به لایه‌های جهت شیب با مقدار ۰/۰۵، فاصله از گسل ۰/۰۹۸، فاصله از نقاط لرزه‌خیز ۰/۰۹۳ اختصاص داده‌شده که نشان‌دهنده این است که مقادیر اختصاص داده‌شده مدل، بیش‌تر از عوامل تکتونیکی، به پارامترهای محیطی وابسته است. قرارگیری سنگ‌های رسوبی مختلف مثل آهک و سنگ‌های تخریبی موجب شده که ساختمان دامنه‌ها در مواجه با نیروهای دینامیک بیرونی پایداری خود را از دست بدهند. سنگ‌های آهک و شیل و بیش‌تر سنگ‌های رسوبی دارای مقاومت برشی کمی هستند و در مواجه با آب و تداوم ذوب و یخ بستن، ترک‌های زیادی بر روی آن‌ها ایجاد می‌شود. همچنین سنگ‌های رسوبی به‌ویژه آهک و شیل در مواجه با انحلال، قدرت کمی دارند و این عوامل باعث می‌شود که سطح برون‌زدگی سنگ در دامنه‌ها ناپایدار شده و تحت تأثیر یک عامل بیرونی شروع به ریزش سنگ کند. تغییرات کاربری اراضی چندانی در منطقه از سوی افراد محلی و کشاورزی دیده نمی‌شود ولی بیش‌تر تغییرات کاربری اراضی جنبه صنعتی دارد و توسط فعالیت‌های معدنی مختلف در منطقه صورت گرفته‌شده است. منطقه موردنظر یکی از مناطق مستعد در جهت استخراج مواد معدنی مختلف است که وجود توده‌های سنگ‌آهک سبب شده معادن مختلفی در سطح منطقه فعالیت کنند. یکی از مشکلات این معادن قرارگیری آن‌ها در حریم جاده‌ای است که سبب شده بیش‌تر دامنه‌ها تحت اثر فعالیت معدن ناپایدار شود و آماده ریزش سنگ باشد. همچنین تغییرات و توسعه شبکه راه‌ها به‌ویژه در جاده خلخال به شاهرود در چند دهه اخیر سبب شده است که بیش‌تر دامنه‌های مشرف‌به جاده بریده‌شده و تبدیل به جاده شود. جاده‌های ارتباطی مهمی از منطقه عبور می‌کند که بر روند

توسعه اقتصادی و رشد صنعت حمل‌ونقل کل استان اردبیل تأثیر مثبتی دارد. به‌صورت کلی دخالت عوامل طبیعی در رخداد ریزش سنگ در منطقه نسبت به عوامل انسانی کم بوده و روند طبیعی چرخه تغییرات سطح دامنه به‌صورت متعادل در حال انجام است، درحالی‌که دخالت عوامل انسانی در این چرخه باعث شده است که روند تغییرات سرعت زیادی به خود بگیرد و رخداد ریزش سنگ در منطقه بیش‌تر شود.

همچنین الگوریتم پرسپترون چندلایه نشان داد که خروجی این مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست شبکه دارای اعتبار بالایی است و می‌توان در پهنه‌بندی ریزش سنگ مورداستفاده قرار گیرد. منحنی ROC دارای مساحت زیر منحنی زیادی است و مقدار AUC عدد ۰/۹۸۱۰ در بخش آموزش و ۰/۹۸۷۶ در بخش تست شبکه را نمایش می‌دهد که گویای این امر می‌باشد که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی است و در رتبه عالی قرارگرفته است. همچنین هم‌پوشانی مناطق خطرناک به لحاظ رخداد ریزش سنگ با نقاط واقعی برداشت‌شده با دستگاه GPS بالا بوده که نشان‌دهنده این است که اعتبار خروجی مدل قابل‌اعتماد است. درنهایت پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای مطالعه و ارزیابی ریزش سنگ و حرکات دامنه‌ای از مدل‌های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی استفاده شود. همچنین با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی و سایر عوامل، راهکارهای مدیریتی را می‌توان اتخاذ کرد که از رخداد مخاطرات دامنه‌ای در این محور جلوگیری کرده و درصد خسارات را کاهش داد. ازجمله این راهکارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱_ اصلاح زاویه و شیب دامنه‌ها.

۲_ نصب توری‌های لانه‌زنبوری و همچنین پایداری سطح دامنه از طریق حفر عمودی در داخل سنگ‌های دامنه و جاگذاری میله‌های آهنی متناوب.

۳_ عمل تخلیه مصنوعی با استفاده از مواد منفجره.

References

Abdi Bastami, S., Memarian, H., Tajbakhsh, S. M., & Azamy Rad, M. (2019). Prioritization of landslide effective factors using logistic regression (Case study: A part of KopeDagh- Hezar Masjed Zone). *Journal of Watershed Management Resesrch*, *10*(19), 154-170. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.10.19.154

Abedini, M., & Piroozi, E. (2020). Landslide hazard Zoning with Using Combination Methods of Hot Spot, ANP and WlC (Case Study: Khalkhal County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *8*(4), 19-36. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81836

Abedini, M., Mozafari, H., & Faal Naziri, M. (2019). Investigating and comparing the effectiveness of information value models and frequency ratio coefficient and Shannon's entropy in zoning rock fall risk (case study: Zanjan-Teham-Taram road). *Journal of the Geographical Studies of Mountainous Areas*, *3*(1) ,55-75. [In Persian] http://dx.doi.org/Doi:10.52547/gsma.3.1.55

Amirpour Kohsareh, S. (2018). *Investigating geomorphological hazards of Ardabil to Sarcham road with emphasis on rockfall and landslide using fuzzy logic model*. Master's thesis, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]

Asghari Saraskanrod, S., & Mozafari, H. (2020). Estimate and Comparison of Frequency Ratio and Network Analysis models in Rock falling Zoning(Case study Zanjan road to Taham and Tarom). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(4), 123-142. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.4.123

Cirillo, D., Zappa, M., Tangari, A. C., Brozzetti, F., & Ietto, F. (2024). Rockfall analysis from UAV-based photogrammetry and 3D models of a cliff area. *Drones*, *8*(1), 31. https://doi.org/10.3390/drones8010031

Delashmit, W. H., & Manry, M. T. (2005). *Recent developments in multilayer perceptron neural networks.* Paper presented of the 17th Annual Memphis Area Engineering and Science Conference, MAESC (7). https://ipnnl.uta.edu/publications/recent/

Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). *Neural network design*. United States: Martin Hagan. https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2721661

Elmoulat, M., Brahim, L. A., Elmahsani, A., Abdelouafi, A., & Mastere, M. (2021). Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, *8*, 1-19. https://doi.org/10.1186/s40677-021-00192-0

Emami, S. N., & Yousefi, S. (2023). Comparison of the efficiency of some machine learning models for mass movement susceptibility mapping (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, *33*(2), 183-204. [In Persian] https://doi.org/10.22071/gsj.2022.345954.2003

Esfandiary Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A., & Mehrvarz, A. (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

Eskandari, M. R., Nazarpour, A., & Khayat, N. (2023). Rockfall risk Mapping Using Multiple Criteria Decision Making (MCDM) AHP, and Fuzzy-Gamma methods in Khorramabad-Pol-e-Zal Freeway. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *12*(35), 139-156. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2023.41400.1872

Fanos, A. M., Pradhan, B., Alamri, A., & Lee, C. W. (2020). Machine learning-based and 3d kinematic models for rockfall hazard assessment using LiDAR data and GIS. *Remote Sensing*, *12*(11), 1755. https://doi.org/10.3390/rs12111755

Gasemyan, B., Abedini, M., Roostai, S., & Shirzadi, A. (2021). Landslide susceptibility assessment using a novel ensemble algorithm based model (Case Study: Kamyaran city, Kurdistan province). *Quantitative Geomorphological Research*, *9*(4), 130-146. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1400.9.4.8.6

Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Ghigi, S. (2004). Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental management*, *34*(2), 191-208. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0021-6

Hatamifar, R., Mousavi, S.H., & Alimoradi, M. (2012). Landslide hazard zonation using AHP model and GIS technique in Khoram Abad City. *Geography and Environmental Planning*, *23*(3), 43-60. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1391.23.3.3.5

Jaccard, C. J., Abbruzzese, J. M., & Howald, E. P. (2020). An evaluation of the performance of rock fall protection measures and their role in hazard zoning. *Natural Hazards*, *104*(1), 459-491. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04177-4

Jahandar, S., Aghagolzadeh, A., & Kazemitabar, J. (2020). Blind Recognition of Block Code Parameters in the Presence of High SNR Using Statistical Techniques. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, *10*(4), 373-381. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1398.10.4.4.2

Jiang, N., Li, H. B., & Zhou, J. W. (2021). Quantitative hazard analysis and mitigation measures of rockfall in a high-frequency rockfall region. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *80*, 3439-3456. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02137-1

Lee, S., Ryu, J. H., Lee, M. J., & Won, J. S. (2006). The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology*, *38*, 199-220. https://doi.org/10.1007/s11004-005-9012-x

Lucks, L., Stilla, U., Hoegner, L., & Holst, C. (2024). Photogrammetric rockfall monitoring in Alpine environments using M3C2 and tracked motion vectors. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100058. https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100058

Nakajima, S., Abe, K., Shinoda, M., Nakamura, S., & Nakamura, H. (2021). Experimental study on impact force due to collision of rockfall and sliding soil mass caused by seismic slope failure. *Landslides*, *18*, 195-216. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01461-z

Nanehkaran, Y. A., Licai, Z., Chen, J., Azarafza, M., & Yimin, M. (2022). Application of artificial neural networks and geographic information system to provide hazard susceptibility maps for rockfall failures. *Environmental Earth Sciences*, *81*(19), 475. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10603-6

Negahban, S., Jahan Tighmand, S., & Rahimi Herabadi, S. (2020). Explaining the Position of Positivism and Critical Methods in Geomorphic Hazard (Case: Rockfalls Hazard on Rudbar-Rostamabad Freeway). *Quantitative Geomorphological Research*, *9*(1), 52-66. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_109534.html

Ramdhani, Y., Mustofa, H., Topiq, S., Alamsyah, D. P., Setiawan, S., & Susanti, L. (2022). *Sentiment analysis twitter based lexicon and multilayer perceptron algorithm.* Paper presented of the 10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM) ,Yogyakarta, Indonesia, 1-6. https://doi.org/10.1109/CITSM56380.2022.9936029

Rana, A., Rawat, A. S., Bijalwan, A., & Bahuguna, H. (2018). *Application of multi layer (perceptron) artificial neural network in the diagnosis system: a systematic review*. Paper presented of the 2018 International conference on research in intelligent and computing in engineering (RICE) , 1-6. https://doi.org/10.1109/RICE.2018.8509069

Riedmiller, M., & Lernen, A. (2014). *Multi layer perceptron.* In Machine Learning Lab Special Lecture. Germany: University of Freiburg.

Vahabzadeh, M. (2023). *Risk zoning of skirts on Khalkhal road to Shahroud using artificial neural network system.* Master's thesis, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]

Yan, J., Zeng, S., Tian, B., Cao, Y., Yang, W., & Zhu, F. (2023). Relationship between highway geometric characteristics and accident risk: A multilayer perceptron model (MLP) approach. *Sustainability*, *15*(3), 1893. https://doi.org/10.3390/su15031893

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*, 1355-1364. https://doi.org/10.1007/s10064-017-1178-1

Vol.13, No.4, Autumn 2024, pp.27-47 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88366.1491 Open access

Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region

Mohammad Amin Izadipoor[a*], Reza Dahmardeh Behrooz[b*], Fatemeh Einollahipeer[c], Fatemeh Rajaei[d]

[a]*MSc in 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.*

Received: 4 May 2024 ***Revised: 12 June 2024*** ***Accepted: 3 July 2024***

Extended Abstract

Introduction

Water yield represents a crucial productive ecosystem service susceptible to alteration due to variations in land use and land cover characteristics. In recent decades, ecosystem services have become an important and major issue in ecological studies and land management. They include goods and benefits that humans obtain directly or indirectly from nature. Ecosystem services are categorized into four groups: production**,** regulation**,** support, and cultural. Currently, the reduction and destruction of these services are recognized as critical environmental issues globally. In this regard, the Millennium Ecosystem Assessment has reported that about 60% of the identified ecosystem services are being destroyed, and if this process continues without proper management and planning, the impact will increase significantly over the next 50 years.

Material and Methods

This research was conducted to evaluate water yield in the Sistan region, southeastern Iran, and assess its spatial correlation with land use and land cover characteristics, with a particular focus on landscape metrics including patch density (PD), number of patches (NP), largest patch index (LPI), landscape shape index (LSI), and edge density (ED). The

*. Corresponding authors:
Mohammadamin Izadipoor Email: aminizadi7999@gmail.com Tel:+989915998391
Reza Dahmardeh Behroozb Email: ddahmardehbehrooz@uoz.ac.ir Tel:+989155434532

How to cite this Article: Izadi poor, M. A. , dahmardeh behrooz, R. , eynollahi, F. , & rajaei, F. (2024). Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4) ,27-47.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

InVEST model was employed to evaluate water yield, and geographically weighted regression (GWR) in ArcGIS 10.5 was utilized to investigate the spatial correlation between water yield and landscape metrics. In this study, various data layers were used, including land use, average annual rainfall, reference evaporation and transpiration, depth of soil limiting layer, plant-accessible water content, plant evaporation and transpiration coefficient, and sub-basin map of the region. The area was zoned using the Tessellation Grid command in ArcGIS 10.5 software, and water production in each zone was extracted using the Extract command. The obtained values were then used as inputs for hot spot analysis.

Results and Discussion.

The results showed that in 75% of the Sistan region's land**,** the amount of water production is less than 60 mm per hectare. The total annual water yield in Sistan was estimated to be approximately 71 mm^3 (43 $m^3\ ha^{-1}$ on average). By comparing it to other regions of Iran, it was found that the amount of water production in this region is very low. The ecological and climatic conditions governing the region have caused the hot spots of water production to be located in the western areas and the cold spots in the eastern parts. The highest amount of water was yielded in the western areas, while the lowest was produced in the eastern parts. The highest and lowest water yield values were observed in barren and constructed lands, respectively, with values of 65 $m^3\ ha^{-1}$ and 4 $m^3\ ha^{-1}$. In addition, the results of the research found a significant spatial correlation between water production and different landscape features, including the number, density, size, and shape of spots, indicating that land use characteristics significantly affect water production in the study area. This study provides useful information regarding water production and its relationship with different land use characteristics, which can inform the development of strategies to preserve water resources.

Conclusion

The results of GWR analysis indicated a significant spatial correlation between water yield and the following landscape metrics: NP, PD, LPI, LSI, and ED ($0.95 < R^2 < 0.98$, p-value < 0.01), suggesting that land use characteristics influence the provision of water. This study provides valuable insights into the quantity of water yield and its correlation with various land use characteristics within the study area. These findings can inform the development of effective strategies to safeguard the region's water resources.

Keywords: Ecosystem Services, Water Yield, Landscape Metrics, InVEST Model, Geographically Weighted Regression (GWR).

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۴۷-۲۷ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد DOI: 10.22067/geoeh.2024.88366.1491 مقاله پژوهشی

ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان

محمدامین ایزدی‌پور[۱] – دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

رضا دهمرده بهروز[۲] – دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه عین‌اللهی پیر – استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه رجائی – استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ **دریافت**: ۱۴۰۳/۲/۱۵ **تاریخ بازنگری**:۱۴۰۳/۳/۲۳ **تاریخ پذیرش**:۱۴۰۳/۴/۱۳

چکیده

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که تحت تأثیر ویژگی‌های کاربری اراضی تغییر می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان و ارزیابی همبستگی مکانی آن با ویژگی‌های کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های تراکم و تعداد لکه، بزرگ‌ترین لکه، شکل سیمای سرزمین و تراکم لبه انجام شد. مدل اینوست برای ارزیابی تولید آب و رگرسیون وزنی مکانی (GWR) برای بررسی همبستگی مکانی بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین استفاده شد. مجموع تولید سالیانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید که بیشترین میزان آن در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده شد. اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها به ترتیب با ۶۵ و ۴ مترمکعب در هکتار دارای بیشترین و کمترین میزان تولید آب بودند. نتایج GWR مشخص کرد بین تولید آب با سنجه‌های موردنظر همبستگی مکانی معناداری وجود دارد (R2<0.98, p-value<0.01>۰.۹۵) که بیانگر اثر ویژگی‌های کاربری اراضی بر فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید آب است. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف

۱- نویسنده مسئول: ۰۹۰۳۹۳۱۶۴۷۴ Email: aminizadi7999@gmail.com

[۲] – نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۴۳۴۵۳۲ Email: ddahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی مورداستفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: خدمات اکوسیستم، تولید آب، تولید آب، سنجه های سیمای سرزمین، مدل InVEST, رگرسیون وزنی جغرافیایی.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر خدمات اکوسیستمی به موضوعی مهم و محوری در مطالعات اکولوژیک و مدیریت سرزمین تبدیل شده است. خدمات اکوسیستمی شامل کالاها و منافعی است که انسان به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم از طبیعت به دست می‌آورد. خدمات اکوسیستمی در چهار گروه تولیدی، تنظیمی، حمایتی و فرهنگی دسته‌بندی شده‌اند (De Groot, Wilson & Boumans, 2002; Costanza et al., 1997). در حال حاضر کاهش و تخریب خدمات اکوسیستمی به‌عنوان یک مسئله محیط زیستی حیاتی در سطح جهان شناخته شده است. در این راستا، ارزیابی اکوسیستم هزاره گزارش داده است که حدود ۶۰ درصد از خدمات اکوسیستمی شناسایی شده در حال تخریب هستند و در صورت ادامه این روند بدون مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب تا ۵۰ سال آینده بیشتر هم خواهد شد (MEA, 2003).

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که میزان در دسترس بودن منابع آبی در یک حوضه آبخیز را بیان می‌کند و بر مبنای تفاوت بارش و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود (Belete et al., 2020; Yifru, Chung, Kim & Chang, 2021). خدمات اکوسیستمی تولید آب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از عوامل مختلف به‌ویژه اقلیم و کاربری اراضی هستند، هرچند باید بین اثر این دو عامل تمایز قائل شد. بعلاوه، فعالیت‌های کشاورزی و انسانی، توسعه شهرها، رشد جمعیت و پدیده گرمایش زمین باعث تغییرات اساسی در بارش و تبخیر تعرق می‌شوند که در پی آن به‌طور بالقوه کاهش تولید آب را سبب می‌شوند (Guo, Yu, Xu, Yang & Wang, 2023). بر این اساس، برای حفظ و تخصیص منطقی منابع آبی در مناطق مختلف نیاز است تولید آب با توجه به الگوی حاکم بر اکوسیستم‌های آن‌ها ارزیابی و کمی‌سازی شود.(Tijjani, Giri & Woznicki, 2022; Sharp et al., 2014; MEA, 2003).

در مطالعات گذشته اثرات کاربری اراضی بر تغییر تولید آب موردتوجه قرار گرفته است. گائو و همکاران (Guo et al., 2023) اثرات کاربری اراضی بر عملکرد آب در ۱۷ زیرحوضه در سراسر چین را با استفاده از مدل اینوست ارزیابی و تأیید کردند که با توجه به ویژگی‌های اقلیمی، جغرافیایی و اقتصادی-اجتماعی، واکنش تولید آب به تغییرات کاربری اراضی می‌تواند متفاوت باشد. امیری و همکاران (Amiri, Khoshravesh & Valashedi, 2023) با ارزیابی تأثیر کاربری اراضی بر رودخانه تجن در شمال ایران با استفاده از مدل سوات، تأیید کردند که تغییرات کاربری اراضی می‌تواند منجر به تنش آبی در منطقه مطالعاتی‌شان در دهه‌های آتی شود. میرقائد و سوری (Mirghaed & Souri, 2023) تولید آب در حوضه آبخیز رودخانه شور در جنوب غرب ایران را با استفاده از مدل اینوست شبیه‌سازی و رابطه آن را با تغییرات کاربری اراضی، خصوصیات خاک و شاخص‌های توپوگرافی مورد ارزیابی قرار دادند. پی و همکاران (Pei et al.,2022) تغییرات سالانه تولید آب و ارتباط آن با محرک‌های مختلف را در ۲۰ سال گذشته در منطقه‌ای در شمال چین مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند و اثرات گذشته، حال و آینده پوشش گیاهی مجدد را بر تولید آب ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات آب‌وهوا و کاربری زمین به ترتیب مسبب ۸۸٪ و ۱۲٪ از تغییرات تولید آب از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بودند. دانشی و همکاران (Daneshi et al., 2021) با استفاده از مدل اینوست عملکرد، تولید و مصرف آب در حوضه آبریز تجن در شمال ایران را شبیه‌سازی و اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر حفظ آب را بر اساس سناریوهای مختلفی بررسی نمودند.

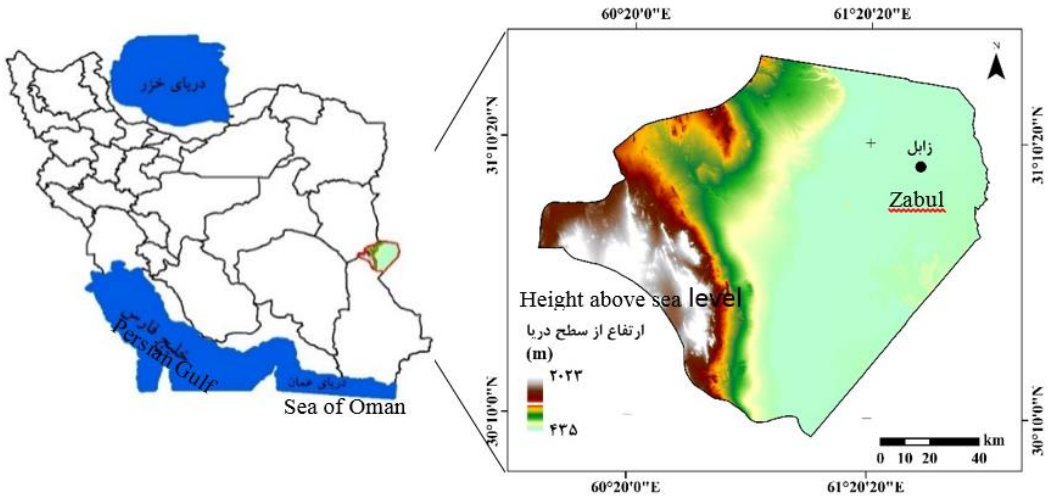
با وجود آنکه مطالعات مختلفی در رابطه با اثر کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستمی تولید آب انجام شده است اما این مسئله در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در ایران کمتر موردمطالعه قرار گرفته است. بعلاوه، اثر کاربری اراضی بر تولید آب با توجه به تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین نیز بندرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، وقوع مسائل مختلف محیط‌زیستی بخصوص مسائل مرتبط با آب در منطقه سیستان، ضرورت ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب به‌منظور کسب آگاهی و اطلاعات لازم برای اتخاذ راهبردهای مدیریتی مناسب و استفاده بهینه از منابع آبی و حفاظت اکوسیستم‌های آن را محرز ساخته است. ازاین‌رو، این پژوهش با توجه به اهداف زیر صورت پذیرفت: (الف) ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل تولید آب اینوست، (ب) تعیین نقاط داغ ارزیابی

خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه (ج) ارزیابی ارتباط بین کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی تولید آب بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه مطالعاتی.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

سیستان با مساحتی حدود ۱۶۴۵۹ کیلومترمربع در شمال استان سیستان و بلوچستان و شرق ایران واقع شده است. مختصات جغرافیایی منطقه شامل "۱۷ '۶ °۳۰ تا "۸ '۲۹ °۳۱ عرض شمالی و "۱۶ '۵۶ °۵۹ تا "۱۹ '۵۰ °۶۱ طول شرقی است. سیستان پنج شهرستان زابل، هامون، زهک، نیمروز و هیرمند را شامل می‌شود (شکل ۱). میانگین بارش و درجه حرارت سالانه این منطقه به ترتیب ۶۶ میلی‌متر و ۲۲ درجه سانتی‌گراد است و اقلیم آن در طبقه گرم و خشک آمبرژه قرار می‌گیرد. میانگین ارتفاع منطقه سیستان از سطح دریا حدود ۶۷۹ متر و متوسط شیب آن ۶ درصد برآورد شده است که نشان‌دهنده تغییرات کم توپوگرافی این منطقه می‌باشد. بخش‌های شرقی منطقه شامل دشت‌ها و مناطق مسطح است؛ درحالی‌که بخش‌های غربی آن دارای ارتفاعات بلندتر می‌باشد. کشاورزی و مرتع دو کاربری عمده در منطقه به شمار می‌روند که به ترتیب مناطق شرقی و غرب آن را دربرگرفته‌اند. رودخانه هیرمند تنها منبع آبی منطقه است که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد و درنهایت به تالاب هامون وارد می‌شود. تالاب و پناهگاه حیات‌وحش هامون به‌عنوان زیستگاه‌های گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی اهمیت اکولوژیک این منطقه را محرز ساخته است. منطقه سیستان از نظر جنبه‌های محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بسیار حائز اهمیت است. در دهه اخیر، وقوع و تداوم خشکسالی‌های متعدد، تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی و تأمین نشدن حقابه تالاب‌های منطقه، باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش منابع آب سطحی و خشک شدن قنات‌های آن شده است. به‌طوری‌که معیشت مردمان و حیات گیاهی و جانوری آن را با مشکلات جدی روبرو کرده است (Izadi poor, Dahmardeh Behrooz, Eynollahi Pir & Rajaei, 2024).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

۲-۲ جمع‌آوری و تهیه داده‌ها

در این مطالعه داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مختلف شامل کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالیانه، تبخیر و تعرق مرجع، عمق لایه محدودکننده خاک، محتوای آب قابل‌دسترس گیاهی، ضریب تبخیر و تعرق گیاهی و نقشه زیرحوضه‌های منطقه مورداستفاده قرار گرفتند. نقشه کاربری اراضی با پردازش تصاویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI[1]) ماهواره لندست ۸ به شماره‌های ردیف ۳۸ و ۳۹ و گذر ۱۵۷ و ۱۵۸ در سال ۲۰۲۲ و طبقه‌بندی آن‌ها بر روش جنگل تصادفی در سامانه گوگل ارث انجین، تهیه گردید (Biswas, Jobaer, Haque, Shozib & Limon, 2023). میانگین بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق مرجع بر اساس داده‌های اقلیمی TerraClimate به دست آمده از سامانه گوگل ارث انجین و آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه شامل ایستگاه‌های زابل، بنجار، زهک، ادیمی، جزینک، ژاله‌ای، کوه‌خواجه، چرک، محمدآباد بولایی، محمدشاه‌کرم، شهرسوخته، شهرک‌گلخانی و تیمورآباد تهیه و نقشه‌سازی گردید (Solaimani & Ahmadi, 2024).

[1]. Operational Land Imager

اطلاعات خاک (شامل عمق لایه محدودکننده، رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک) نیز از داده‌های جهانی خاک در سامانه گوگل ارث انجین استخراج گردید (Rahmani, Mirghaed & Aghajanzadeh, 2023). محتوای آب قابل دسترس گیاهی بر اساس اطلاعات درصد رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک محاسبه و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی نیز بر اساس شاخص سطح برگ (LAI[1]) استخراج گردید (Sharp et al., 2014). نقشه زیرحوضه‌های منطقه نیز بر اساس مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از ابزار ArcHydro در نرم‌افزار ArcMap تهیه گردید.

۲-۳- مدل‌سازی تولید آب

اینوست (InVEST[2]) تولید آب (WY_x) را با استفاده از میانگین بارندگی سالانه (P_x)، تبخیر و تعرق واقعی (AET_x)، داده‌های تبخیر و تعرق مرجع (ET0)، محتوای آب قابل دسترس گیاه (PAWC[3])، ویژگی‌های خاکی - اقلیمی، محدودیت عمق ریشه‌یابی خاک و کاربری اراضی و بر مبنای فرضیه تعادل آب مطابق با معادله ۱ مدل‌سازی می‌کند (Sharp et al., 2014).

$$WY_x = \left(1 - \left(\frac{AET_x}{P_x}\right)\right) * P_x \qquad (۱)$$

بطوریکه WY_x، P_x و AET_x بر مبنای میلی‌متر بر سلول است. نسبت $\frac{AET_x}{P_x}$ برای هر کاربری بر اساس بیان منحنی Budyko معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - [1 + (\frac{PET_x}{P_x})^{\omega}]^{1/\omega} \qquad (۲)$$

که در آن PET_x بیانگر تبخیر و تعرق بالقوه و ω یک پارامتر تجربی بیانگر خصوصیات طبیعی آب‌وهوایی-خاکی است.

[1] . Leaf Area Index

[2] . Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

[3] . Plant Available Water Content

$$PET_x = k_c(l_x) \times ET_0 \quad (۳)$$

در معادله ۳، $ET0$ تبخیر و تعرق مرجع و $Kc\ (\ell x)$ ضریب تبخیر و تعرق گیاهی بر روی پیکسل x است. $PWAC$ اختلاف بین نقطه پژمردگی گیاه و ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد و مطابق با رابطه ۴ قابل‌محاسبه است.

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times SA\% - 0.003 \times (SA\%)^2 - 0.055 \times SI\% - 0.006 \times (SI\%)^2 - 0.738 \times CL\% + 0.007 \times (CL\%)^2 - 2.688 \times OM\% + 0.501 \times (OM\%)^2 \quad (۴)$$

که در آن $\%CL$، $\%SI$، $\%SA$ و $\%OM$ به ترتیب درصد محتوای رس، سیلت، ماسه و مواد آلی را نشان می‌دهند. مدل WY-InVEST بر اساس یک عامل فصلی (پارامتر Z) کالیبره می‌شود. پارامتر Z شاخصی تجربی و بیانگر ویژگی‌های هیدرولوژیک و بارندگی محلی است که بر اساس تعداد واقعی بارندگی در سال قابل محاسبه است (Sharp et al., 2014؛ Yang, Xie, Zhang & Tao, 2021).

۲-۴- تحلیل نقاط داغ تولید آب

نقاط داغ تولید آب در منطقه مطالعاتی با استفاده آنالیز نقاط داغ در محیط ArcGIS 10.5 تحلیل گردید. برای این منظور منطقه با استفاده از دستور شبکه‌بندیTessellation در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 زون‌بندی و میانگین تولید آب در هر زون با استفاده از دستور Extract استخراج گردید. سپس، ارزش‌های به دست آمده به‌عنوان ورودی آنالیز نقاط داغ در نظر گرفته شد (Mirghaed & Souri, 2022).

۲-۵- ارزیابی ارتباط بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین

در این مطالعه ارتباط بین تولید آب و کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین و با استفاده از روش رگرسیون وزنی مکانی (GWR[1]) در محیط ArcGIS 10.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. سنجه‌های

[1] Geographically Weighted Regression

سیمای سرزمین ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری ویژگی‌های لکه‌های سیمای سرزمین اعم از مساحت، محیط، شکل، اندازه، تراکم، پیوستگی، غالبیت و پیچیدگی به شمار می‌روند. با استفاده از سنجه‌ها می‌توان ساختار، تغییرات و خردشدگی سیمای سرزمین را توصیف کرد. در این مطالعه، سنجه‌های تراکم لکه (PD[1])، تعداد لکه (NP[2])، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI[3])، شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI[4]) و شاخص تراکم لبه (ED[5]) مورد ارزیابی قرار گرفتند. NP و PD به ترتیب تعداد و تراکم لکه‌های موجود در یک محدوده را بیان می‌کنند. سنجه LPI کل سیمای سرزمین را بر حسب بزرگ‌ترین لکه اندازه‌گیری می‌کند و ارزش آن بین ۱ تا ۱۰۰ متغیر است. سنجه LSI بیانگر شکل سیمای سرزمین است و هر چه ارزش آن بیشتر از یک باشد پیچیدگی بیشتر مرز سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. سنجه ED نسبت محیط به مساحت لکه‌ها را بر حسب متر در هکتار آشکار می‌سازد (McGarigal, Cushman, Neel & Ene, 2002). سنجه‌ها بر اساس نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی در نرم‌افزار Fragstats محاسبه شدند.

۳- نتایج و بحث

نقشه‌های کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالیانه، تبخیر و تعرق مرجع و محتوای آب قابل دسترس گیاهی در شکل ۲ ارائه شده‌اند. با صحت‌سنجی نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی بر اساس روش ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۹۴٪ و ۰/۹۱ محاسبه شدند که نشان‌دهنده اعتبار و صحت طبقه‌بندی بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که مساحت کاربری‌های مراتع، شوره‌زار، اراضی بایر، کشاورزی، ساخته‌شده‌ها و تالاب به ترتیب ۶۷۴۳۲۱، ۶۷۴۳۲۱، ۳۶۰۹۸۴، ۳۴۶۳۸۷،۲۵۴۰۴۶،۷۱۱۰ و ۲۹۸۴ هکتار بوده است که به ترتیب ۴۱٪، ۲۲٪، ۲۱٪، ۱۵٪، ۰/۴٪ و ۰/۲٪ از سطح منطقه را اشغال کرده‌اند. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نشان داد که میانگین بارندگی سالیانه در سیستان بین ۴۶ تا ۹۶ میلی‌متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان بارندگی در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی اتفاق می‌افتد. تبخیر و تعرق مرجع نیز در این منطقه بین

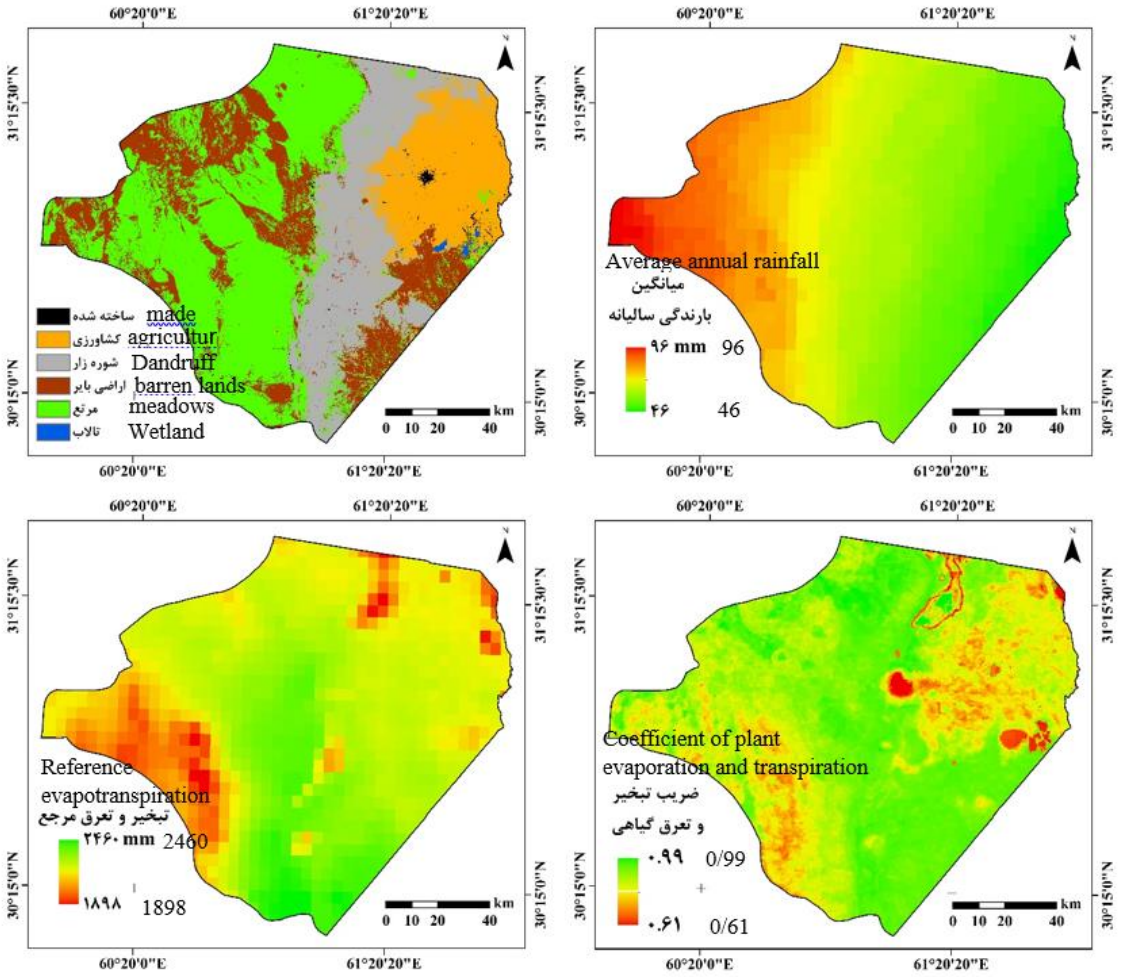
[1] Patch Density
[2] Number of patch
[3] Largest Patch Index
[4] Landscape Shape Index
[5] Edge Density

۱۸۹۷ تا ۲۳۶۰ میلی‌متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان آن در مناطق مرکزی و جنوب منطقه و کمترین میزان آن در بخش‌های غربی و شمالی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- نتایج صحت سنجی طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس ماتریس خطا

Table 1- Validation results of land use classification based on error matrix

کاربری **Usability**	اراضی بایر **Barren lands**	مراتع **Meadows**	شوره‌زار **Salt marshes**	کشاورزی **Agriculture**	ساخته شده **Made**	تالاب **Wetlands**	دقت تولید کننده (٪) **%Manufacturer accuracy**
اراضی بایر **Barren lands**	98	3	1	3	1	0	92
مراتع **Meadows**	2	107	2	2	1	1	93
شوره‌زار **Salt marshes**	2	1	95	2	1	0	94
کشاورزی **Agriculture**	2	1	1	110	2	1	94
ساخته شده **Made**	1	0	1	1	49	0	94
تالاب **Wetlands**	0	0	0	0	0	12	100
دقت کاربر (٪) **%User accuracy**	93	96	95	93	91	86	
ضریب کاپا= 0/92 Kappa coefficient				صحت کلی=94% Overall accuracy			



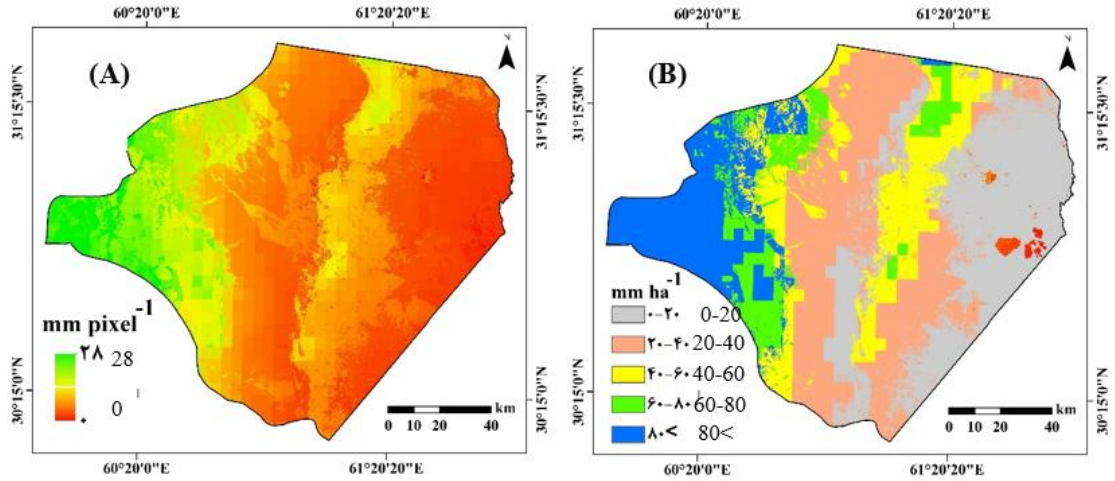
شکل ۲- نقشه‌های کاربری اراضی ((a، میانگین بارندگی سالیانه ((b، تبخیر و تعرق مرجع (c) و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی (d) منطقه مطالعاتی

Fig.2. Land use map(a), average annual precipitaton(b), reference evaporation and transpiration(c), and plant evaporation and transpiration coefficient(d) of the study area

با به‌کارگیری مدل اینوست، نقشه تولید آب منطقه مطالعاتی به دست آمد که نتایج آن در شکل ۳ مشخص شده است. میانگین، حداقل و حداکثر تولید آب در منطقه به ترتیب ۴/۳، ۰/۱ و ۲۸ میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) برآورد گردید. مجموع تولید سالیانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید. بیشترین میزان تولید آب در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده گردید. نقشه طبقه‌بندی شده تولید آب نیز در شکل ۳ و مساحت اختصاص‌یافته به

هر کلاس تولید آب نیز در جدول ۲ مشخص شده است. نتایج حاکی از آن بود که طبقات تولید آب خیلی کم (۰–۲۰)، کم (۲۰–۴۰)، متوسط (۴۰–۶۰)، زیاد (۶۰–۸۰) و خیلی زیاد (>۸۰ میلی‌متر در هکتار) به ترتیب در ۴۸۰۵۶۸، ۴۹۵۷۸۱، ۲۶۹۱۲۷، ۱۴۰۰۵۸ و ۲۴۶۹۲۴ هکتار از سطح منطقه توزیع شده است. بر این اساس، طبقات تولید آب کم (۲۰–۴۰) و زیاد (۶۰–۸۰ میلی‌متر در هکتار) بیشترین و کمترین مساحت منطقه (به ترتیب ۳۰ و ۹ درصد) را پوشش می‌دهند.

تولید آب بر اساس آنالیز نقاط داغ در سطوح اطمینان ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ تحلیل گردید که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخص گردید که نقاط داغ تولید آب در بخش‌های غربی و نقاط سرد در قسمت‌های شرقی منطقه واقع شده‌اند. مساحت اختصاص‌یافته به هر طبقه از نقاط داغ و سرد نیز در جدول ۳ آورده شده است. مشخص گردید که نقاط سرد تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ به ترتیب ۸۹۳۵۶، ۲۶۰۱۸۰ و ۱۳۱۱۵۷ هکتار را شامل می‌شوند. نقاط داغ تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ نیز به ترتیب ۲۴۶۵۲۴، ۶۹۷۷۵ و ۴۲۶۰۴ هکتار را دربرگرفته‌اند. به‌طورکلی، نقاط داغ و سرد تولید آب به ترتیب ۲۲ و ۲۹ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌دهند. میزان آب تولید شده در هر کاربری نیز محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که مجموع آب تولیدی در کاربری‌های اراضی بایر، مراتع، شوره‌زار، کشاورزی و ساخته‌شده‌ها به ترتیب ۲۲/۵، ۳۰/۱، ۱۵/۳، ۳/۲ و <۰/۰۳ میلیون مترمکعب در سال است که به ترتیب معادل ۶۵، ۴۵، ۴۲، ۱۳ و ۴ مترمکعب در هکتار در سال می‌باشد.



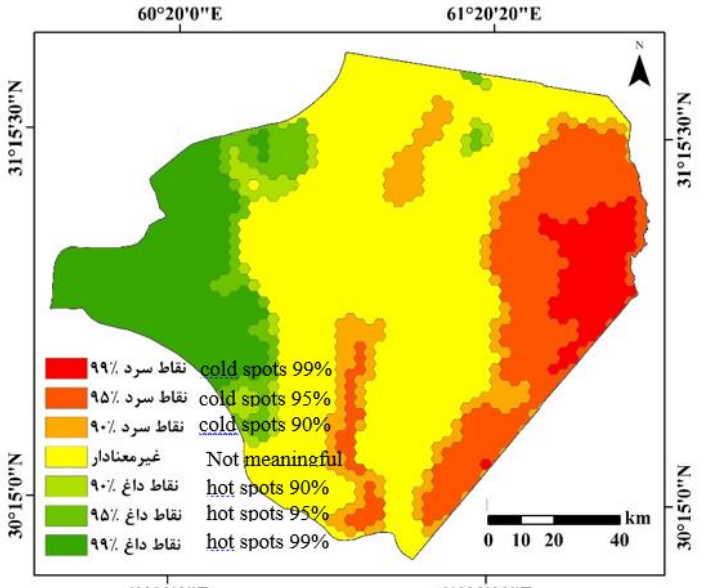
شکل ۳- نقشه‌های (A) تولید آب بر حسب میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) و (B) طبقات تولید آب بر حسب میلی‌متر در هکتار

Fig.3. A) Water production in mm per pixel (30x30 meters) and B) Water production classes in mm per hectare

جدول ۲- مساحت اختصاص یافته به طبقات تولید آب

Table 2- Area dedicated to water production floors

تولید آب **Water Production**	مساحت **Area**	
mm ha^{-1}	ha	%
0–20	480568	29
20–40	495781	30
40-60	269127	16
60-80	140058	9
80<	246924	15



شکل ٪

Fig.4. Map of hot and cold spots of water production at90%, 95% and 99% confidence level

جدول ۳- مساحت اختصاص‌یافته به طبقات نقاط داغ و سرد تولید آب

Table 3-The area allocated to the classes of hot and cold points of water production

طبقه **Floor**	سطح اطمینان **Confidence level**	مساحت **area**	
		ha	**%**
نقاط سرد Cold spots	99%	89356	5
نقاط سرد Cold spots	95%	260180	16
نقاط سرد Cold spots	90%	131157	8
بدون معناداری No Significance	....	806253	49
نقاط داغ Hot spots	99%	42604	3
نقاط داغ Hot spots	95%	69775	4
نقاط داغ Hot spots	90%	246524	15

ارتباط بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از روش GWR موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مشخص گردید که بین تولید آب با سنجه‌های تعداد لکه (NP)، تراکم لکه (PD)، شکل لکه (LSI)، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) و تراکم لبه (ED) همبستگی مکانی معناداری وجود دارد. میزان ضریب تبیین (R2) به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۷، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ محاسبه گردید.

جدول ۴- میزان آب تولیدی در کاربری‌های منطقه

Table 4- The amount of water produced in usage of the region

کاربری use	تولید آب Water production	
	1000 m^3	m^3 ha^{-1}
اراضی بایر Barren lands	22511	65
مراتع pastures	30070	45
شوره‌زار Salt fields	15324	42
کشاورزی Agriculture	3257	13
ساخته شده Made	29	4

جدول ۵- نتایج رگرسیون وزنی مکانی (GWR)

Table 5- Spatial Weighted Regression (GWR) results

آماره Statistics	NP	PD	ED	LPI	LSI
R2	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98
R2 adj.	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96
P-value	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<

نتایج پژوهش نشان داد که میزان تولید آب (به‌طور متوسط ۴۳ مترمکعب در هکتار) در منطقه با توجه به ویژگی‌های اکولوژیک حاکم بر آن نسبت به سایر مناطق در ایران پائین است. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) میزان تولید آب در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان را حدود ۸۵۷ مترمکعب در هکتار برآورد کردند. بخش‌های غربی منطقه نسبت به مناطق شرقی از تولید آب بیشتری برخوردار بودند. میزان بارش بیشتر و تبخیر و تعرق کمتر در بخش‌های غربی ازجمله دلایل تولید آب بیشتر

در این پهنه‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر این، وجود ساخت‌وسازها و فعالیت‌های کشاورزی عواملی مهم در راستای کاهش تولید آب در بخش‌های شرقی محسوب می‌شوند. نتایج مطالعه حاکی از آن بود که بیشترین میزان تولید آب در اراضی بایر (به‌طور میانگین ۶۵ مترمکعب در هکتار) اتفاق می‌افتد و در وهله بعد مراتع، شوره‌زارها و اراضی کشاورزی قرار می‌گیرند. کمترین میزان تولید آب نیز در ساخته‌شده‌ها (به‌طور میانگین ۴ مترمکعب در هکتار) مشاهده گردید. پائین بودن میزان تولید آب در کاربری ساخته‌شده‌ها نسبت به دیگر کاربری‌ها در منطقه مطالعاتی به این خاطر است که بخش اعظم کاربری مذکور در بخش‌های شرقی منطقه واقع شده است که میزان تولید آب در آن‌ها بسیار کم است. دیگران نتایج متفاوتی در رابطه با تولید آب در کاربری‌های مختلف به دست آوردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) دریافتند که در کاربری‌های ساخته‌شده، مراتع، جنگل‌ها و اراضی کشاورزی در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان به ترتیب میزان آب کمتری تولید می‌شود. یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نیز اذعان داشتند که میزان تولید آب در ساخته‌شده‌ها بیشتر و در جنگل‌ها کمتر رخ می‌دهد. تفاوت نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اثر کاربری اراضی بر تولید آب در اقلیم‌های مختلف متفاوت است به خاطر اینکه شرایط اقلیمی عامل اصلی تغییرات تولید آب به شمار می‌رود.

بررسی رابطه مکانی بین تولید آب با سنجه‌های سیمای سرزمین نیز نشان داد که ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین ازجمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها همبستگی بالایی با تولید آب دارند. این نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های کاربری اراضی و الگوی ساختاری سیمای سرزمین می‌تواند تولید آب را تحت تأثیر قرار دهد و شرایط حفظ و نگهداری آب قابل دسترس در منطقه را تغییر دهد. درواقع، تغییر ویژگی‌های سیماهای سرزمین بر خردشدگی زیستگاه‌ها و ازهم‌گسیختگی کاربری‌ها اثرگذار است و در پی آن نیز فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی به‌ویژه تولید آب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی نیز بر رابطه بین ویژگی‌های سیمای سرزمین و کاربری اراضی با تولید آب تأکید کردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) نیز تأیید کردند که تعداد، تراکم، شکل و مساحت لکه‌های سیمای سرزمین تعیین‌کننده خردشدگی زیستگاه‌های طبیعی است و با افزایش آن‌ها فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید

آب تغییر می‌کند. لی و همکاران (Li, Xu & Wang, 2023) اذعان داشتند که ویژگی‌های سیمای سرزمین ازجمله پیوستگی، بزرگی و جداشدگی لکه‌های سیمای سرزمین بر تولید رواناب اثرگذار است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل اینوست و بررسی رابطه آن با کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که در ۷۵ درصد از سطح منطقه سیستان میزان تولید آب کمتر از ۶۰ میلی‌متر در هکتار است. تولید سالانه آب در این منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین معادل ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید و با مقایسه آن نسبت به سایر مناطق ایران مشخص گردید که در این منطقه میزان تولید آب بسیار پائین است. شرایط اکولوژیک حاکم بر منطقه به‌ویژه شرایط اقلیمی باعث شده است که نقاط داغ تولید آب در پهنه‌های غربی و نقاط سرد آن در بخش‌های شرقی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین میزان تولید آب به ترتیب در اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها اتفاق می‌افتد و میانگین سالانه آن‌ها به ترتیب برابر ۶۵ و ۴ مترمکعب در هکتار تخمین زده شد. بعلاوه، نتایج پژوهش همبستگی مکانی معنادار بین تولید آب با ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین ازجمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها را محرز ساخت که نشان می‌دهد ویژگی‌های کاربری اراضی می‌تواند تولید آب در منطقه مطالعاتی را تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی آن مورداستفاده قرار گیرند.

References

Ahmadi-Mirghaed, F., & Souri, B. (2023). The Impact of Land Use Change on Water Yield in the Teraz Watershed, Khuzestan Province, Southwestern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(2), 29-46. [In Persian] https://doi.org/10.22067/GEOEH.2022.77944.1261

Amiri, S. N., Khoshravesh, M., & Valashedi, R. N. (2023). Assessing the effect of climate and land use changes on the hydrologic regimes in the upstream of Tajan river basin using SWAT model. *Applied Water Science*, *13*(6), 130. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01932-3

Belete, M., Deng, J., Wang, K., Zhou, M., Zhu, E., Shifaw, E., & Bayissa, Y. (2020). Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. *Science of the total environment*, *708*, 134834. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134834

Biswas, J., Jobaer, M. A., Haque, S. F., Shozib, M. S. I., & Limon, Z. A. (2023). Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, *387*(6630), 253-260. https://doi.org/10.1038/387253a0

Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, *593*, 125621. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621

De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, *41*(3), 393-408. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7

Guo, Q., Yu, C., Xu, Z., Yang, Y., & Wang, X. (2023). Impacts of climate and land-use changes on water yields: Similarities and differences among typical watersheds distributed throughout China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *45*, 101294. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101294

Izadi poor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Eynollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2024). Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87025.1468

Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. P*hysics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *101*, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003

Li, Z., Xu, X., & Wang, K. (2023). Effects of distribution patterns of karst landscapes on runoff and sediment yield in karst watersheds. *Catena, 223*, 106947. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106947

McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass. edu/landeco/research/fragstats/fragstats.*

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2003). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington DC: Island Press. https://www.wri.org/research/millennium-ecosystem-assessment-ecosystems-and-human-well being

Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Monitoring ecosystem services through land use change in a semiarid region: a case study of the Taluk watershed, southwestern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology, 19*(12), 12523-12536. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04490-4

Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering, 189*, 106898. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898

Pei, H., Liu, M., Shen, Y., Xu, K., Zhang, H., Li, Y., & Luo, J. (2022). Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Science of the Total Environment, 809*, 151153. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151153

Rahmani, M., Mirghaed, F. A., & Aghajanzadeh, S. M. (2023). The impact of seasonal vegetation changes on retention and yield of sediment across the Tajan watershed in Sari, northern Iran. *Sustainable Earth Trend, 3*(2), 26-35. https://doi.org/10.48308/ser.2023.233502.1022

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., & Vogl, A. L. (2014). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Solaimani, K., & Ahmadi, S. B. (2024). Evaluation of TerraClimate gridded data in investigating the changes of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 52*, 101678. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101678

Tijjani, S. B., Giri, S., & Woznicki, S. A. (2022). Quantifying the potential impacts of climate change on irrigation demand, crop yields, and green water scarcity in the New Jersey Coastal Plain. *Science of The Total Environment, 838*, 156538. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156538

Yang, J., Xie, B., Zhang, D., & Tao, W. (2021). Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, *80*(3), 72. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09277-9

Yifru, B. A., Chung, I. M., Kim, M. G., & Chang, S. W. (2021). Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *37*, 100926. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100926

Vol.13, No.4, Autumn 2024, pp.27-47 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88366.1491 Open access

Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region

Mohammad Amin Izadipoor[a*], Reza Dahmardeh Behrooz[b*], Fatemeh Einollahipeer[c], Fatemeh Rajaei[d]

[a]*MSc in 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.*

Received: 4 May 2024 ***Revised: 12 June 2024*** ***Accepted: 3 July 2024***

Extended Abstract

Introduction

Water yield represents a crucial productive ecosystem service susceptible to alteration due to variations in land use and land cover characteristics. In recent decades, ecosystem services have become an important and major issue in ecological studies and land management. They include goods and benefits that humans obtain directly or indirectly from nature. Ecosystem services are categorized into four groups: production**,** regulation**,** support, and cultural. Currently, the reduction and destruction of these services are recognized as critical environmental issues globally. In this regard, the Millennium Ecosystem Assessment has reported that about 60% of the identified ecosystem services are being destroyed, and if this process continues without proper management and planning, the impact will increase significantly over the next 50 years.

Material and Methods

This research was conducted to evaluate water yield in the Sistan region, southeastern Iran, and assess its spatial correlation with land use and land cover characteristics, with a particular focus on landscape metrics including patch density (PD), number of patches (NP), largest patch index (LPI), landscape shape index (LSI), and edge density (ED). The

*. Corresponding authors:
Mohammadamin Izadipoor Email: aminizadi7999@gmail.com Tel:+989915998391
Reza Dahmardeh Behroozb Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir Tel:+989155434532

How to cite this Article: Izadi poor, M. A. , dahmardeh behrooz, R. , eynollahi, F. , & rajaei, F. (2024). Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4) ,27-47.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

InVEST model was employed to evaluate water yield, and geographically weighted regression (GWR) in ArcGIS 10.5 was utilized to investigate the spatial correlation between water yield and landscape metrics. In this study, various data layers were used, including land use, average annual rainfall, reference evaporation and transpiration, depth of soil limiting layer, plant-accessible water content, plant evaporation and transpiration coefficient, and sub-basin map of the region. The area was zoned using the Tessellation Grid command in ArcGIS 10.5 software, and water production in each zone was extracted using the Extract command. The obtained values were then used as inputs for hot spot analysis.

Results and Discussion.

The results showed that in 75% of the Sistan region's land**,** the amount of water production is less than 60 mm per hectare. The total annual water yield in Sistan was estimated to be approximately 71 mm^3 (43 $m^3\ ha^{-1}$ on average). By comparing it to other regions of Iran, it was found that the amount of water production in this region is very low. The ecological and climatic conditions governing the region have caused the hot spots of water production to be located in the western areas and the cold spots in the eastern parts. The highest amount of water was yielded in the western areas, while the lowest was produced in the eastern parts. The highest and lowest water yield values were observed in barren and constructed lands, respectively, with values of 65 $m^3\ ha^{-1}$ and 4 $m^3\ ha^{-1}$. In addition, the results of the research found a significant spatial correlation between water production and different landscape features, including the number, density, size, and shape of spots, indicating that land use characteristics significantly affect water production in the study area. This study provides useful information regarding water production and its relationship with different land use characteristics, which can inform the development of strategies to preserve water resources.

Conclusion

The results of GWR analysis indicated a significant spatial correlation between water yield and the following landscape metrics: NP, PD, LPI, LSI, and ED ($0.95 < R^2 < 0.98$, p-value < 0.01), suggesting that land use characteristics influence the provision of water. This study provides valuable insights into the quantity of water yield and its correlation with various land use characteristics within the study area. These findings can inform the development of effective strategies to safeguard the region's water resources.

Keywords: Ecosystem Services, Water Yield, Landscape Metrics, InVEST Model, Geographically Weighted Regression (GWR).

جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٤۷-۲۷ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88366.1491 دسترسی آزاد

ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان

محمدامین ایزدی‌پور[۱] – دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

رضا دهمرده بهروز[۲] – دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه عین‌اللهی پیر – استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه رجائی – استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ **دریافت:** ۱٤۰۳/۲/۱۵ **تاریخ بازنگری:**۱٤۰۳/۳/۲۳ **تاریخ پذیرش:**۱٤۰۳/٤/۱۳

چکیده

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که تحت تأثیر ویژگی‌های کاربری اراضی تغییر می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان و ارزیابی همبستگی مکانی آن با ویژگی‌های کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های تراکم و تعداد لکه، بزرگ‌ترین لکه، شکل سیمای سرزمین و تراکم لبه انجام شد. مدل اینوست برای ارزیابی تولید آب و رگرسیون وزنی مکانی (GWR) برای بررسی همبستگی مکانی بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین استفاده شد. مجموع تولید سالیانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ٤۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید که بیشترین میزان آن در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده شد. اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها به ترتیب با ٦۵ و ٤ مترمکعب در هکتار دارای بیشترین و کمترین میزان تولید آب بودند. نتایج GWR مشخص کرد بین تولید آب با سنجه‌های موردنظر همبستگی مکانی معناداری وجود دارد (R2<0.98, p-value<0.01>۰.۹۵) که بیانگر اثر ویژگی‌های کاربری اراضی بر فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید آب است. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف کاربری‌های

۱- نویسنده مسئول: ۰۹۰۳۹۳۱۶۴۷۴ Email: aminizadi7999@gmail.com

[۲] – نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵٤۳٤۵۳۲ Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی مورداستفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: خدمات اکوسیستم، تولید آب، تولید آب، سنجه های سیمای سرزمین، مدل InVEST, رگرسیون وزنی جغرافیایی.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر خدمات اکوسیستمی به موضوعی مهم و محوری در مطالعات اکولوژیک و مدیریت سرزمین تبدیل شده است. خدمات اکوسیستمی شامل کالاها و منافعی است که انسان به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم از طبیعت به دست می‌آورد. خدمات اکوسیستمی در چهار گروه تولیدی، تنظیمی، حمایتی و فرهنگی دسته‌بندی شده‌اند (De Groot, Wilson & Boumans, 2002; Costanza et al., 1997). در حال حاضر کاهش و تخریب خدمات اکوسیستمی به‌عنوان یک مسئله محیط زیستی حیاتی در سطح جهان شناخته شده است. در این راستا، ارزیابی اکوسیستم هزاره گزارش داده است که حدود ٦۰ درصد از خدمات اکوسیستمی شناسایی شده در حال تخریب هستند و در صورت ادامه این روند بدون مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب تا ۵۰ سال آینده بیشتر هم خواهد شد (MEA, 2003).

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که میزان در دسترس بودن منابع آبی در یک حوضه آبخیز را بیان می‌کند و بر مبنای تفاوت بارش و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود (Belete et al., 2020; Yifru, Chung, Kim & Chang, 2021). خدمات اکوسیستمی تولید آب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از عوامل مختلف به‌ویژه اقلیم و کاربری اراضی هستند، هرچند باید بین اثر این دو عامل تمایز قائل شد. بعلاوه، فعالیت‌های کشاورزی و انسانی، توسعه شهرها، رشد جمعیت و پدیده گرمایش زمین باعث تغییرات اساسی در بارش و تبخیر تعرق می‌شوند که در پی آن به‌طور بالقوه کاهش تولید آب را سبب می‌شوند (Guo, Yu, Xu, Yang & Wang, 2023). بر این اساس، برای حفظ و تخصیص منطقی منابع آبی در مناطق مختلف نیاز است تولید آب با توجه به الگوی حاکم بر اکوسیستم‌های آن‌ها ارزیابی و کمی‌سازی شود.(Tijjani, Giri & Woznicki, 2022; Sharp et al., 2014; MEA, 2003).

در مطالعات گذشته اثرات کاربری اراضی بر تغییر تولید آب موردتوجه قرار گرفته است. گائو و همکاران (Guo et al., 2023) اثرات کاربری اراضی بر عملکرد آب در ۱۷ زیرحوضه در سراسر چین را با استفاده از مدل اینوست ارزیابی و تأیید کردند که با توجه به ویژگی‌های اقلیمی، جغرافیایی و اقتصادی-اجتماعی، واکنش تولید آب به تغییرات کاربری اراضی می‌تواند متفاوت باشد. امیری و همکاران (Amiri, Khoshravesh & Valashedi, 2023) با ارزیابی تأثیر کاربری اراضی بر رودخانه تجن در شمال ایران با استفاده از مدل سوات، تأیید کردند که تغییرات کاربری اراضی می‌تواند منجر به تنش آبی در منطقه مطالعاتی‌شان در دهه‌های آتی شود. میرقائد و سوری (Mirghaed & Souri, 2023) تولید آب در حوضه آبخیز رودخانه شور در جنوب غرب ایران را با استفاده از مدل اینوست شبیه‌سازی و رابطه آن را با تغییرات کاربری اراضی، خصوصیات خاک و شاخص‌های توپوگرافی مورد ارزیابی قرار دادند. پی و همکاران (Pei et al.,2022) تغییرات سالانه تولید آب و ارتباط آن با محرک‌های مختلف را در ۲۰ سال گذشته در منطقه‌ای در شمال چین مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند و اثرات گذشته، حال و آینده پوشش گیاهی مجدد را بر تولید آب ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات آب‌وهوا و کاربری زمین به ترتیب مسبب ۸۸٪ و ۱۲٪ از تغییرات تولید آب از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بودند. دانشی و همکاران (Daneshi et al., 2021) با استفاده از مدل اینوست عملکرد، تولید و مصرف آب در حوضه آبریز تجن در شمال ایران را شبیه‌سازی و اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر حفظ آب را بر اساس سناریوهای مختلفی بررسی نمودند.

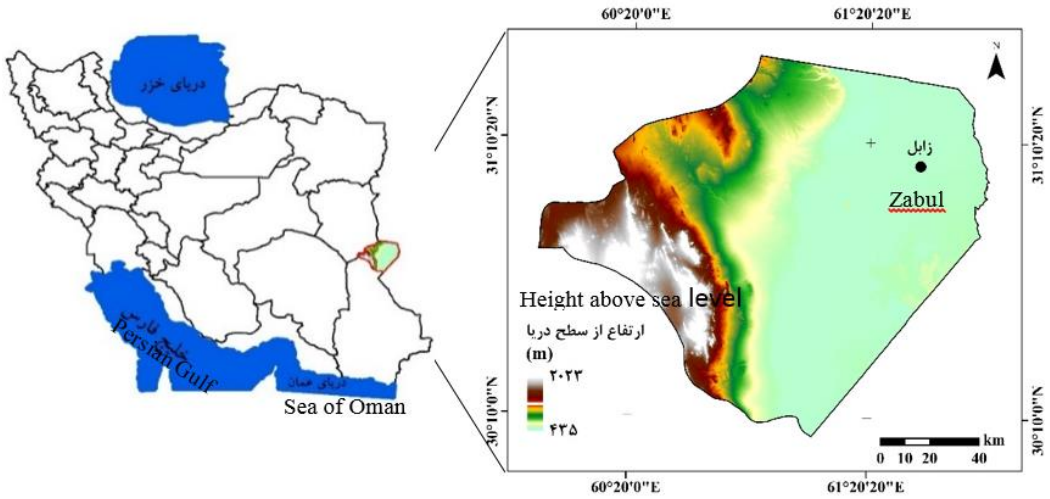
با وجود آنکه مطالعات مختلفی در رابطه با اثر کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستمی تولید آب انجام شده است اما این مسئله در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در ایران کمتر موردمطالعه قرار گرفته است. بعلاوه، اثر کاربری اراضی بر تولید آب با توجه به تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین نیز بندرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، وقوع مسائل مختلف محیط‌زیستی بخصوص مسائل مرتبط با آب در منطقه سیستان، ضرورت ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب به‌منظور کسب آگاهی و اطلاعات لازم برای اتخاذ راهبردهای مدیریتی مناسب و استفاده بهینه از منابع آبی و حفاظت اکوسیستم‌های آن را محرز ساخته است. ازاین‌رو، این پژوهش با توجه به اهداف زیر صورت پذیرفت: (الف) ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل تولید آب اینوست، (ب) تعیین نقاط داغ ارزیابی

خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه (ج) ارزیابی ارتباط بین کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی تولید آب بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه مطالعاتی.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

سیستان با مساحتی حدود ۱٦٤٥۹ کیلومترمربع در شمال استان سیستان و بلوچستان و شرق ایران واقع شده است. مختصات جغرافیایی منطقه شامل "۱۷ '٦ °۳۰ تا "۸ '۲۹ °۳۱ عرض شمالی و "۱٦ '٥٦ °٥۹ تا "۱۹ '٥۰ °٦۱ طول شرقی است. سیستان پنج شهرستان زابل، هامون، زهک، نیمروز و هیرمند را شامل می‌شود (شکل ۱). میانگین بارش و درجه حرارت سالانه این منطقه به ترتیب ٦٦ میلی‌متر و ۲۲ درجه سانتی‌گراد است و اقلیم آن در طبقه گرم و خشک آمبرژه قرار می‌گیرد. میانگین ارتفاع منطقه سیستان از سطح دریا حدود ٦۷۹ متر و متوسط شیب آن ٦ درصد برآورد شده است که نشان‌دهنده تغییرات کم توپوگرافی این منطقه می‌باشد. بخش‌های شرقی منطقه شامل دشت‌ها و مناطق مسطح است؛ درحالی‌که بخش‌های غربی آن دارای ارتفاعات بلندتر می‌باشد. کشاورزی و مرتع دو کاربری عمده در منطقه به شمار می‌روند که به ترتیب مناطق شرقی و غرب آن را دربرگرفته‌اند. رودخانه هیرمند تنها منبع آبی منطقه است که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد و درنهایت به تالاب هامون وارد می‌شود. تالاب و پناهگاه حیات‌وحش هامون به‌عنوان زیستگاه‌های گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی اهمیت اکولوژیک این منطقه را محرز ساخته است. منطقه سیستان از نظر جنبه‌های محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بسیار حائز اهمیت است. در دهه اخیر، وقوع و تداوم خشکسالی‌های متعدد، تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی و تأمین نشدن حقابه تالاب‌های منطقه، باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش منابع آب سطحی و خشک شدن قنات‌های آن شده است. به‌طوری‌که معیشت مردمان و حیات گیاهی و جانوری آن را با مشکلات جدی روبرو کرده است (Izadi poor, Dahmardeh Behrooz, Eynollahi Pir & Rajaei, 2024).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

۲-۲ جمع‌آوری و تهیه داده‌ها

در این مطالعه داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مختلف شامل کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالیانه، تبخیر و تعرق مرجع، عمق لایه محدودکننده خاک، محتوای آب قابل‌دسترس گیاهی، ضریب تبخیر و تعرق گیاهی و نقشه زیرحوضه‌های منطقه مورداستفاده قرار گرفتند. نقشه کاربری اراضی با پردازش تصاویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI[1]) ماهواره لندست ۸ به شماره‌های ردیف ۳۸ و ۳۹ و گذر ۱۵۷ و ۱۵۸ در سال ۲۰۲۲ و طبقه‌بندی آن‌ها بر روش جنگل تصادفی در سامانه گوگل ارث انجین، تهیه گردید (Biswas, Jobaer, Haque, Shozib & Limon, 2023). میانگین بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق مرجع بر اساس داده‌های اقلیمی TerraClimate به دست آمده از سامانه گوگل ارث انجین و آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه شامل ایستگاه‌های زابل، بنجار، زهک، ادیمی، جزینک، ژاله‌ای، کوه‌خواجه، چرک، محمدآباد بولایی، محمدشاه‌کرم، شهرسوخته، شهرک‌گلخانی و تیمورآباد تهیه و نقشه‌سازی گردید (Solaimani & Ahmadi, 2024).

[1]. Operational Land Imager

اطلاعات خاک (شامل عمق لایه محدودکننده، رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک) نیز از داده‌های جهانی خاک در سامانه گوگل ارث انجین استخراج گردید (Rahmani, Mirghaed & Aghajanzadeh, 2023). محتوای آب قابل دسترس گیاهی بر اساس اطلاعات درصد رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک محاسبه و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی نیز بر اساس شاخص سطح برگ (LAI[1]) استخراج گردید (Sharp et al., 2014). نقشه زیرحوضه‌های منطقه نیز بر اساس مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از ابزار ArcHydro در نرم‌افزار ArcMap تهیه گردید.

۲-۳- مدل‌سازی تولید آب

اینوست (InVEST[2]) تولید آب (WY_x) را با استفاده از میانگین بارندگی سالانه (P_x)، تبخیر و تعرق واقعی (AET_x)، داده‌های تبخیر و تعرق مرجع (ET0)، محتوای آب قابل دسترس گیاه (PAWC[3])، ویژگی‌های خاکی - اقلیمی، محدودیت عمق ریشه‌یابی خاک و کاربری اراضی و بر مبنای فرضیه تعادل آب مطابق با معادله ۱ مدل‌سازی می‌کند (Sharp et al., 2014).

$$WY_x = \left(1 - \left(\frac{AET_x}{P_x}\right)\right) * P_x \qquad (۱)$$

بطوریکه WY_x، P_x و AET_x بر مبنای میلی‌متر بر سلول است. نسبت $\frac{AET_x}{P_x}$ برای هر کاربری بر اساس بیان منحنی Budyko معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - [1 + (\frac{PET_x}{P_x})^{\omega}]^{1/\omega} \qquad (۲)$$

که در آن PET_x بیانگر تبخیر و تعرق بالقوه و ω یک پارامتر تجربی بیانگر خصوصیات طبیعی آب‌وهوایی-خاکی است.

[1] . Leaf Area Index

[2] . Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

[3] . Plant Available Water Content

$$PET_x = k_c(l_x) \times ET_0 \quad (۳)$$

در معادله ۳، $ET0$ تبخیر و تعرق مرجع و $Kc\ (\ell x)$ ضریب تبخیر و تعرق گیاهی بر روی پیکسل x است. $PWAC$ اختلاف بین نقطه پژمردگی گیاه و ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد و مطابق با رابطه ٤ قابل‌محاسبه است.

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times SA\% - 0.003 \times (SA\%)^2 - 0.055 \times SI\% - 0.006 \times (SI\%)^2 - 0.738 \times CL\% + 0.007 \times (CL\%)^2 - 2.688 \times OM\% + 0.501 \times (OM\%)^2 \quad (٤)$$

که در آن $\%CL$، $\%SI$، $\%SA$ و $\%OM$ به ترتیب درصد محتوای رس، سیلت، ماسه و مواد آلی را نشان می‌دهند. مدل WY-InVEST بر اساس یک عامل فصلی (پارامتر Z) کالیبره می‌شود. پارامتر Z شاخصی تجربی و بیانگر ویژگی‌های هیدرولوژیک و بارندگی محلی است که بر اساس تعداد واقعی بارندگی در سال قابل محاسبه است (Sharp et al., 2014؛ Yang, Xie, Zhang & Tao, 2021).

۲-٤- تحلیل نقاط داغ تولید آب

نقاط داغ تولید آب در منطقه مطالعاتی با استفاده آنالیز نقاط داغ در محیط ArcGIS 10.5 تحلیل گردید. برای این منظور منطقه با استفاده از دستور شبکه‌بندیTessellation در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 زون‌بندی و میانگین تولید آب در هر زون با استفاده از دستور Extract استخراج گردید. سپس، ارزش‌های به دست آمده به‌عنوان ورودی آنالیز نقاط داغ در نظر گرفته شد (Mirghaed & Souri, 2022).

۲-۵- ارزیابی ارتباط بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین

در این مطالعه ارتباط بین تولید آب و کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین و با استفاده از روش رگرسیون وزنی مکانی (GWR[1]) در محیط ArcGIS 10.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. سنجه‌های

[1] Geographically Weighted Regression

سیمای سرزمین ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری ویژگی‌های لکه‌های سیمای سرزمین اعم از مساحت، محیط، شکل، اندازه، تراکم، پیوستگی، غالبیت و پیچیدگی به شمار می‌روند. با استفاده از سنجه‌ها می‌توان ساختار، تغییرات و خردشدگی سیمای سرزمین را توصیف کرد. در این مطالعه، سنجه‌های تراکم لکه (PD[1])، تعداد لکه (NP[2])، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI[3])، شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI[4]) و شاخص تراکم لبه (ED[5]) مورد ارزیابی قرار گرفتند. NP و PD به ترتیب تعداد و تراکم لکه‌های موجود در یک محدوده را بیان می‌کنند. سنجه LPI کل سیمای سرزمین را بر حسب بزرگ‌ترین لکه اندازه‌گیری می‌کند و ارزش آن بین ۱ تا ۱۰۰ متغیر است. سنجه LSI بیانگر شکل سیمای سرزمین است و هر چه ارزش آن بیشتر از یک باشد پیچیدگی بیشتر مرز سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. سنجه ED نسبت محیط به مساحت لکه‌ها را بر حسب متر در هکتار آشکار می‌سازد (McGarigal, Cushman, Neel & Ene, 2002). سنجه‌ها بر اساس نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی در نرم‌افزار Fragstats محاسبه شدند.

۳- نتایج و بحث

نقشه‌های کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالیانه، تبخیر و تعرق مرجع و محتوای آب قابل دسترس گیاهی در شکل ۲ ارائه شده‌اند. با صحت‌سنجی نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی بر اساس روش ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۹٤٪ و ۰/۹۱ محاسبه شدند که نشان‌دهنده اعتبار و صحت طبقه‌بندی بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که مساحت کاربری‌های مراتع، شوره‌زار، اراضی بایر، کشاورزی، ساخته‌شده‌ها و تالاب به ترتیب ٦٧٤٣٢١، ٦٧٤٣٢١، ٣٦٠٩٨٤، ٣٤٦٣٨٧،٢٥٤٠٤٦،٧١١٠ و ۲۹۸٤ هکتار بوده است که به ترتیب ٤١٪، ۲۲٪، ۲۱٪، ۱۵٪، ۰/٤٪ و ۰/۲٪ از سطح منطقه را اشغال کرده‌اند. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نشان داد که میانگین بارندگی سالیانه در سیستان بین ٤٦ تا ۹٦ میلی‌متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان بارندگی در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی اتفاق می‌افتد. تبخیر و تعرق مرجع نیز در این منطقه بین

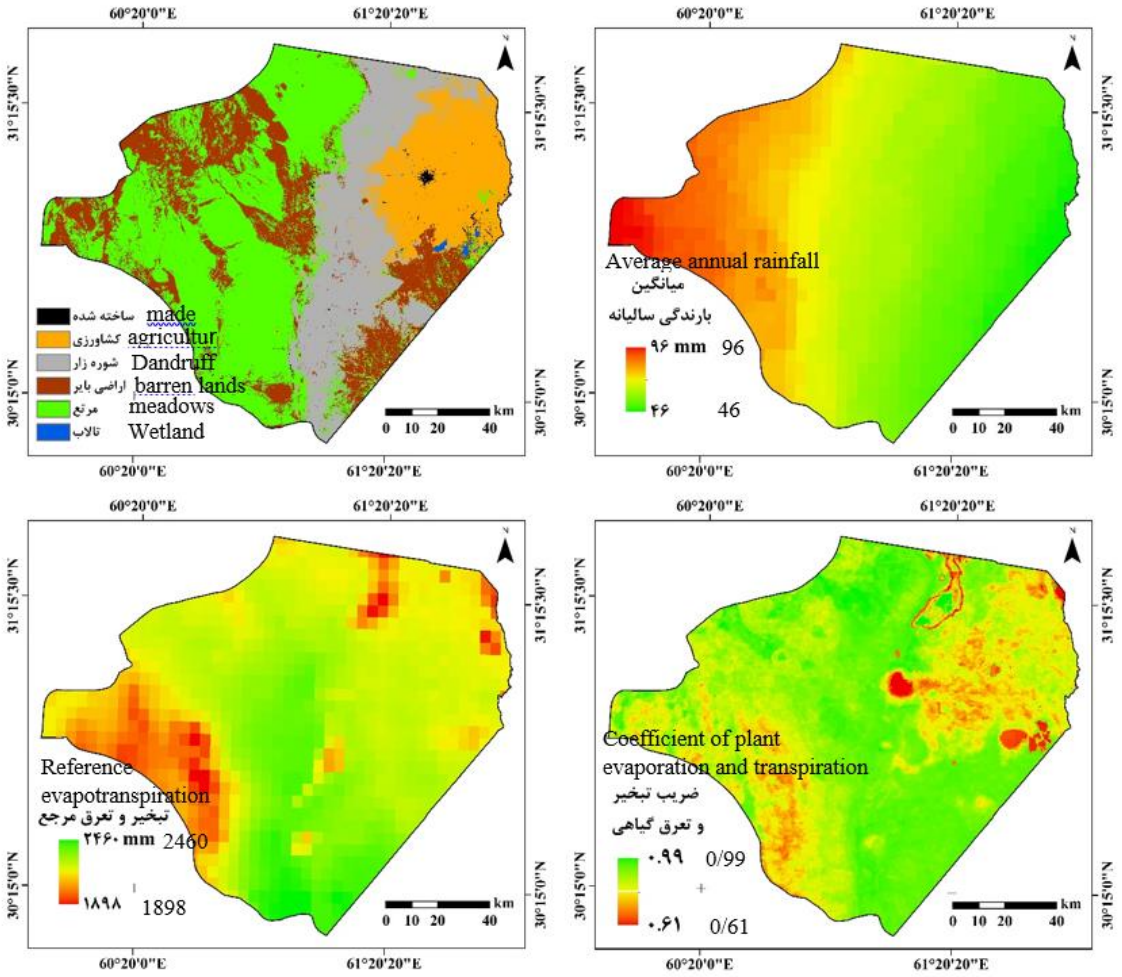
[1] Patch Density
[2] Number of patch
[3] Largest Patch Index
[4] Landscape Shape Index
[5] Edge Density

۱۸۹۷ تا ۲۳۶۰ میلی‌متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان آن در مناطق مرکزی و جنوب منطقه و کمترین میزان آن در بخش‌های غربی و شمالی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- نتایج صحت سنجی طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس ماتریس خطا

Table 1- Validation results of land use classification based on error matrix

کاربری **Usability**	اراضی بایر **Barren lands**	مراتع **Meadows**	شوره‌زار **Salt marshes**	کشاورزی **Agriculture**	ساخته شده **Made**	تالاب **Wetlands**	دقت تولید کننده (٪) **%Manufacturer accuracy**
اراضی بایر **Barren lands**	98	3	1	3	1	0	92
مراتع **Meadows**	2	107	2	2	1	1	93
شوره‌زار **Salt marshes**	2	1	95	2	1	0	94
کشاورزی **Agriculture**	2	1	1	110	2	1	94
ساخته شده **Made**	1	0	1	1	49	0	94
تالاب **Wetlands**	0	0	0	0	0	12	100
دقت کاربر (٪) **%User accuracy**	93	96	95	93	91	86	
	ضریب کاپا= 0/92 Kappa coefficient			صحت کلی=94% Overall accuracy			



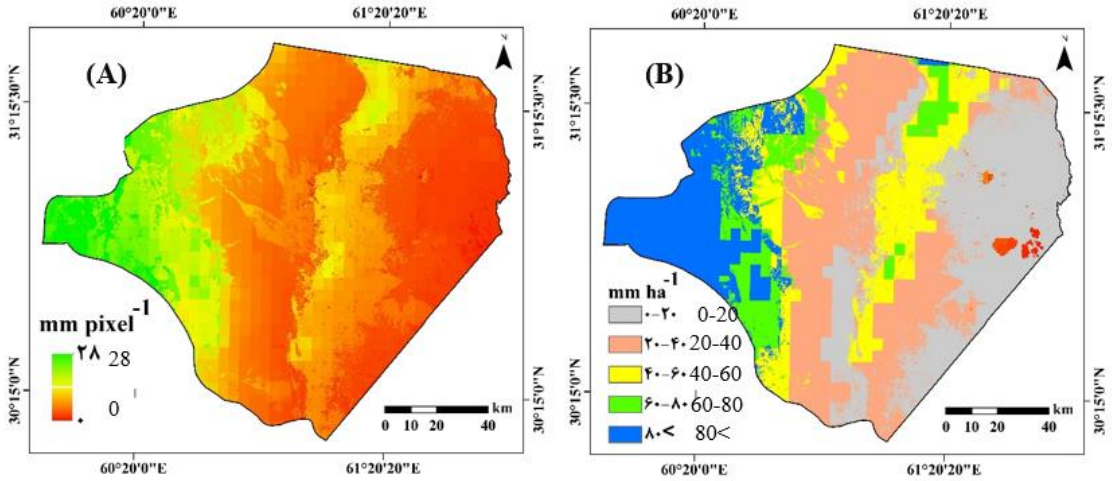
شکل ۲- نقشه‌های کاربری اراضی ((a)، میانگین بارندگی سالیانه ((b)، تبخیر و تعرق مرجع (c) و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی (d) منطقه مطالعاتی

Fig.2. Land use map(a), average annual precipitaton(b), reference evaporation and transpiration(c), and plant evaporation and transpiration coefficient(d) of the study area

با به‌کارگیری مدل اینوست، نقشه تولید آب منطقه مطالعاتی به دست آمد که نتایج آن در شکل ۳ مشخص شده است. میانگین، حداقل و حداکثر تولید آب در منطقه به ترتیب ٤/۳، ۰/۱ و ۲۸ میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) برآورد گردید. مجموع تولید سالیانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ٤۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید. بیشترین میزان تولید آب در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده گردید. نقشه طبقه‌بندی شده تولید آب نیز در شکل ۳ و مساحت اختصاص‌یافته به

هر کلاس تولید آب نیز در جدول ۲ مشخص شده است. نتایج حاکی از آن بود که طبقات تولید آب خیلی کم (۰-۲۰)، کم (۲۰-۴۰)، متوسط (۴۰-۶۰)، زیاد (۸۰-۶۰) و خیلی زیاد (>۸۰ میلی‌متر در هکتار) به ترتیب در ۴۸۰۵۶۸، ۴۹۵۷۸۱، ۲۶۹۱۲۷، ۱۴۰۰۵۸ و ۲۴۶۹۲۴ هکتار از سطح منطقه توزیع شده است. بر این اساس، طبقات تولید آب کم (۲۰-۴۰) و زیاد (۶۰-۸۰ میلی‌متر در هکتار) بیشترین و کمترین مساحت منطقه (به ترتیب ۳۰ و ۹ درصد) را پوشش می‌دهند.

تولید آب بر اساس آنالیز نقاط داغ در سطوح اطمینان ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ تحلیل گردید که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخص گردید که نقاط داغ تولید آب در بخش‌های غربی و نقاط سرد در قسمت‌های شرقی منطقه واقع شده‌اند. مساحت اختصاص‌یافته به هر طبقه از نقاط داغ و سرد نیز در جدول ۳ آورده شده است. مشخص گردید که نقاط سرد تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ به ترتیب ۸۹۳۵۶، ۲۶۰۱۸۰ و ۱۳۱۱۵۷ هکتار را شامل می‌شوند. نقاط داغ تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ نیز به ترتیب ۲۴۶۵۲۴، ۶۹۷۷۵ و ۴۲۶۰۴ هکتار را دربرگرفته‌اند. به‌طورکلی، نقاط داغ و سرد تولید آب به ترتیب ۲۲ و ۲۹ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌دهند. میزان آب تولید شده در هر کاربری نیز محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که مجموع آب تولیدی در کاربری‌های اراضی بایر، مراتع، شوره‌زار، کشاورزی و ساخته‌شده‌ها به ترتیب ۲۲/۵، ۳۰/۱، ۱۵/۳، ۳/۲ و <۰/۰۳ میلیون مترمکعب در سال است که به ترتیب معادل ۶۵، ۴۵، ۴۲، ۱۳ و ۴ مترمکعب در هکتار در سال می‌باشد.



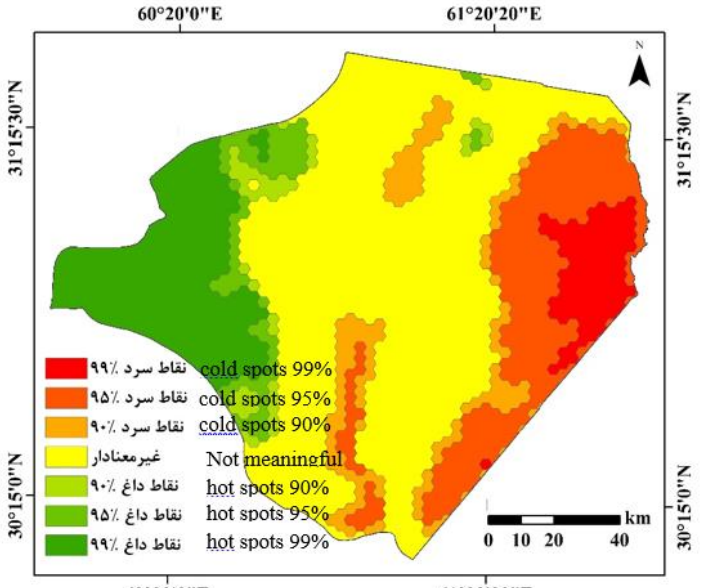
شکل ۳- نقشه‌های (A) تولید آب بر حسب میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) و (B) طبقات تولید آب بر حسب میلی‌متر در هکتار

Fig.3. A) Water production in mm per pixel (30x30 meters) and B) Water production classes in mm per hectare

جدول ۲- مساحت اختصاص یافته به طبقات تولید آب

Table 2- Area dedicated to water production floors

تولید آب **Water Production**	مساحت **Area**	
mm ha^{-1}	ha	%
0–20	480568	29
20–40	495781	30
40-60	269127	16
60-80	140058	9
80<	246924	15



شکل ٪

Fig.4. Map of hot and cold spots of water production at90%, 95% and 99% confidence level

جدول ۳- مساحت اختصاص‌یافته به طبقات نقاط داغ و سرد تولید آب

Table 3-The area allocated to the classes of hot and cold points of water production

طبقه **Floor**	سطح اطمینان **Confidence level**	مساحت **area**	
		ha	**%**
نقاط سرد Cold spots	99%	89356	5
نقاط سرد Cold spots	95%	260180	16
نقاط سرد Cold spots	90%	131157	8
بدون معناداری No Significance	....	806253	49
نقاط داغ Hot spots	99%	42604	3
نقاط داغ Hot spots	95%	69775	4
نقاط داغ Hot spots	90%	246524	15

ارتباط بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از روش GWR موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مشخص گردید که بین تولید آب با سنجه‌های تعداد لکه (NP)، تراکم لکه (PD)، شکل لکه (LSI)، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) و تراکم لبه (ED) همبستگی مکانی معناداری وجود دارد. میزان ضریب تبیین (R2) به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۷، ۰/۹٦ و ۰/۹۸ محاسبه گردید.

جدول ٤- میزان آب تولیدی در کاربری‌های منطقه

Table 4- The amount of water produced in usage of the region

کاربری use	تولید آب Water production	
	1000 m^3	m^3 ha^{-1}
اراضی بایر Barren lands	22511	65
مراتع pastures	30070	45
شوره‌زار Salt fields	15324	42
کشاورزی Agriculture	3257	13
ساخته شده Made	29	4

جدول ۵- نتایج رگرسیون وزنی مکانی (GWR)

Table 5- Spatial Weighted Regression (GWR) results

آماره Statistics	NP	PD	ED	LPI	LSI
R2	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98
R2 adj.	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96
P-value	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<

نتایج پژوهش نشان داد که میزان تولید آب (به‌طور متوسط ٤۳ مترمکعب در هکتار) در منطقه با توجه به ویژگی‌های اکولوژیک حاکم بر آن نسبت به سایر مناطق در ایران پائین است. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) میزان تولید آب در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان را حدود ۸۵۷ مترمکعب در هکتار برآورد کردند. بخش‌های غربی منطقه نسبت به مناطق شرقی از تولید آب بیشتری برخوردار بودند. میزان بارش بیشتر و تبخیر و تعرق کمتر در بخش‌های غربی ازجمله دلایل تولید آب بیشتر

در این پهنه‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر این، وجود ساخت‌وسازها و فعالیت‌های کشاورزی عواملی مهم در راستای کاهش تولید آب در بخش‌های شرقی محسوب می‌شوند. نتایج مطالعه حاکی از آن بود که بیشترین میزان تولید آب در اراضی بایر (به‌طور میانگین ٦٥ مترمکعب در هکتار) اتفاق می‌افتد و در وهله بعد مراتع، شوره‌زارها و اراضی کشاورزی قرار می‌گیرند. کمترین میزان تولید آب نیز در ساخته‌شده‌ها (به‌طور میانگین ٤ مترمکعب در هکتار) مشاهده گردید. پائین بودن میزان تولید آب در کاربری ساخته‌شده‌ها نسبت به دیگر کاربری‌ها در منطقه مطالعاتی به این خاطر است که بخش اعظم کاربری مذکور در بخش‌های شرقی منطقه واقع شده است که میزان تولید آب در آن‌ها بسیار کم است. دیگران نتایج متفاوتی در رابطه با تولید آب در کاربری‌های مختلف به دست آوردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) دریافتند که در کاربری‌های ساخته‌شده، مراتع، جنگل‌ها و اراضی کشاورزی در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان به ترتیب میزان آب کمتری تولید می‌شود. یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نیز اذعان داشتند که میزان تولید آب در ساخته‌شده‌ها بیشتر و در جنگل‌ها کمتر رخ می‌دهد. تفاوت نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اثر کاربری اراضی بر تولید آب در اقلیم‌های مختلف متفاوت است به خاطر اینکه شرایط اقلیمی عامل اصلی تغییرات تولید آب به شمار می‌رود.

بررسی رابطه مکانی بین تولید آب با سنجه‌های سیمای سرزمین نیز نشان داد که ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین ازجمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها همبستگی بالایی با تولید آب دارند. این نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های کاربری اراضی و الگوی ساختاری سیمای سرزمین می‌تواند تولید آب را تحت تأثیر قرار دهد و شرایط حفظ و نگهداری آب قابل دسترس در منطقه را تغییر دهد. درواقع، تغییر ویژگی‌های سیماهای سرزمین بر خردشدگی زیستگاه‌ها و ازهم‌گسیختگی کاربری‌ها اثرگذار است و در پی آن نیز فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی به‌ویژه تولید آب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی نیز بر رابطه بین ویژگی‌های سیمای سرزمین و کاربری اراضی با تولید آب تأکید کردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) نیز تأیید کردند که تعداد، تراکم، شکل و مساحت لکه‌های سیمای سرزمین تعیین‌کننده خردشدگی زیستگاه‌های طبیعی است و با افزایش آن‌ها فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید

آب تغییر می‌کند. لی و همکاران (Li, Xu & Wang, 2023) اذعان داشتند که ویژگی‌های سیمای سرزمین ازجمله پیوستگی، بزرگی و جداشدگی لکه‌های سیمای سرزمین بر تولید رواناب اثرگذار است.

٤- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل اینوست و بررسی رابطه آن با کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که در ۷۵ درصد از سطح منطقه سیستان میزان تولید آب کمتر از ٦۰ میلی‌متر در هکتار است. تولید سالانه آب در این منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین معادل ٤۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید و با مقایسه آن نسبت به سایر مناطق ایران مشخص گردید که در این منطقه میزان تولید آب بسیار پائین است. شرایط اکولوژیک حاکم بر منطقه به‌ویژه شرایط اقلیمی باعث شده است که نقاط داغ تولید آب در پهنه‌های غربی و نقاط سرد آن در بخش‌های شرقی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین میزان تولید آب به ترتیب در اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها اتفاق می‌افتد و میانگین سالانه آن‌ها به ترتیب برابر ٦٥ و ٤ مترمکعب در هکتار تخمین زده شد. بعلاوه، نتایج پژوهش همبستگی مکانی معنادار بین تولید آب با ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین ازجمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها را محرز ساخت که نشان می‌دهد ویژگی‌های کاربری اراضی می‌تواند تولید آب در منطقه مطالعاتی را تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی آن مورداستفاده قرار گیرند.

References

Ahmadi-Mirghaed, F., & Souri, B. (2023). The Impact of Land Use Change on Water Yield in the Teraz Watershed, Khuzestan Province, Southwestern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(2), 29-46. [In Persian] https://doi.org/10.22067/GEOEH.2022.77944.1261

Amiri, S. N., Khoshravesh, M., & Valashedi, R. N. (2023). Assessing the effect of climate and land use changes on the hydrologic regimes in the upstream of Tajan river basin using SWAT model. *Applied Water Science*, *13*(6), 130. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01932-3

Belete, M., Deng, J., Wang, K., Zhou, M., Zhu, E., Shifaw, E., & Bayissa, Y. (2020). Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. *Science of the total environment*, *708*, 134834. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134834

Biswas, J., Jobaer, M. A., Haque, S. F., Shozib, M. S. I., & Limon, Z. A. (2023). Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, *387*(6630), 253-260. https://doi.org/10.1038/387253a0

Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, *593*, 125621. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621

De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, *41*(3), 393-408. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7

Guo, Q., Yu, C., Xu, Z., Yang, Y., & Wang, X. (2023). Impacts of climate and land-use changes on water yields: Similarities and differences among typical watersheds distributed throughout China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *45*, 101294. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101294

Izadi poor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Eynollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2024). Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87025.1468

Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. P*hysics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *101*, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003

Li, Z., Xu, X., & Wang, K. (2023). Effects of distribution patterns of karst landscapes on runoff and sediment yield in karst watersheds. *Catena, 223*, 106947. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106947

McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass. edu/landeco/research/fragstats/fragstats.*

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2003). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington DC: Island Press. https://www.wri.org/research/millennium-ecosystem-assessment-ecosystems-and-human-well being

Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Monitoring ecosystem services through land use change in a semiarid region: a case study of the Taluk watershed, southwestern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(12), 12523-12536. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04490-4

Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering, 189*, 106898. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898

Pei, H., Liu, M., Shen, Y., Xu, K., Zhang, H., Li, Y., & Luo, J. (2022). Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Science of the Total Environment, 809*, 151153. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151153

Rahmani, M., Mirghaed, F. A., & Aghajanzadeh, S. M. (2023). The impact of seasonal vegetation changes on retention and yield of sediment across the Tajan watershed in Sari, northern Iran. *Sustainable Earth Trend, 3*(2), 26-35. https://doi.org/10.48308/ser.2023.233502.1022

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., & Vogl, A. L. (2014). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Solaimani, K., & Ahmadi, S. B. (2024). Evaluation of TerraClimate gridded data in investigating the changes of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 52*, 101678. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101678

Tijjani, S. B., Giri, S., & Woznicki, S. A. (2022). Quantifying the potential impacts of climate change on irrigation demand, crop yields, and green water scarcity in the New Jersey Coastal Plain. *Science of The Total Environment, 838*, 156538. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156538

Yang, J., Xie, B., Zhang, D., & Tao, W. (2021). Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, *80*(3), 72. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09277-9

Yifru, B. A., Chung, I. M., Kim, M. G., & Chang, S. W. (2021). Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *37*, 100926. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100926

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.48-73 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.75157.1171 Open access

Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

Maryam Bayati Khatibi[a*], Ruhullah Mohammadzadeh[b] , Sadra Karimzadeh[c]

[a]*Professor in Geomorphology, Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences, University of Tabriz ,Tabriz,Iran.*
[b]*M.S.Student in RS & GIS , Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences. University of Tabriz ,Tabriz,Iran.*
[c]*Assistant Professor in RS & GIS . Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences, University of Tabriz ,Tabriz ,Iran.*

Received: 27 March 2024 ***Revised: 11 June 2024*** ***Accepted: 15 June 2024***

Extended Abstarct

Introduction

Salmas Plain is one of the important agricultural regions of West Azerbaijan province, playing a significant role in the region's agriculture and development. In recent decades, the plain has been severely impacted by the phenomenon of subsidence due to the over-extraction of groundwater from aquifers. Therefore, identifying areas prone to subsidence in the Salmas Plain is of particular importance for the management and control of this phenomenon. In this study, a fuzzy neural inference system model was used to predict subsidence-prone areas. To achieve this goal, seven important factors contributing to subsidence in the region were analyzed: land slope, digital elevation model, vegetation, groundwater depth, distance from roads, distance from rivers, and distance from piezometric wells. The information related to these factors was collected in ArcGIS software and transferred to MATLAB software for model implementation. Using the C-fold CV method, the data were randomly divided into three groups: 70% for training, 20% for testing, and 10% for validation. These data were introduced to MATLAB for training, testing, and validation. The data were accurately trained and validated, achieving a precision of 10^{-8}. Several different membership functions, including trapezoidal, triangular, Gaussian, two-sided Gaussian, and bell

* . Corresponding author: Maryam Bayati Khatibi Email:m_bayati@tabrizu.ac.ir Tel:+989144159421

How to cite this Article: Bayati khatibi, M. , Mohammadzadeh, R. , & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4) ,48-73

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

curve functions, were tested in the model. The results showed that the trapezoidal membership function, with a regression correlation coefficient of 0.86, and the Gaussian membership function, with a regression correlation coefficient of 0.81, performed best in identifying areas prone to subsidence.

Based on the results, the eastern areas and the outlet of the plain have experienced significant drops in groundwater levels and subsidence. Statistical studies also revealed that groundwater levels have dropped by over 18 meters, averaging 1.23 meters per year in recent years. The crisis has been exacerbated over the past two decades by over-extraction of groundwater for agriculture, combined with a storage-to-recharge ratio of 0.03% and unfavorable climatic conditions. The spatial pattern of land subsidence in Iran indicates that this phenomenon is strongly linked to the uncontrolled abstraction of groundwater resources, driven by increasing urban water consumption and low agricultural water efficiency. Drought conditions and excessive groundwater withdrawal have not only affected arid and central regions of the country but have also extended to semi-arid and humid areas in the northwest. Geological experts have reported that 300 out of 600 plains in the country are affected by subsidence. Due to the importance of this issue, many researchers have studied land subsidence. Their results indicate that the Salmas Plain, as part of the Lake Urmia catchment area, is experiencing a major subsidence crisis. This crisis has caused significant problems for infrastructure in many parts of the Salmas Plain, especially in the Qara Gheshlagh region. The main cause of subsidence is the over-extraction of water from wells constructed for agricultural purposes, which has led to a steady decline in the volume of aquifers.

Material and Methods

To evaluate the susceptibility of the Salmas Plain to subsidence, the required data and statistics up to 2019 (1398 in the Iranian calendar) were collected as follows:

- Digital topographic maps (1:25,000 scale), a digital geological map (1:100,000 scale) of Salmas city, and thematic maps (e.g., slope, land use, geology, distance from wells, groundwater depth, distance from rivers, and distance from faults).
- GPS data, meteorological information, soil maps, and aerial photographs (1:20,000 scale).
- Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 30 x 30 meters.
  In this study, seven criteria were analyzed: vegetation type, groundwater depth, distance from roads, distance from rivers, distance from piezometric wells, digital elevation model, and slope. All criteria were first standardized in ArcGIS software and converted into an 800 x 800-meter grid. The data from each grid were then compiled into a matrix and transferred to MATLAB for analysis using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model.
  To ensure accurate modeling, the satellite data were divided into three parts: 70% for training, 20% for testing, and 10% for validation. This process ensured precise measurement of modeling accuracy and error rates using MATLAB software.

Results and Discussion

Studies revealed that over the past 41 years, groundwater levels in the Salmas Plain have dropped by 18 meters, averaging 1.23 meters per year from 2014 to 2015 (93-94 in the Iranian calendar). The plain, characterized by clay and silty layers, has experienced significant aquifer compression and reduced porosity due to over-extraction of

groundwater. This has resulted in land subsidence across the study area. The model results demonstrated that trapezoidal and triangular membership functions performed best, achieving error coefficients of 10^{-7} and 10^{-8}, with mean error rates of 0.18 and 0.20, respectively. The regression correlation coefficients were 0.86 and 0.80, confirming the model's accuracy in identifying areas of high subsidence sensitivity. Approximately 8.9 and 6.3 square kilometers of the plain were classified as very high-risk areas, while 1.8 and 3.2 square kilometers were classified as high-risk zones. These findings indicate that the proposed model can effectively predict subsidence with high accuracy and reliability.
Furthermore, the results highlight that over-extraction of groundwater has caused aquifer compaction and subsidence. Linear regression analysis confirmed the model's accuracy, with a correlation coefficient of 0.86.

Conclusion
The Salmas Plain is a vital agricultural region where groundwater serves as the primary water source. Over 70% of extracted groundwater is used for agriculture. Irregular groundwater extraction and reduced rainfall have significantly lowered groundwater levels, exacerbating subsidence in the plain. Since 1993, the annual water table drop has increased to 1.23 meters. The fuzzy neural inference system model demonstrated that trapezoidal and triangular membership functions with regression correlations of 0.86 and 0.81 provided reliable results, predicting subsidence-prone areas effectively. The findings suggest that 8.6% and 6.3% of the study area are at very high risk of subsidence. Immediate measures are required to control groundwater extraction and manage the subsidence crisis in the Salmas Plain.

Key Words: Land Subsidence, Groundwater Depletion, ANFIS Model, Salmas Plain, West Azerbaijan

How to cite this Article: Bayati khatibi, M. , Mohammadzadeh, R. , & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4) ,48-73


©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۷۳-۴۸ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد DOI: 10.22067/geoeh.2024.75157.1171 مقاله پژوهشی

مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت سلماس (آذربایجان‌غربی) با استفاده از ANFIS

مریم بیاتی خطیبی[۱]– استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

روح‌الله محمد زاده – دانش‌آموخته سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

صدرا کریم زاده– استادیار سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ **دریافت:**۱۴۰۳/۱/۸ **تاریخ بازنگری:**۱۴۰۳/۳/۲۲ **تاریخ پذیرش:**۱۴۰۳/۳/۲۶

چکیده

دشت سلماس از محدوده‌های مهم کشاورزی شمال غرب کشور و استان آذربایجان غربی، محسوب می‌شود. این دشت در دهه‌های اخیر، به لحاظ برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی دچار بحران شدید فرونشست زمین شده است. شناسایی مناطق مستعد فرونشست در محدوده دشت سلماس، از دیدگاه شناخت علت وقوع، مدیریت و کنترل پدیده فرونشست و همچنین جلوگیری از فرسایش خاک، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، با هدف بررسی علل و ابعاد فرونشست زمین و همچنین پیش‌بینی مناطق مستعد به فرونشست، از مدل سیستم استنتاج عصبی فازی و برای رسیدن به هدف، از هفت عامل تأثیرگذار در پدیده فرونشست دشت (شامل: شیب زمین، ارتفاع، پوشش گیاهی، آب‌های زیرزمینی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و فاصله از چاه‌های پیزومتری) استفاده شد. در روند تحقیق، اطلاعات جمع‌آوری شده به محیط ArcGis وارد و برای پیاده‌سازی مدل به نرم‌افزار متلب منتقل گردیدند و با استفاده از روش C-flodCV داده‌ها با دقت 10^{-8} آموزش و اعتبار سنجی شدند. داده‌ها در چند تابع عضویت مختلف، شامل توابع عضویت ذوزنقه‌ای، مثلثی، گوسی، گوسی دو طرفه و تابع زنگوله‌ای مدل‌سازی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد تابع عضویت ذوزنقه‌ای با ضریب همبستگی رگرسیون ۰.۸۶ و تابع عضویت گوسی با ضریب همبستگی رگرسیون ۰.۸۱ بهترین عملکرد را در شناسایی مناطق مستعد فرونشست دارند. با توجه به نتایج مطالعات در دشت سلماس، می‌توان گفت در طی سال‌های موردبررسی، مناطق شرقی و خروجی دشت با افت زیاد آب‌های

[۱] .نویسنده مسئول : ۰۹۱۴۴۱۵۹۴۲۱

Email:m_bayati@tabrizu.ac.ir

زیرزمینی و متعاقب آن با پدیده فرونشست مواجه شده‌اند. همچنین بررسی‌های آماری نشان داد در بازه زمانی موردبررسی، آب‌های زیرزمینی در کل بیش از ۱۸ متر افت سطح ایستابی داشته‌اند و این افت به‌طور متوسط در هر سال ۱.۲۳ متر گزارش شده است. در دو دهه گذشته، با محاسبه ضریب ذخیره یا تغذیه ۰.۰۳ درصدی و شرایط خشکی اقلیمی و افزایش سطح زیر کشت، این بحران در سال‌های اخیر به‌شدت تشدید شده است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، افت سطح آب زیرزمینی، مدل ANFIS, دشت سلماس، آذربایجان غربی.

۱- مقدمه

پدیده فرونشست زمین از پیامدهای مدیریت نامناسب آب و زمین در محدوده‌های کم آب محسوب می‌شود. در کشورهایی مانند ایران که بهره‌برداری از منابع زمین بدون در نظر گرفتن توان‌های اکولوژیکی صورت می‌گیرد، در چنین محدوده‌هایی، مهم‌ترین واکنش زمین به تخلیه بی‌رویه آب‌های زیرزمینی فرونشست زمین است. با توجه پیامدهای خطرناک این پدیده از آن به‌عنوان مخاطره یاد می‌شود. امروزه، بر خلاف گذشته که مخاطرات ناشی از مدیریت نادرست آب که غیرقابل‌پیش‌بینی و پیشگیری متصور می‌شد، می‌توان با درک به‌موقع از میزان افت آب‌های زیرزمینی، خطر فرونشست زمین و روند رو به بحران را کاملاً پیش‌بینی نمود. فرونشست زمین هرچند که گاه یک پدیده زمین‌شناسی ناشی از دخالت عوامل طبیعی یا گاه یک پدیده رخداده ناشی از دخالت فعالیت‌های انسانی است، اما وقتی در اثر این پدیده، خاک قابل‌کشت و یا زمین در محدوده‌های سکونتگاهی مورد هدف قرار می‌گیرند، از مخاطرات جدی محسوب می‌شوند (Galloway et al., 1998). فرونشست طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده امریکا[1] شامل پایین رفتن یا نشست روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند با جابجایی افقی اندکی همراه باشد (Amelung, Galloway, Bell, Zebker & Laczniak, 1999; Ganguli, 2011, Zarei, Rasoulzadeh, Seddighi, Ahmadzadeh & Ramezani, 2020). عوامل مؤثر در وقوع این پدیده مختلف و متعدد هستند که برخی از این عوامل، می‌تواند شامل زمین‌لرزه‌ها و حرکت پوسته زمین، ذوب یخچال‌های طبیعی، فعالیت‌های انسانی و البته، استحصال بی‌رویه از منابع زیرزمینی باشد (Dehghani, Rastegarfar, Ashrafi, Ghazipour &

[1] The United States Geological Survey

(Khorramrooz, 2014). بیش از ۸۰٪ از علت فرونشست‌ها در دنیا و ایران، ناشی از استحصال بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است (Galloway et al., 1998).

پدیده فرونشست می‌تواند اثرات مورفولوژیکی سطحی بی‌شماری مانند، بی‌نظمی‌های مورفولوژیک، خسارت به تأسیسات انسان‌ساخت، باند فرودگاهی، شبکه‌های آب‌رسانی بخش کشاورزی و کاهش حجم آبخوان‌ها (Chen, Wang, Hsu, Yu & Kuo, 2010; Burbey, 2002; Lashkaripour, Ghafoori & Rostami Barani, 2009)، اختلال در الگوی جریان‌های هیدرولوژیک، تداخل آب شیرین و شور (Chen et al., 2010) را به دنبال داشته باشد (Cassiani & Zoccatelli, 2000). در سال‌های اخیر وقوع فرونشست زمین در محدوده‌هایی با بهره‌برداری شدید از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌های متشکل از نهشته‌های آبرفتی که به‌خوبی تحکیم نیافته‌اند، بیشتر شده است. شواهدی زیادی از وقوع فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران ازجمله یزد، کاشمر گزارش و مشاهده شده است (Lashkaripour et al., 2009). پدیده فرونشست، که عمدتاً ناشی از برداشت بیش‌ازحد مجاز آب‌های زیرزمینی همراه با فشرده شدن لایه‌های رسی و سیلتی میان آبخوان‌ها صورت می‌گیرد، غیرقابل‌بازگشت بوده و در این محدوده‌ها، بالا آمدن مجدد سطح ایستایی به تراز اولیه امکان‌پذیر نمی‌شود (Nilzad, Moradi & Jalili, 2018). الگوی فضایی پدیده فرونشست زمین در ایران حاکی از این است که پدید فرونشست بیشتر با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، به سبب توسعه روزافزون مصرف آب در مناطق شهری و راندمان اندک آب در کشاورزی در رابطه است. تشدید شرایط ناشی از خشک‌سالی و فراگیری فضایی آب، علاوه بر نواحی خشک و مرکزی کشور، نواحی نیمه‌خشک و مرطوب شمال غرب را نیز تحت تأثیر قرار داده است. به‌طوری‌که برخی از مدیران و کارشناسان سازمان زمین‌شناسی، حدود ۳۰۰ دشت از ۶۰۰ دشت کشور را در معرض فرونشست اعلام نموده‌اند (Niroumandfar, khozeymehnehad & Khashei Siuki, 2020). با توجه به اهمیت فرونشست زمین و پیامدهای آن، مطالعه در مورد این پدیده توسط محققین زیادی صورت گرفته است. کریم زاده و متسوکا (Karimzadeh & Matsuoka, 2020) در مطالعه‌ای جابجایی زمین در استان آذربایجان شرقی و غربی را با استفاده از داده‌های ماهواره ALOS-2، تصویر PALSAR-2 باند L در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ را

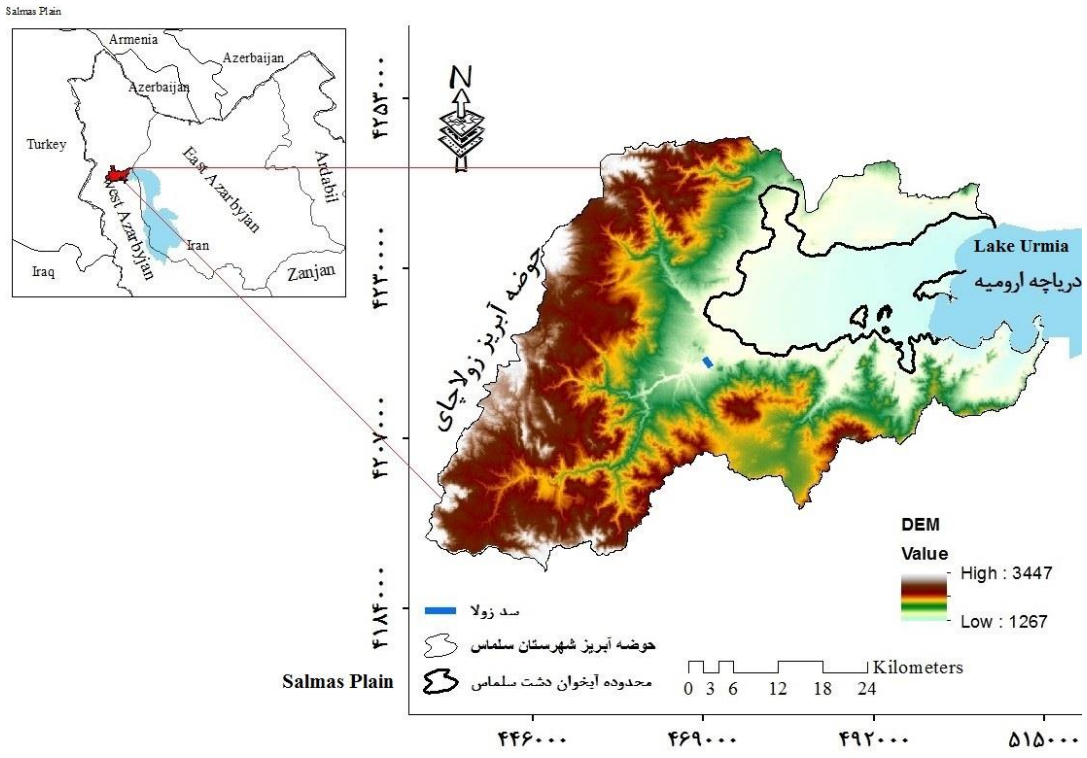
موردبررسی قراردادند. نتایج مطالعات نشان داد که دشت‌های تبریز و شبستر با پدیده جدی فرونشست مواجه هستند.

دشت سلماس به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه، که امروزه با بحرانی به نام فرونشست زمین مواجه است، به‌عنوان مهم‌ترین محدوده کشاورزی شمال غرب کشور محسوب می‌شود. این بحران در بسیاری از نقاط دشت سلماس، به‌خصوص منطقه قره قشلاق مشکلات فراوانی را برای سازه‌های انسانی ایجاد کرده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته دشت سلماس در طول دو دهه با کاهش حجم آبخوان‌ها مواجهه بوده است، که علت اصلی آن هم برداشت آب از طریق چاه‌های متعددی بوده، که به‌طور خاص برای مصارف کشاورزی احداث گردیده‌اند. این تعدد و استفاده زیاد از آب‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین در این محدوده شده است. نادرلو و همکاران (Naderloo, Javadikia & Mostafaei, 2017) به بررسی هیدرولوژی آبخوان دشت سلماس با تأکید بر فرونشست زمین پرداختند که در این پژوهش از ترکیب روش نگاشت خودسازمانده (SOM) و مدل‌های مختلف هوش مصنوعی نظیر منطق فازی (FL) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند و درنهایت برای به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، مدل هوش مصنوعی مرکب نظارت شده (SCMAI) برای ترکیب نتایج مدل‌های منفرد به کار برده شد و درنهایت به این اصل رسیده‌اند که وضعیت محدوده بسیار بحرانی است. زارعی و همکاران (Zarei et al., 2020) با استفاده از تصاویر راداری، میزان فرونشست در دشت سلماس در سال ۲۰۰۹ در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا۲۰۱۸ را به ترتیب ۱۱ سانتی‌متر و تا ۶۰ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند.آنچه از پیشینه مطالعات نتیجه می‌شود، این است که فرونشست در دشت سلماس مسئله بسیار جدی است و به مطالعات زیاد و مستمر نیاز دارد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-محدوده موردمطالعه

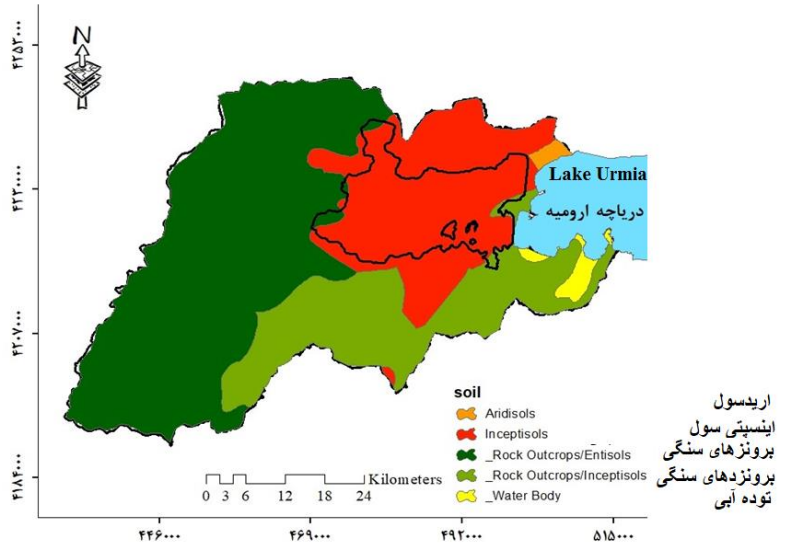
دشت سلماس به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در شمال استان آذربایجان غربی، بین محدوده ' ۲۷ ° ۴۵ تا ' ۰۶ ° ۴۴ طول شرقی و' ۱۱ ° ۳۸ تا ' ۳۱ ° ۳۸ عرض شمالی قرارگرفته است. محدوده مطالعاتی با حدود ۵۵۰ کیلومترمربع وسعت، در قسمت شرق رشته‌کوه زاگرس قرارگرفته است و از اطراف به‌وسیله تراس‌ها و تپه‌های بلند کوهستانی احاطه شده و از قسمت شرق نیز به دریاچه ارومیه ختم می‌گردد (شکل ۱). یکی از منابعی که آب زیرزمینی قسمت‌های جنوبی دشت سلماس (اطراف آغ زیارت) را تغذیه می‌کند، چشمه‌ی آبگرم واقع در ۱/۵ کیلومتری روستای آبگرم سلماس می‌باشد. آب این چشمه گرم که دبی پایینی هم دارند، وارد رودخانه می‌شوند و درنهایت پس از عبور از قسمت‌های جنوبی دشت سلماس به مراتع اطراف دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. دشت سلماس، دشتی مسطح با متوسط ارتفاع ۱۳۰۰ متر و با شیب ملایم کمتر از پنج درصد است که شیب دشت از غرب به شرق و دریاچه ارومیه می‌باشد. تقریباً تمام دشت مذکور دارای کاربری زراعی و باغی است. خاک در این دشت عموماً از نوع خاک‌های این سپتی سول، با منشأ نسبتاً جدید است. این نوع خاک‌ها دارای زهکشی مناسب و قابل‌کشت می‌باشد. خاک اریدیسول بیشتر در بخش‌های شرقی دشت و در نزدیکی سواحل دریاچه ارومیه دیده می‌شود که دارای مقادیر نمک بوده و از لحاظ کشاورزی کارایی ندارد (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

قدیمی‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی است. واحدهای متعلق به کرتاسه (شیل، ماسه و آهک) نیز با درجه‌ی دگرگونی ضعیف در منطقه حضور دارند. ملانژ افیولیتی که شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین و رسوبی دگرگون شده (در حد رخساره شیست سبز) است، در نیمه شمالی منطقه گسترش دارد. واحدهای میوسن در منطقه دربرگیرنده‌ی ماسه‌سنگ، کنگلومرا، شیل و مارن با عدسی‌هایی از سنگ‌آهک و گچ است. این واحدها توسط گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری حاصله از فعالیت آتشفشانی کواترنر و آبرفت‌های کواترنری پوشیده شده‌اند. سنگ‌های آذرین بیشتر در قسمت غرب منطقه قرار دارند که از نوع اسیدی و بازی بوده و سنگ‌های بازالتی در قسمت جنوب غربی به‌صورت وسیعی گسترش دارند و این قسمت را نسبتاً قابل‌نفوذ ساخته‌اند. در اطراف دریاچه ارومیه سنگ‌های آذرین اسیدی که دارای مقدار زیادی کوارتز هستند، به رنگ گلی روشن و آجری دیده می‌شوند (Rajabi & Bayati, 2011).



شکل ۲- ویژگی خاک‌ها و سازنده‌ای سطحی دشت سلماس

Fig.2. Characteristics of soils and surface formations of Selmas Plain

۲-۲-روش انجام پژوهش

فرونشست زمین متأثر از عوامل مختلف انسانی و طبیعی است، لذا بررسی حساسیت زمین به فرونشست، بستگی به نقش و میزان و سهم پارامترهای مختلف در پدید آمدن چنین مخاطره‌ای دارد. لازمه مطالعه دقیق فرونشست، دسترسی به اطلاعات و آمار کافی از منابع مختلف است. در این مطالعه برای بررسی میزان حساسیت دشت سلماس نسبت به پدیده فرونشست، آمار و اطلاعات موردنیاز تا سال ۱۳۹۸ به شرح زیر گردآوری شده است:

نقشه‌های توپوگرافی رقومی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی رقومی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان سلماس، تهیه نقشه‌های پایه و موضوعی مانند (شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از چاه‌ها، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل و سایر نقشه‌ها برحسب نیاز)، استفاده از دستگاه سیستم موقعیت‌یابی جهانی(GPS)، داده‌های هواشناسی منطقه، نقشه خاک، عکس‌های هوایی مقیاس ۲۰۰۰۰ :۱، DEM منطقه موردمطالعه ۳۰ * ۳۰ متری. در این مطالعه، از مدل‌های مانند، مدل فازی تعیین درجه عضویت Membership، مدل همپوشانی فازی Fazzy Overlay، مدل شبکه عصبیNeuro Network، سیستم

استنتاج عصبی–فازی تطبیقی (ANFIS)[1] بهره‌گیری شده است. برای بررسی فرونشست در دشت سلماس، از هفت معیار مختلف، شامل نوع پوشش گیاهی، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از چاه‌های پیزومتری، مدل رقومی ارتفاع و شیب استفاده شده است. برای بررسی این عوامل در فرونشست زمین، در ابتدا تمام معیارها در نرم‌افزار ArcGis استانداردسازی شده و به شبکه‌هایی با ابعاد ۸۰۰*۸۰۰ متر، به مرکزیت نقاط تبدیل و تمام اطلاعات مربوط به هفت معیار در هر شبکه در نقاط مرکزی قرار داده شد. سپس اطلاعات توصیفی نقاط را به ماتریس تبدیل کرده و برای اعمال روش ANFIS به نرم‌افزار متلب (Matlab) انتقال یافت. برای کل فرایند ANFIS به سه نوع داده نیاز بود و داده‌ها باید به‌صورت تصادفی، نمونه‌برداری می‌شدند. به این منظور، روش C-flodCV برای تقسیم داده‌های موجود به سه قسمت آموزشی، آزمایشی و داده‌های چک یا اعتبار سنجی اجرا شد. اطلاعات توصیفی لایه‌های مذکور، به‌صورت ماتریس به محیط نرم‌افزار متلب منتقل گردید. در این ماتریس، ستون اول به میدان مشترک برای همه لایه‌ها اختصاص یافت تا ساختار نقشه‌ها حفظ شوند. در ادامه ستونی به ماتریس تحت عنوان مناطق فرونشست اضافه شد که مقادیر آن بین یک و صفر متغیر است. شایان‌ذکر است که هر چه این عدد به سمت یک سیر کند نشان از فرونشست در پیکسل است (و برعکس). در این بررسی، داده‌های آموزشی در محیط متلب وارد شد و سپس در بین انواع توابع فازی، توابع عضویت مدنظر را انتخاب و سپس تعداد توابع فازی نیز وارد شدند. با تعیین تکرار آموزش گزینه Train را انتخاب و داده‌های آموزش داده شده را تست کرده و سپس داده‌های آموزشی را در فرایند مدل تعریف گردید. در ادامه، با تکیه به قوانین و توابع تعیین شده برای داده‌های آموزشی، فرایند آزمایش انجام گرفت. در ادامه با استفاده از سیستم استنتاج فازی تولید شده و قوانین مربوط به آن، با دستور evalfis فرونشست زمین پیش‌بینی گردید. در این تحقیق، برای اعتبار سنجی از روش CflodCV استفاده شد. داده‌هایی که برای استخراج مدل Anfis به نرم‌افزار متلب معرفی شده بودند، دامنه بسیار زیادی داشته‌اند و با توجه به اینکه این امر بر مدت‌زمان پردازش، آموزش داده‌ها و کاهش میزان خطا در آموزش تأثیرگذار است، بنابراین در محیط نرم‌افزار متلب با ارائه کدنویسی و تعریف function مقادیر داده‌ها را بین صفر و یک قرار داده شد و در محیط نرم‌افزار متلب ابتدا ماکزیمم و مینیمم

[1] Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System

داده‌ها را محاسبه، سپس شرط برای نرمال‌سازی ارائه گردید. در ادامه حداقل (LB) و حداکثر (UB) بین صفر و یک تعریف شدند. بعد از این عملیات داده‌های نرمال با معادله (۱) به‌دست آمد:

$$Normalization= (UB – LB) * X – LB \quad (۱)$$

در این مطالعه، با نرمال‌سازی داده‌ها دامنه کوتاه‌تر شد و آموزش داده‌ها هم به لحاظ زمان و هم از لحاظ خطا، عملکردی بهتری نشان دادند و درنهایت خطا به $۱۰^{-۸}$ کاهش یافت.

۲-۲-۱- مدل‌سازی با ANFIS بر پایه FIS

در این تحقیق برای مدل‌سازی با Anfis، داده‌ها تقسیم‌بندی گردیدند و در این تقسیم‌بندی، حدود ۷۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزشی،۲۰ درصد از داده‌های باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمایشی یا وارسی و ۱۰ درصد دیگر به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مدل‌سازی تعریف گردیدند. برای اجرای آموزش در FIS، روش بهینه‌سازی hybrid، با تعداد دوره‌های آموزش (۴۰ تکرار و خطای مورد نظر ۰) در نظر گرفته شدند. مشخصات کامل مدل ANFIS به کار رفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل Anfis برای مدل‌سازی فرونشست

Table 1- Specifications of ANFIS model for subsidence modeling

ورودی Input	الگوریتم آموزشی Learning Algorithm	عملگر محاسباتی Arithmetic Operator	تکرار Repeat	خروجی Output
DEM	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
شیب Slope	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
فاصله از رودخانه Distance from river	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
فاصله از جاده Distance from Road	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
فاصله از چاه Distance from Well	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
پوشش سطحی Surface Cover	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear
عمق آب Water depth	هیبرید Hybrid	تی–نرم T-Soft	40	خطی Linear

برای بیان مجموعه‌های گسسته فازی از معادله (۲) استفاده شده است.

$$\text{متغیر فازی} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_{(a_i)}}{a_i} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، مؤلفه‌های، a_i، i امین عضو از مجموعه؛ $\mu_{(a_i)}$ درصد تعلق a_i به مجموعه فازی؛ n تعداد اعضای فازی (JaفازیJa et al., 2015a).

جدول۲- توابع عضویت، خطا دوره آموزش، معیارهای آماری همبستگی و انحراف از میانگین مربعات

Table 2- Membership functions, training period error, statistical measures of correlation and deviation from mean square

توابع عضویت **Membership Functions**	خطای دوره اول **First Period Error**	خطای دوره دوم **Second Period Error**	خطای دوره سوم **Third Period Error**	**RMSE**	**R^2**
Tir mf	0.0000002	0.0000002	0.0000001	0.18	**0.86**
Trap mf	0.00000004	0.00000003	0.00000003	0.20	**0.81**
Gaussi mf	0.0000002	0.0000001	0.0000001	0.55	**0.29**
Gaussi mf2	0.00000004	0.00000003	0.00000003	0.55	**0.22**
Gbell mf	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.71	**0.12**

در جدول ۳ به دو روش استنتاج فازی شامل روش‌های ممدانی و سوگنو اشاره شده است که تفاوت زیادی با هم ندارد و در پایان یک جواب تقریباً یکسان ارائه می‌دهند.

جدول۳- روش‌های استنتاج فازی با عملگرهای فازی

Table 3- Fuzzy inference methods with fuzzy operators (Jahed Armaghani et al., 2015b)

روش	**T.S.K**	**Mamdani**
AND	$\boldsymbol{min}(\mu_A, \mu_B)$	$(\mu_A * \mu_B)$
OR	$\boldsymbol{max}(\mu_A, \mu_B)$	$\boldsymbol{max}(\mu_A, \mu_B)$
NOT	$\mathbf{1} - \mu_A$	$\mathbf{1} - \mu_A$

تابع مشخصه در مجموعه‌های فازی، دارای هر مقدار بین ۰ و ۱ باشد. درصورتی‌که مقادیر تابع عضویت فقط به دو مقدار ۱ یا ۰ محدود شود آنگاه A یک مجموعه کلاسیک[1] و یک تابع مشخصه خواهد بود. مجموعه‌های فازی در نرم‌افزار متلب قابل‌تعریف می‌باشند و دارای انواع متنوعی هستند که در این پژوهش از حالات ذوزنقه‌ای و مثلثی استفاده شده است. تابع **عضویت** ذوزنقه‌ای[2] که در این تحقیق از آن استفاده شده است با ۴ پارامتر {a b c d} به دو صورت زیر قابل‌تعریف می‌باشد.

$$f_{(x;a\ b\ c\ d)} = \begin{cases} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & c \le x \end{cases} \quad (۳)$$

[1] Classical Set
[2] Trapezoidal Fuzzy Membership

$$f_{(x;a\ b\ c\ d)} = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (۴)$$

مثلثی[1] تابع با سه پارامتر {a b c} تعریف شده و برای هرکدام از توابع ایجاد با پارامترهای مورد نظر، دامنه‌های خاص تعریف می‌شود. تابع عضویت به‌صورت ریاضی بیان می‌شود، به‌طوری‌که می‌توان با استفاده از عملگرهای min و max نیز تعریف دیگری از آن داشت:

$$f_{(x;a\ b\ c)} = \begin{cases} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & c \le x \end{cases} \quad (۵)$$

$$f_{(x;a\ b\ c)} = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (۶)$$

در معادله و ماتریس فوق، پارامترهای a b c مختصات گوشه‌های مثلث را بیان می‌کنند. برای محاسبات در مرحله بعدی، از عملگر زیر بهره‌گیری شده است.

$$\mu_{A\cap B}(x) = T\big(\mu_A(x), \mu_B(x)\big) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (۷)$$
$$\mu_{not\ A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

۳-نتایج و بحث

۳-۱-نتایج حاصل از مدل ANFIS

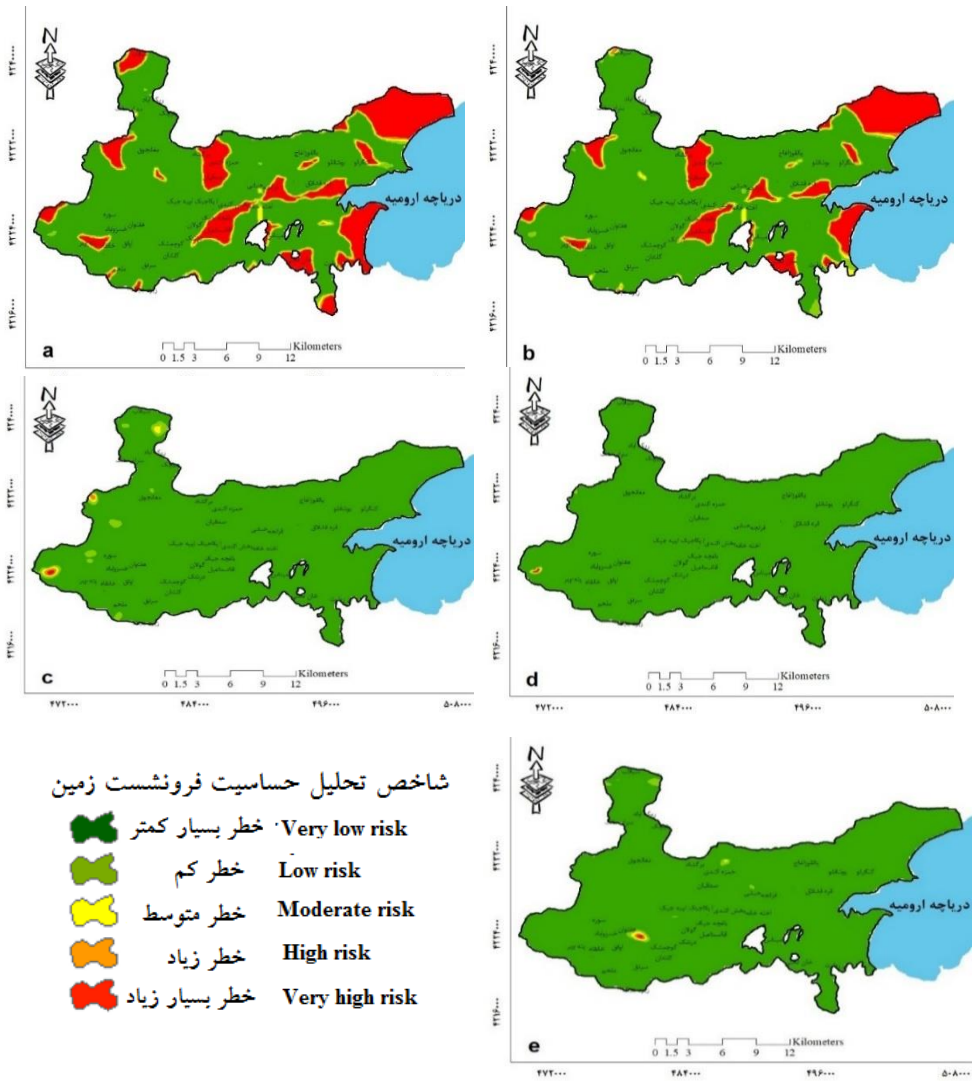
مدل سیستم استنتاج فازی عصبی با توابع عضویت مختلف، برای محدوده مطالعاتی انجام گرفت و نتایج به‌صورت شکل و نمودار ارائه گردید (شکل ۴ و ۳).

نتایج حاصل از مدل مذکور در توابع عضویت مختلف که در شکل ۴ و ۳ و جدول ۳، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع عضویت ذوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب با ضریب خطا آموزشی 10^{-7} و 10^{-8}، ضریب خطای میانگین مربعات ۰.۱۸ و ۰.۲۰ همچنین با همبستگی رگرسیون ۰.۸۶ و ۰.۸۰ بهترین عملکرد را در شناسایی مناطق با حساسیت بالا فرونشست را داشته است.

بر اساس دو مدل فوق، مساحت ۸.۹ و ۶.۳ کیلومترمربع از منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد و مساحت ۱.۸ و ۳.۲ کیلومترمربع، در محدوده خطر زیاد قرار دارند. در واقع نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثر فرونشست در منطقه را با دقت بهتر و ضریب خطای 10^{-7} و 10^{-8} فرونشست را پیش‌بینی نماید. از مدل پیشنهادی به‌دست آمده می‌توان در سال‌های آتی با ترسیم و پیش‌بینی روند تغییرات آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مدل پیش‌بینی مدیریتی استفاده کرد. شکل ۴، ضریب همبستگی رگرسیون خطی داده‌های

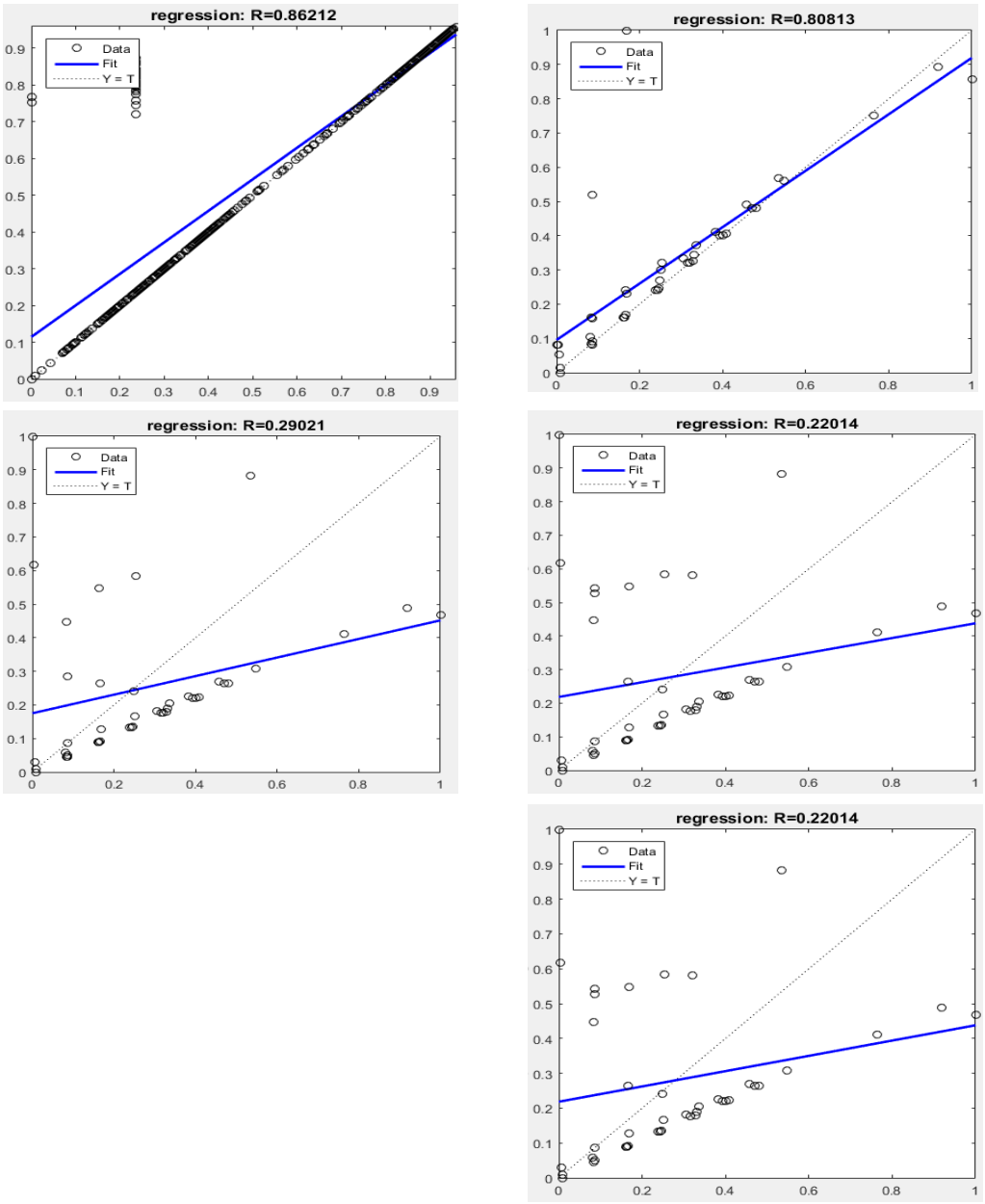
[1] Triangular Fuzzy Membership

به‌دست آمده از مدل استنتاج عصبی فازی را نشان می‌دهد که برابر با عدد 0.86 می‌باشد و نشان از عملکرد مناسب مدل سوگنو در ارتباط با بحران فرونشست در منطقه است.



شکل ۳- نقشه تحلیل حساسیت فرونشست، با استفاده از مدل ANFIS در پنج تابع عضویت به ترتیب: a تابع عضویت ذوزنقه‌ای، b تابع عضویت مثلثی، c تابع عضویت گوسی، d تابع عضویت گوسی دوطرفه، e تابع عضویت منحنی زنگوله

Fig.3. Map of subsidence sensitivity analysis, using ANFIS model in five best-fit membership functions: a trapezoidal membership function, b triangular membership function, c Gaussian membership function, d bilateral Gaussian membership function, e bell curve membership function



شکل۴- همبستگی رگرسیون داده‌های فرونشست به‌دست آمده از مدل استنتاج عصبی فازی: a تابع عضویت ذوزنقه‌ای، b تابع عضویت مثلثی، c تابع عضویت گوسی، d تابع عضویت گوسی دوطرفه، e تابع عضویت منحنی زنگوله.

Fig.4. Regression correlation of subsidence data obtained from fuzzy neural inference model: a trapezoidal membership function, b triangular membership function, c Gaussian membership function, d bilateral Gaussian membership function, e bell curve membership function

۳-۲- تغییرات در آب‌های زیرزمینی و فرونشست

محدوده مطالعاتی از سه آبخوان آبرفتی با نام‌های سلماس، قالقاچی و سیدان تشکیل شده است. همچنین علاوه بر این یک آبخوان کوچک نیز در اطراف روستای شکریازی قرار دارد. همه این آبخوان‌ها در محدوده مطالعاتی قرار دارند، به همین دلیل در این مطالعه، اطلاعات همه آبخوان‌ها جمع‌آوری و نهایتاً با نام دشت سلماس همه آن‌ها مطالعه شده‌اند. دشت سلماس حدود ۴۵۰ کیلومترمربع وسعت دارد. حدود ۴۰۰ کیلومتر از این دشت به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است که تحت پوشش شبکه پیزومتری آب‌های زیرزمینی قرار دارد. تعداد ۳۹ حلقه چاه پیزومتری فعال وجود دارد که متوسط عمق آن‌ها ۴۵ متر است. ضخامت آبرفت‌ها در محدوده از ۲۰۰ متر تا ۲۵ متر متغیر می‌باشد. در دشت سلماس، رقوم منحنی‌های ایزوپیز بین ۱۴۷۵ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (روستای هدر، واقع در شمال دشت) ۱۴۸۵ متر در شمال غرب دشت (اراضی روستای ایان)، ۱۴۶۰ متر در مخروط افکنه دریک‌چای (اراضی تازه شهر واقع در غرب دشت) و ۱۳۹۵ متر در مخروط افکنه زولاچای واقع در جنوب غرب دشت، تا ۱۲۸۰ متر در شرق محدوده سلماس (اراضی خروجی دشت و مجاور دریاچه ارومیه) متغیر است. بدین معنی که روند منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی از مناطق شمال، غرب و جنوب غرب دشت به سمت مرکز و شرق دشت کاهش می‌یابد. در مناطق ورودی آب زیرزمینی دشت، جبهه‌های شمالی، شمال غربی، غربی و جنوب غربی، تحدب منحنی‌ها (که به سمت دشت است)، نشان‌دهنده تغذیه آبخوان توسط رودخانه‌های دره لی سو، در یک چای و زولاچای می‌باشد. این تحدب منحنی‌ها بلافاصله با حرکت به سمت مرکز دشت تغییر جهت داده و جهت جریان آب زیرزمینی را به سمت شهر سلماس و جنوب غرب آن (حوالی روستاهای هفتوان و خانقاه) نشان می‌دهند، که علت آن بهره‌برداری شدید (توسط چاه‌های عمیق) در این مناطق است.

در مناطق شرقی دشت، تحدب منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی، به سمت حاشیه دشت می‌باشد که درنتیجه جهت جریان آب زیرزمینی، به سمت رودخانه زولاچای بوده و نشان‌دهنده زهکشی مناسب در این ناحیه است. شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی، در شمال دشت (مخروط افکنه دره لی سو) ۱۹ در هزار، در شمال غرب دشت (اراضی روستای ایان) ۳۴ در هزار، در مخروط افکنه دریک‌چای (غرب دشت و اراضی

تازه شهر) ۱۹ در هزار و در مخروط افکنه زولاچای (جنوب غرب دشت) ۹ در هزار می‌باشد که با حرکت به سمت شرق دشت از میزان شیب هیدرولیکی کاسته شده و به ۶ در هزار در مرکز دشت و کمتر از ۳ در هزار، در خروجی دشت (شرق محدوده مطالعاتی) می‌رسد. منحنی‌های هم عمق دشت سلماس بر اساس نقشه هم عمق ماکزیمم سال ۱۳۹۴، نشان‌دهنده تغییر عمق سطح ایستابی در خروجی دشت، از ۱ متر (شمال شرق دشت، روبروی شهرک صنعتی) تا ۹۵ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (اراضی روستای هدر) می‌باشد. در نقشه عمق حداقل (۹۴) تغییر عمق سطح ایستابی در خروجی دشت، از ۲ متر (در شمال شرق دشت، روبروی شهرک صنعتی) تا ۱۰۴ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (اراضی روستای هدر) می‌باشد. آثار نشست زمین در برخی مناطق خروجی دشت (منطقه کلشان و قره قشلاق) مشاهده شده است. تمامی پیزومترهای حاشیه شرقی آبخوان سلماس که در مجاورت دریاچه ارومیه واقع شده‌اند و همچنین پیزومترهای حاشیه جنوبی دشت نظیر کلشان، اراضی علی‌آباد و آق‌زیارت در اثر پدیده فرونشست زمین، دچار رشد چاه یا لوله زایی شده که میزان این نشست مطابق آماره‌های موجود بین حداقل ۵ سانتی‌متر تا حداکثر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد (در طی یک دهه).

جدول۴- مساحت و درصد، کلاس‌های توابع عضویت در محدوده موردمطالعه

Table 4- Area and percentage, classes of membership functions in the studied area

تابع **Function**	تابع عضویت و کلاس‌ها **Membership function and classes**	مساحت **Area**	درصد **Percentage**
تابع عضویت ذوزنقه‌ای Trapezoidal membership function	خطر بسیار کمتر Very low risk	32.2	73.5
	خطر کمتر Low risk	1.0	2.3
	خطر متوسط Moderate risk	1.2	2.8
	خطر زیاد High risk	0.8	1.8
	خطر بسیار زیاد Very high risk	8.6	19.6
تابع عضویت مثلثی Triangular membership function	خطر بسیار کمتر Very low risk	32.7	74.7
	خطر کمتر Low risk	2.0	4.6
	خطر متوسط Moderate risk	1.4	3.2
	خطر زیاد High risk	1.4	3.2
	خطر بسیار زیاد Very high risk	6.3	14.3

تابع عضویت گوسی Gaussian membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	43.1	98.4
	Low risk خطر کمتر	0.5	1.1
	Moderate risk خطر متوسط	0.1	0.3
	High risk خطر زیاد	0.1	0.1
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.03	0.1
تابع عضویت گوسی دو طرفه Two-way Gaussian membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	43.86	99.9
	Low risk خطر کمتر	0.03	0.1
	Moderate risk خطر متوسط	0	0
	High risk خطر زیاد	0.01	0.01
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.03	0.1
تابع عضویت زنگوله‌ای Bells membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	38.72	88.3
	Low risk خطر کمتر	4.09	9.3
	Moderate risk خطر متوسط	0.76	1.7
	High risk خطر زیاد	0.24	0.5
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.063	0.1



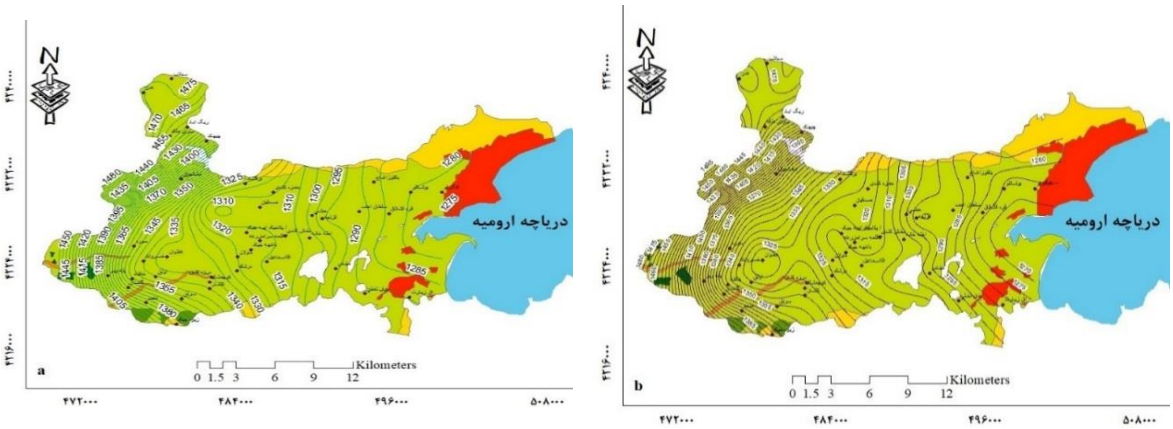
شکل۵-تصاویری از نشست زمین در بخش‌هایی از دشت سلماس

Fig. 5. Pictures of land subsidence in parts of Selmas plain

از دیگر پدیده‌های قابل‌توجه در این دشت مشاهده پدیده لوله زایی[1] در اطراف پیزومترهای تازه حفر شده و عدم مشاهده این عارضه در اطراف پیزومتر قدیمی می‌باشد (چاه پیزومتری یوشانلو) که علت این امر ناشی از ناقص بودن پیزومترهای قدیمی و عمق کم و نرسیدن به سنگ کف منطقه و در نتیجه نشست ساختمان پیزومتر همراه با نشست منطقه اطراف آن است. ولی در مورد پیزومترهای جدید الحفر با توجه به اینکه عمق آن‌ها زیاد بوده و تا سنگ کف منطقه حفر و لوله‌گذاری شده‌اند، در نتیجه اتکای لوله جدار به سنگ کف باعث شده در اثر نشست زمین ساختمان چاه دچار فرونشست نشده ولی پدیده لوله زایی در

[1] Tube formation

سطح زمین رخ دهد. ماسه دهی چاه‌های بهره‌برداری از دیگر پدیده‌های مرتبط با آب زیرزمینی در دشت سلماس است که در اغلب نقاط حاشیه شرقی دشت که جنس رسوبات ریزدانه می‌باشد. ملاحظه شده که خود این پدیده در افزایش میزان فرونشست زمین در این ناحیه می‌تواند مؤثر باشد. شکل ۶ و ۷ نشان‌دهنده افت دشت سلماس در محل پیزومتر روستای کلشان به میزان حدود ۱۵ سانتی‌متر و شکل ۸ نقشه‌های هم



عمق آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

شکل۶- نقشه ایروپیز حداکثر (**a**) و ایزوپیز حداقل (**b**)

Fig.6. Map of maximum isopiz (a) and minimum isopiz (b)



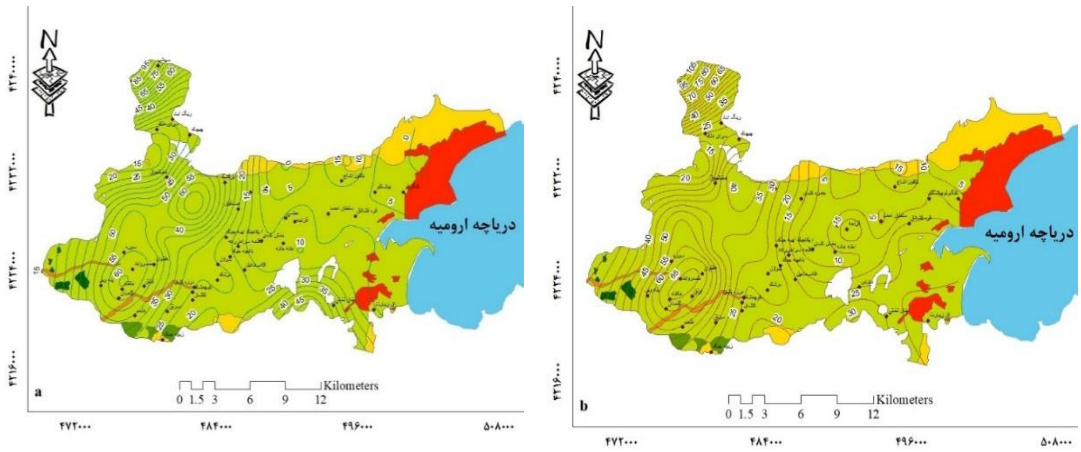
شکل۷- تصویر افت دشت سلماس در محل پیزومتر روستای کلشان و نشست زمین در دشت سلماس

Fig.7. The image of Selmas plain subsidence at the piezometer location of Kalshan village and land subsidence in Selmas plain

بررسی دوره چهل‌ویک‌ساله از سال آبی ۵۴–۵۳ لغایت ۹۴–۹۳ نشان می‌دهد که در طول این دوره، از سال آبی ۵۴–۵۳ لغایت ۷۴–۷۳، نوسانات سطح سفره حالت طبیعی داشته، به‌طوری‌که خشکسالی‌های اوایل دهه ۶۰ باعث افت حدود ۲ متر در سطح سفره آب زیرزمینی شده که با افزایش بارندگی در اواخر دهه ۶۰

و اوایل دهه ۷۰ این میزان جبران شده است. متأسفانه با شروع مجدد دوره خشکسالی، از سال آبی ۷۵-۷۴ و افزایش هم‌زمان میزان بهره‌برداری، افت شدید سطح سفره شروع شده که باعث صدور اولین آگهی ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب زیرزمینی برای قسمتی از دشت سلماس (مناطق ورودی دشت در غرب جاده ارومیه سلماس) در سال ۱۳۷۹ گردید. افزایش میزان بارندگی در اوایل دهه ۸۰ نیز نتوانست باعث جلوگیری از افت سطح سفره گردد، لذا در حال حاضر تمامی محدوده مطالعاتی سلماس ممنوعه اعلام شده است. در مجموع در طول دوره ۴۱ ساله (از ابتدای سال آبی ۵۴ - ۵۳ تا آخر سال آبی ۹۴-۹۳)، در مجموع ۱۸/۰۵ متر افت در سطح سفره آب زیرزمینی وجود داشته است که این رقم به‌طور متوسط معادل ۰/۴۴ متر افت سطح سفره در سال و در طول سال آبی ۹۴-۹۳ معادل ۱/۲۳ متر بوده است. با لحاظ نمودن ضریب ذخیره دشت (معادل ۳ درصد) و مساحت آبخوان (۳۹۸/۵۶ کیلومترمربع)، میزان کسری حجم مخزن سالانه دشت سلماس در طول سال آبی ۹۴-۹۳ و درازمدت ۴۱ ساله به ترتیب برابر ۱۵/۰۷ و ۲۱۵/۸۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد می‌گردد.

بر اساس آخرین وضعیت منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی سلماس (بر اساس آخرین آماربرداری سال ۱۳۸۹ و بروز نمودن پروانه‌های صادره و تخلیه آن‌ها تا پایان سال آبی در شهریور ۹۴)، تعداد ۸۵۰ چاه عمیق و تعداد ۴۷۳ چاه نیمه عمیق در محدوده وجود دارد که با احتساب چشمه‌ها و قنات در سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ ۱۴۶.۱۸ میلیون مترمکعب آب از منابع زیرزمینی تخلیه شده است. آمار تخلیه در سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ ۱۶۴.۴۶ و در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ ۱۵۹ میلیون مترمکعب برآورد شده است (جدول ۶ و ۵).



شکل ۸- نقشه حداکثر هم عمق (a) و نقشه حداقل هم عمق (b)

Fig.8. Maximum equal depth map (a) and minimum equal depth map (b)

جدول۵- تعداد چاه و تخلیه سالانه منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی سال آبی (۹۳-۹۴)(اداره آب استان آذربایجان غربی

Table 5- Number of wells and annual discharge of underground water resources in the (study area of the water year (93-94) (Water Department of West Azarbaijan Province)

Qanat قنات		Spring چشمه		چاه Well			
				Semi-deep well چاه نیمه عمیق		Deep Well چاه عمیق	
تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.
0.856	59	1.052	27	10.155	473	134.123	850
			146.186			جمع کل تخلیه Total discharge	

جدول۶- وضعیت منابع آب در سنوات آماری (تخلیه بر حسب میلیون مترمکعب)

تخلیه کل Total discharge	Qanat قنات		Spring چشمه		Well چاه		سال آماربرداری Year of survey
	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	
164.46	2.24	57	1.57	25	160.65	1093	2001-2002
159.03	1.393	59	–	–	157.637	1357	2010-2011

Table 6- Status of water resources in statistical years (discharge in million cubic meters)

تغییر ذخیره ثابت آبخوان که این متغیر در بیلان متعادل (جمع ورودی‌ها با جمع خروجی‌ها برابر باشد) حدود صفر است و در بیلان منفی برابر اضافه برداشت از ذخیره ثابت آبخوان می‌باشد که برای برقراری موازنه به کمک عوامل تغذیه می‌آید و چون اضافه بر حجم ذخیره جبران‌پذیر سالانه آبخوان می‌باشد، با علامت منفی نشان داده می‌شود. برخی از عوامل بیلان یا مستقیماً قابل‌اندازه‌گیری و یا قابل‌محاسبه می‌باشند. ولی به علت وجود عوامل متعدد تأثیرگذار بر بیلان آب زیرزمینی حتی با داشتن کامل‌ترین اطلاعات موردنیاز، باز هم محاسبه برخی عوامل بیلان امکان‌پذیر نیست و یا محاسبه آن بسیار مشکل است. با توجه به توضیحات فوق بیلان آب زیرزمینی دشت سلماس در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول۷- بیلان آب زیرزمینی آبخوان‌های آبرفتی محدوده مطالعاتی دشت سلماس (ارقام بر حسب میلیون مترمکعب در سال است.)

Table 7- Underground water balance of alluvial aquifers in the Selmas plain study area. The figures are in millions of cubic meters per year
(Dousti Rezaie, Zeinalzadeh, Besharat & Amiratаee, 2022)

نام آبخوان آبرفتی Alluvial aquifer name	مساحت ناحیه بیلان (Km²)Area of Bilan District	عوامل ورودی Input factors						عوامل خروجی Output factors					
		جریان زیرزمینی ورودی Incoming underground flow	نفوذ از بارندگی Penetration from rainfall	نفوذ از جریان‌های سطحی Penetration from surface flow	نفوذ از پساب کشاورزی Penetration from agricultural wastewater	نفوذ از پساب شرب و صنعت Penetration from drinking and	جمع Total	تخلیه و برداشت (چاه و قنات، چشمه) wells and)Drainage and collection (Qanat, springs	جریان زیرزمینی خروجی Underground outlet flow	زهکشی آبخوان Aquifer drainage	تبخیر از آبخوان Evaporation from aquifer	جمع Total	تغییرات حجم ذخیره آبخوان Changes in aquifer storage volume
سلماس Salmas	397	61.57	8.47	44.71	60.6	8.37	178.75	168.22	2.98	2.74	3.39	184.88	-6.3

بر اساس جدول مذکور در حالت کلی و با در نظر گرفتن تمام عوامل ورودی جمع کل آب وارد شده به منابع آب زیرزمینی ۱۷۸.۷۵ میلیون مترمکعب است و در مقابل مقدار تخلیه از چاه، چشمه، تبخیر و زهکشی ۱۸۴.۸۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است و مقدار تخلیه بیشتر از مقدار تغذیه می‌باشد بنابراین یک روند منفی در بیلان آب‌های زیرزمینی در منطقه اتفاق افتاده است. قابل ذکر است که با وجود بارندگی بسیار کم و تغییر اقلیم جبران آن مشکل می‌باشد. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت سلماس باعث کاهش فشار منفذی و افزایش تنش در رسوبات سست محدوده شده و لایه‌های آبدار (اکیفر) و لایه‌های نشتی (آکی تارد) فشرده شده و به‌تدریج مقدمات نشست درسطح زمین فراهم شده است. شروع و ایجادمقدمات برای نشست زمین ممکن است از دهه‌ها قبل صورت گرفته باشداما به لحاظ کندی عملکرد، این پدیده در مقطع زمانی کوتاه قابل درک نباشد و زمانی این پدیده درک شود که کار از کار گذشته باشد، به همین سبب هم پایش به موقع و ارزیابی این پدیده و اثرات مورفولوژیک ناشی از آن در بسیاری از مواقع با دقت و صحت امکانپذیر نیست؛ و این رخ داد در اغلب نواحی، زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که اثرات مورفولوژی و

اشکال سطحی و زیر سطحی را بروز نموده، و عامل تخریب و خسارت گشته است (Lashkaripour et al., 2009). برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت زمانی که از ظرفیت ترمیمی منابع ترمیم پذیر (همچون آب) بیشتر شده و همچنین در سازنده‌ای رسوبی مستعد صورت گرفته، نرخ فرونشست تشدید شده است. این وضعیت در جایی که استخراج آب در سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخل که به‌صورت میان لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذ ناپذیر قرار داشته‌اند، صورت گرفته، موجب فرونشست گسترده شده است.

۴-نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بررسی‌ها می‌توان گفت که در دشت سلماس، بر اساس محاسبات درازمدت سالانه، به‌طور میانگین منابع آب زیرزمینی ۰.۴۴ متر افت کرده است. همچنین دشت سلماس با مساحت ۳۹۸ کیلومترمربع و ضریب ذخیره ۳ درصدی، با متوسط کسری ۵.۲۶ میلیون مترمکعب و در کل در درازمدت (بازه ۴۱ ساله) با ۲۱۵.۸۲ میلیون مترمکعبی منابع آب‌های زیرزمینی مواجه شده است. در ۴۱ سال گذشته سطح سفره آب‌های زیرزمینی به میزان ۱۸ متر افت کرده است که این رقم در سال ۹۳-۹۴، ۱.۲۳ متر بوده است. با در نظر گرفتن اینکه منطقه مطالعاتی بیشتر از لایه‌های رسی و سیلتی تشکیل شده، در نتیجه برداشت بیش‌ازحد ترمیم از آب‌های زیرزمینی با کاهش ایستابی و خروج آهسته آب از بین لایه‌های خاک همراه بوده است که این عمل باعث فشرده شدن آبخوان و کاهش حجم فضای خالی شده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفته که برداشت بیش‌ازحد از آبخوان‌های دشت سلماس موجب فرونشست در این دشت شده است. دستاورد حاصل از مدل سیستم استنتاج عصبی فازی نشان می‌دهد که توابع عضویت ذوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب با ۰.۸۶ و ۰.۸۱ درصد همبستگی رگرسیون نتیجه قابل‌اعتماد و اطمینان را ارائه می‌دهد و بر حسب این دو تابع عضویت به ترتیب، ۸.۶ و ۶.۳ درصد از مساحت کل منطقه در محدوده فرونشست با خطر بسیار زیاد قرار دارند. همچنین بر اساس نقشه تحلیل حساسیت ارائه شده، سواحل دریاچه ارومیه، کنگرلو، یالقوزآغاج، قره قشلاق، قزلجه، آقااسماعیل، خان تختی، آق زیارت، خانقاه و سیلاب با بحران فرونشست در آینده مواجه خواهند بود. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه ازیک‌طرف و کاهش نزولات جوی و به‌تبع از آن کاهش تغذیه مخزن آب زیرزمینی از طرف دیگر، سبب گردیده که سطح آب زیرزمینی دشت به‌طور مستمر افت نماید. در سال‌های گذشته با افزایش استخراج آب مناطقی همچون خانقاه با تغییرات ۲ سانتی‌متری، هدر ۱.۹۴، میدان دواب ۱.۴۸، یوشانلو ۱، ایان ۱.۵، تازه شهر ۱.۵۹ و خان تختی با ۵ سانتی‌متر افت در سال مواجه هستند. در مناطق شمالی و شمال شرقی استخراج آب با ماسه‌های ریز همراه است که نشان از کاهش و تا حدودی اتمام آب زیرزمینی در همان عمق است و با اکتشاف چاه‌های عمیق با کاهش آب استخراجی و پدیده فشردگی آبخوان و گاهی لوله زایی (در مناطق خان تختی) شرایط را برای وقوع فرونشست هموارتر می‌کند. شایان ذکر است که دشت سلماس یک محدوده فعال از نظر تکتونیکی است، لذا وقوع پدیده فرونشست در این

منطقه اگر همراه با فعالیت تکتونیکی نیز باشد، می‌تواند آثار مخرب فاجعه باری به همراه بیاورد؛ بنابراین پایش نرخ و دامنه فرونشست و اندازه‌گیری تغییرات و اثرات مورفولوژیکی ناشی از آن در چنین مناطقی می‌تواند گام مؤثری در کنترل نسبی پدیده فرونشست باشد.

References

Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., & Laczniak, R. J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, *27*(6), 483-486. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0483:STUADO%3E2.3.CO;2

Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, *10*, 525-538. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7

Cassiani, G., & Zoccatelli, C. (2000). Subsidence risk in Venice and nearby areas, Italy, owing to offshore gas fields; a stochastic analysis. *Environmental & Engineering Geoscience*, *6*(2), 115-128. https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.2.115

Chen, C. H., Wang, C. H., Hsu, Y. J., Yu, S. B., & Kuo, L. C. (2010). Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. *Engineering Geology*, *115*(1-2), 122-131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011

Dehghani, M., Rastegarfar, M., Ashrafi, R. A., Ghazipour, N., & Khorramrooz, H. R. (2014). Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain. *American Journal of Environmental Engineering*, *4*(2), 32-40. http://dx.doi.org/10.5923/j.ajee.20140402.03

Dousti Rezaie, M., Zeinalzadeh, K., Besharat, S., & Amirataee, B. (2022). Effects of Management and Climate Scenarios on Groundwater Level Changes: Case Numerical Modeling Study in Salmas Plain Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(2), 280-293. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.2.2.1

Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, *34*(10), 2573-2585. https://doi.org/10.1029/98WR01285

Ganguli, M. (2011). Groundwater withdrawal and land subsidence: a study of Singur Block, West Bengal, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, *2*(2), 465-471. http://dx.doi.org/10.32545/encyclopedia202008.0011.v2

Jahed Armaghani, D., Hajihassani, M., Monjezi, M., Mohamad, E. T., Marto, A., & Moghaddam, M. R. (2015a). Application of two intelligent systems in predicting environmental impacts of quarry blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*, 9647-9665. https://doi.org/10.1007/s12517-015-1908-2

Jahed Armaghani, D., Hajihassani, M., Sohaei, H., Tonnizam Mohamad, E., Marto, A., Motaghedi, H., & Moghaddam, M. R. (2015b). Neuro-fuzzy technique to predict air-overpressure induced by blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*, 10937-10950. http://dx.doi.org/10.1007%2Fs00366-015-0410-5

Karimzadeh, S., & Matsuoka, M. (2020). Remote Sensing X-Band SAR Data for land subsidence and pavement monitoring. *Sensors*, *20*(17), 4751. https://doi.org/10.3390/s20174751

Lashkaripour, G., Ghafoori, M., & Rostami Barani, H. R. (2009). An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain. *Scientific Semiannual Journal Sedimentary Facies*, *1*(1), 95-111. [In Persian] https://doi.org/10.22067/sed.facies.v1i1.697

Naderloo, L., Javadikia, H., & Mostafaei, M. (2017). Modeling the energy ratio and productivity of biodiesel with different reactor dimensions and ultrasonic power using ANFIS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 56-64. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.035

Nilzad, M., Moradi, H., & Jalili, K. (2018). Estimation of Temporal and Spatial variations of the Level of the Aquifers in Bisotun Plain of Kermanshah Province with Geostatistical Methods. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *8*(4), 79-92. [In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_76950.html

Niroumandfar, F., khozeymehnehad, H., & Khashei Siuki, A. (2020). Investigating management and hydrogeological criteria on ground level changes in the plain of Sarayan. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *10*(4), 210-228. [In Persian] https://doi.org/10.22125/iwe.2020.110087

Rajabi, M., & Bayati, K. M. (2011). Geomorphology of Northwest Iran. Tabriz: University of Tabriz. [In Persian].

Zarei, K., Rasoulzadeh, A., Seddighi, M., Ahmadzadeh, G., & Ramezani, J. (2020). Determination of the relationship between land subsidence and ground water level loss with radar interferometry and GPS station methods (Case study: Salmas Plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *11*(1), 168-182.[In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_114960_en.html

Vol.13, No.4, winter 2024, pp.74-101 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88146.1485 Open access

Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards

Farideh Saeidianpour[a], Ali Jafari[b*], Davood Mafi-Gholami[c]

[a] *MSc in Forest management, Shahrekord University, Shahrekord, Iran*
[b] *Associate Professor in Environment, Shahrekord University, Shahrekord, Iran*
[c] *Associate Professor in Forest management, Shahrekord University, Shahrekord, Iran*

Received: 31 May 2024 ***Revised: 1 September 2024*** ***Accepted: 3 October 2024***

Extended Abstract

Introduction

Despite the high importance of protected areas in providing ecosystem services essential to humans, the destruction and degradation of these unique areas have intensified, and this process continues. These damages and declines in the quality of protected areas occur due to various natural and man-made factors, including droughts, rising air temperatures, soil erosion, diseases, landslides, deforestation, agricultural land development, illegal hunting, and the destructive effects of pollutants and sewage. Therefore, planning and providing appropriate tools to mitigate the adverse effects of environmental hazards are crucial. The aim of this study is to evaluate the vulnerability of the Helen Forest Protected Area in Chaharmahal and Bakhtiari Province to multiple environmental hazards by combining sensitivity and exposure profiles. In fact, this research constitutes the first stage of the integrated vulnerability assessment process for the protected areas of Chaharmahal and Bakhtiari Province. The methods and results of this study will provide critical information regarding the intensity of exposure to multiple environmental hazards across the province's protected areas.

Material and Methods

Study Area: The Helen Forest Protected Area is located between 31°55´37´´ north

* .Corresponding author: Ali Jafari Email: jafari.ali@sku.ac.ir Tel:+989122499657

How to cite this Article: Saeidianpour, F., Jafari, a., Mafi-Gholami, D. (2024). Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards. *Journal of Geography and Environmental hazards*, 13(4), 74-101

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

latitude and 50°53´11´´ east longitude, with an area of 20,131 hectares in Chaharmahal and Bakhtiari Province, southwest Iran.

Methods:

To assess the vulnerability of the Helen Forest Protected Area to multiple environmental hazards, a field survey was conducted using systematic random sample plots of circular shape, each with an area of 1 hectare, located on a grid of 2000 m x 2000 m. Based on changes in canopy cover percentages derived from the plots, a sensitivity map of forest habitats was prepared and standardized. In the next phase, standardized maps for five environmental hazards—drought, evapotranspiration, wildfire, flood, and landslide—were created by analyzing climatic data, such as monthly precipitation and evapotranspiration rates, as well as the results of previous studies. Using the Delphi method and analyzing the opinions of five experts in forest habitat conservation, the relative weights of the environmental hazards were calculated. In the final stage, the standardized sensitivity and environmental hazard maps were multiplied by their calculated relative weights. By integrating the dimensionless weighted maps of environmental hazards and forest habitat sensitivity, a vulnerability classification map with three categories—low, moderate, and high—was produced.

Results and Discussion

The results of the calculated relative weights for each environmental hazard indicated that drought had the highest relative weight (0.95) among all the hazards studied, followed by wildfire (0.9). The integration of the weighted sensitivity maps of the habitats and the environmental hazards revealed that the vulnerability of the Helen Protected Forest Area ranged from 1.25 to 3.38. Variations in habitat sensitivity and hazard intensity across different parts of the area resulted in heterogeneity and a concentration of high vulnerability levels in specific sections of the study area.

The classification of the vulnerability map into three categories—low, medium, and high vulnerability—showed that 6,701.8 hectares (23%) fall into the low vulnerability category, 10,806.3 hectares (37%) fall into the medium category, and 11,664.4 hectares (51%) are classified as highly vulnerable.

This research offers a detailed spatial map of vulnerability patterns across the Helen Protected Area, providing critical information for conservation planning and the prioritization of management actions. These actions aim to prevent or mitigate damages caused by multiple environmental hazards in the region.

Conclusion

This study focused on assessing natural environmental hazards and the sensitivity of forest habitats. However, to achieve a comprehensive vulnerability assessment of the Helen Protected Area, it is essential to also examine man-made hazards. Therefore, future studies should investigate the effects of man-made hazards such as exploitation, livestock grazing, rural development, agriculture, and tourism on the forest habitats and protected area of Helen. Such studies could enhance understanding of the vulnerability dynamics in the region and improve conservation and management planning. Additionally, it is suggested that future studies consider other environmental hazards,

such as pests and diseases, to assess the vulnerability of the Helen Forest Protected Area. Furthermore, when analyzing changes in the structure and extent of forest habitats, area and density indicators should be employed as sensitivity criteria in vulnerability assessments.

Keywords: Environmental Vulnerability, Natural Hazards, Vulnerability Mapping, Helen Protected Area, Zagros, Ecosystem Services, Northwest of Iran.

How to cite this Article: Saeidianpour, F., Jafari, a., Mafi-Gholami, D. (2024). Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards. *Journal of Geography and Environmental hazards*, 13(4), 74-101



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۱۰۱-۷۴ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88146.1485 دسترسی آزاد

ارزیابی آسیب‌پذیری طبیعی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری به مخاطرات محیطی چندگانه

فریده سعیدیان پور- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران

علی جعفری[1]- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران

داوود مافی غلامی- دانشیار گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۳/۱۱ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۶/۱۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۷/۱۲

چکیده

هدف مطالعه حاضر بررسی آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن نسبت به مخاطرات محیطی چندگانه بود. برای این منظور، در مرحله نخست، آماربرداری میدانی در قالب قطعات نمونه سیستماتیک تصادفی انجام و نقشه درجه حساسیت رویشگاه‌های جنگلی منطقه بر اساس تغییرات درصد تاج پوشش تهیه و استاندارد شد. در مرحله بعد، نقشه‌های استانداردشده پنج مخاطره محیطی شامل خشکسالی، تبخیر و تعرق، آتش‌سوزی، سیلاب و زمین‌لغزش با تجزیه‌وتحلیل داده‌های اقلیمی شامل مقادیر بارندگی و تبخیر و تعرق ماهانه و نتایج مطالعات پیشین تهیه شدند. با اجرای روش دلفی و تجزیه‌وتحلیل نظرات ۵ نفر از متخصصان امر حفاظت از رویشگاه‌های جنگلی، وزن نسبی مخاطرات محیطی محاسبه شد. در مرحله آخر، نقشه‌های استاندارد شده حساسیت و مخاطرات محیطی در وزن نسبی محاسبه شده ضرب شدند و ضمن تلفیق نقشه‌های وزن‌دار بی‌مقیاس مخاطرات محیطی و حساسیت رویشگاه‌های جنگلی، نقشه طبقه‌بندی میزان آسیب‌پذیری در سه‌طبقه کم، متوسط و زیاد تهیه شد. نتایج مقادیر وزن نسبی محاسبه‌شده برای هر یک از مخاطرات محیطی نشان داد که خشکسالی بیشترین وزن نسبی (۰/۹۵) را در بین تمام مخاطرات موردبررسی دارد و پس‌ازآن آتش‌سوزی (با وزن نسبی ۰/۹) دومین رتبه را به خود اختصاص داد. تلفیق نقشه‌های وزن‌دار درجه حساسیت رویشگاه‌ها و مخاطرات محیطی نشان داد که میزان آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده

[1] نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۲۴۹۹۶۵۷ Email; Jafari.ali@sku.ac.ir

جنگلی هلن از ۱/۲۵ تا ۳/۳۸ متغیر بود. تفاوت در درجه حساسیت رویشگاه‌ها و شدت وقوع مخاطرات در بخش‌های مختلف منطقه سبب ایجاد ناهمگنی و تمرکز سطوح بالای آسیب‌پذیری در برخی از بخش‌های منطقه موردمطالعه شده است. طبقه‌بندی نقشه تغییرات سطح آسیب‌پذیری در سه‌طبقه با درجه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد نشان داد که به ترتیب ۶۷۰۱/۸، ۱۰۸۰۶/۳ و ۱۱۶۶۴/۴ هکتار از وسعت رویشگاه جنگلی منطقه حفاظت‌شده هلن در طبقات با درجه آسیب‌پذیری کم (۲۳ درصد)، متوسط (۳۷ درصد) و زیاد (۵۱ درصد) قرار دارد. این تحقیق با فراهم آوردن نقشه دقیق مکانی از الگوی مکانی آسیب‌پذیری در سطح منطقه حفاظت‌شده هلن اطلاعات حیاتی برای توسعه برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی برای جلوگیری یا کاهش صدمات ناشی از مخاطرات محیطی چندگانه را برای این منطقه فراهم نموده است.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری محیطی، مخاطرات محیطی، تهیه نقشه آسیب پذیری، منطقه حفاظت شده هلن، زاگرس، خدمات اکوسیستم، شمالغرب ایران.

۱- مقدمه

با وجود اهمیت بالای مناطق حفاظت شده در فراهم نمودن خدمات اکوسیستمی مورد نیاز انسان، تخریب و از بین رفتن این مناطق منحصربه‌فرد شدت یافته است و این روند همچنان ادامه دارد (Liu et al., 2001; Cabral, Saito, Pereira & Laques, 2018). این تخریب‌ها و افت کیفیت مناطق حفاظت‌شده تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسان‌ساخت مختلفی صورت می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به خشکسالی‌ها، افزایش دمای هوا، فرسایش، بیماری‌ها، زمین‌لغزش، جنگل‌زدایی و توسعه زمین‌های زراعی، شکار غیرمجاز و اثرات مخرب ناشی از آلاینده‌ها و فاضلاب‌های انسانی اشاره نمود (Pringle, 2017; Cabral et al., 2018). ازاین‌رو، انجام برنامه‌ریزی و فراهم آوردن ابزارهای مناسب برای کاهش اثرات نامطلوب مخاطرات محیطی، اجتناب‌ناپذیر است. دستیابی به هدف فوق در گرو آگاهی و اطلاعات کافی و دقیق درباره میزان آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده نسبت به وقوع مخاطرات محیطی چندگانه است که نتایج آن سازمان‌ها و مدیران متولی را به انتخاب گزینه‌های سازگار مناسب جهت تعدیل پیامدهای مخرب وارد آمده بر مناطق حفاظت شده رهنمون خواهند کرد و به راه‌کارهای لازم جهت دستیابی به پایداری آن‌ها می‌انجامد (Turner et al., 2003).

به‌طورکلی، بر اساس تقسیم‌بندی عوامل آسیب‌پذیری به عوامل اقتصادی و اجتماعی و بیوفیزیکی درونی و بیرونی، پنج رویکرد ریسک- مخاطره (Wilhelmi & Morss, 2013)، فشار و رهاسازی (Adger, 2006)، سیاسی- اقتصادی یا سیاسی- اکولوژیک (Bryant et al., 2013)، تاب‌آوری (Tidball & Stedman, 2013) و یکپارچه (Metzger, Leemans & Schröter, 2005) توسعه یافته است. بر اساس تعاریف موجود، آسیب‌پذیری سیستم‌ها تابعی از سه مؤلفه "در معرض قرارگرفتن" و "حساسیت سیستم نسبت به تنش و شرایط پرخطر خارجی" و "ظرفیت سیستم برای جذب و یا غلبه بر اثرات مربوط به تنش‌های ذکر شده" در مقیاس‌های گوناگون است (Smit & Wandel, 2006; Adger, 2006). در میان ابعاد تشکیل‌دهنده آسیب‌پذیری و براساس تعاریف صورت گرفته (Kasperson et al., 2005; Adger, 2006)، در معرض قرار گرفتن به‌عنوان درجه، طول مدت و گستره‌ای است که یک سیستم در تماس و یا تحت تأثیر آشفتگی‌ها یا تنش‌های محیطی قرار گرفته است. بول (Bohle, 2002) بیان نمود که در معرض قرار گرفتن بر خلاف دو مفهوم توان سازشی و حساسیت، از عناصر تشکیل‌دهنده سیستم نیست بلکه یک ویژگی از رابطه میان سیستم و آشفتگی‌ها است. اگر مفهوم در معرض قرارگرفتن جدا از مفهوم آسیب‌پذیری باشد، در معرض قرارگرفتن، یک خصوصیت نسبی و آسیب‌پذیری یک ویژگی از سیستم خواهد بود. نتیجتاً، آسیب‌پذیری یک سیستم، براساس حساسیت و توان سازش آن محاسبه می‌گردد و در معرض قرارگرفتن یک آشفتگی مشخص نیز به‌صورت مجزا تعیین خواهد شد (Gallopin, 2006). بر این اساس، شناسایی و نقشه‌بندی تنش‌های چندگانه مؤثر بر این سیستم‌ها یکی از جنبه‌های مهم در ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های طبیعی است؛ چراکه تغییر و تخریب رخ‌داده در اکوسیستم‌ها ناشی از بروز تنش‌های چندگانه طبیعی و انسانی وارد آمده بر آن‌ها است (Mafi-Gholami, Pirasteh, Ellison & Jaafari, 2021). ازاین‌رو در فرایند ارزیابی آسیب‌پذیری شناسایی و نقشه‌بندی تنش‌های چندگانه می‌تواند نقش قابل‌توجهی در دستیابی به هدف حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی و ارائه راه‌کارهای مدیریتی و برنامه‌ریزی مؤثر برای به حداقل رساندن اثرات مخرب ناشی از تنش‌های چندگانه داشته باشد (Turner et al., 2003).

در میان روش‌های مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری، رویکرد ریسک–مخاطره یکی از پرکاربردترین رویکردها است (Wilhelmi & Morss, 2013). این رویکرد بر اساس میزان مواجهه و احتمال وقوع طیفی از تنش‌ها و آشفتگی‌های محیطی توسعه یافته است. ریسک شامل یک رویداد فیزیکی، پدیده یا فعالیت انسانی است که به‌طور بالقوه آسیب‌رسان است و با گستردگی فضایی، شدت، فراوانی و احتمال وقوع شناخته می‌شود (Wilhelmi & Morss, 2013; Mafi-Gholami, Zenner, Jaafari, Bakhtyari & Bui, 2019). بر اساس این رویکرد، مطالعات مختلفی تلاش کرده‌اند تا ریسک و آسیب‌پذیری سیستم‌ها و مناطق مختلف را در برابر یک یا چندین مخاطره محیطی ارزیابی کنند. پورقاسمی و همکاران (Pourghasemi, Gayen, Panahi, Rezaie & Blaschke, 2019) احتمال وقوع سه مخاطره محیطی، یعنی زمین‌لغزش، سیل و زلزله، را در استان لرستان برآورد نمودند و نقشه احتمال چندگانه خطر را تهیه کردند. در مطالعه‌ای دیگر، رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2019) ریسک وقوع بهمن، سیل و زمین‌لغزش را در مناطق کوهستانی ایران با استفاده از داده‌های تاریخی وقوع این مخاطرات و طیفی از متغیرهای محیطی نقشه‌سازی نمودند. در حوزه ارزیابی آسیب‌پذیری، ارزیابی‌های آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی شامل تعیین حساسیت این مناطق به تغییرات فیزیکی نظیر تغییرات ناشی از تغییرات اقلیمی، اجتماعی–اقتصادی و اکولوژیکی و ارائه گزینه‌های سازگاری است (Pirasteh et al., 2024). بر این اساس، مطالعات مختلفی تلاش کرده‌اند تا آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی را نسبت به مخاطرات محیطی گوناگونی مانند خشکسالی (Callahan et al., 2022)، افزایش دمای هوا (Mildrexler, Yang, Cohen & Bell, 2016) یا مجموعه‌ای از مخاطرات اقلیمی (Pirasteh et al., 2024) ارزیابی کنند تا راه‌حل‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی مؤثری برای مدیریت پایدار این اکوسیستم‌ها را ارائه دهند. چالش اصلی در ارزیابی‌های آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی، در نظر گرفتن طیفی از مخاطرات محیطی چندگانه است که معمولاً به‌طور هم‌زمان در این اکوسیستم‌ها رخ می‌دهند (Saatchi et al., 2021). این امر از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است؛ چراکه رویکردهای تک فشار–تک پیامد نمی‌توانند تصویر دقیق از آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی را در دنیای واقعی ارائه دهند (Thakur et al., 2021). برای غلبه بر این مشکل، محققان مختلف سعی کرده‌اند طیفی از مخاطرات محیطی را در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی ادغام نمایند. مافی غلامی و همکاران (Mafi-Gholami et al., 2021) در ارزیابی

آسیب‌پذیری مانگروهای ایران در سواحل شمالی خلیج‌فارس و دریای عمان طیفی از مخاطرات محیطی چندگانه شامل خشکسالی، افزایش دمای هوا، بالا آمدن سطح آب دریا، فعالیت‌های انسانی و امواج طوفانی را در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری این رویشگاه‌ها تلفیق نمودند. در مطالعه انجام‌شده توسط پیراسته و همکاران (Pirasteh et al., 2024)، ارزیابی آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی کوهستانی ایران با در نظر گرفتن طیفی از مخاطرات محیطی چندگانه مانند خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، افزایش دمای هوا؛ طوفان، زمین‌لغزش، آفات، سیلاب، فرسایش و آتش‌سوزی انجام شد.

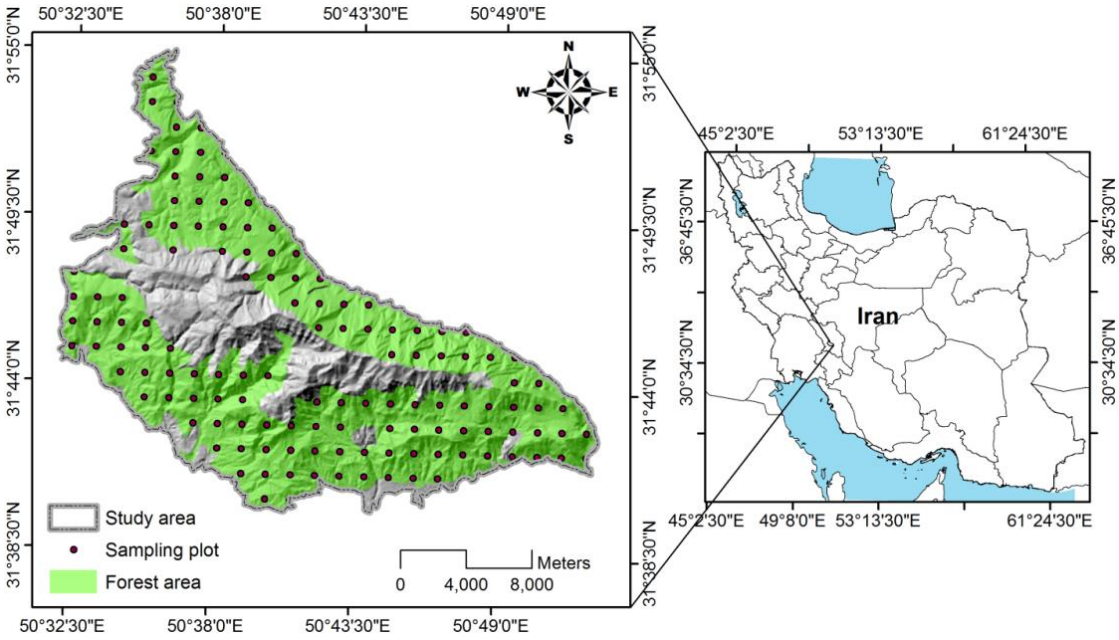
علی‌رغم اهمیت اجرای ارزیابی آسیب‌پذیری و نقشه‌سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های زاگرس و به‌ویژه رویشگاه‌های جنگلی استان چهارمحال و بختیاری، تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه در این رویشگاه‌ها انجام نشده است. لذا هدف این مطالعه ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری نسبت به مخاطرات محیطی چندگانه از طریق تلفیق نمایه‌های حساسیت و در معرض قرارگرفتن است. در واقع این تحقیق نخستین مرحله از اجرای فرآیند ارزیابی یکپارچه آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده استان چهارمحال و بختیاری خواهد بود که روش و نتایج حاصل از آن اطلاعات حیاتی مربوط به شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه را در سطح مناطق حفاظت‌شده این استان فراهم خواهد نمود.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن بین عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۷ ثانیه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه و ۱۱ ثانیه و ۵۰ درجه و ۳۲ دقیقه و ۸ ثانیه شرقی و با وسعتی معادل ۲۰۱۳۱ هکتار در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است (شکل۱). توپوگرافی منطقه کاملاً کوهستانی و ارتفاع از سطح دریا در این رویشگاه از حداقل ۱۱۶۸متر از پل ارمند تا ۳۲۲۵ متر در ارتفاعات کوه بزمنی متغیر است. منطقه از نظر ویژگی‌های آب‌وهوایی در اقلیم لردگان با آب و هوایی نیمه‌مرطوب با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد قرار دارد. میانگین بارش سالانه‌ی آن۸۰۰-۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای

سالانه ۱۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است. اراضی جنگلی و مرتعی به ترتیب با ۳۰ و ۱۰ هزار هکتار، پوشش عمده منطقهٔ هلن را تشکیل می‌دهند. گونهٔ درختی غالب آن بلوط ایرانی است، اما گونه‌های گیاهی دیگری نظیر بادام، ارژن، گون، بنه، کلخونک، کلاه میرحسن، زالزالک، پلاخور، شکرتیغال و دافنه نیز در منطقه مشاهده می‌شوند (Darvishsefat, 2006).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در استان چهارمحال و بختیاری و موقعیت پلات‌های نمونه‌برداری بر روی آن

Fig.1. Geographical location of Helen Forest protected area in Chaharmahal and Bakhtiari province and the location of the sampling plots

۲-۲- روش انجام پژوهش

۲-۲-۱- نقشه‌بندی درجه حساسیت منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن بر اساس درصد تاج پوشش

در این پژوهش، برای نقشه‌بندی درجه حساسیت و آسیب‌پذیری منطقه موردبررسی از تغییرات درصد تاج پوشش استفاده شد. تاج پوشش به‌عنوان یکی از شاخص‌های اکولوژیکی، منعکس‌کننده تبادل انرژی، آب و دی‌اکسید کربن بین رویشگاه‌های جنگلی و محیط پیرامون و یکی از پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی

سلامت و ویژگی‌های ساختاری مناطق جنگلی است (Korhonen, Korpela, Heiskanen & Maltamo, 2011; Mafi-Gholami et al., 2019). بدین منظور در اولین مرحله اقدام به آماربرداری زمینی و ثبت قطر تاج درختان بلوط در منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن شد. برای این منظور تعداد ۷۱ قطعه نمونه دایره‌ای شکل یک آری به روش سیستماتیک-تصادفی با ابعاد شبکه ۲۰۰۰ ×۲۰۰۰ متر برای ثبت اندازه قطر تاج در سطح منطقه بر اساس ملاحظات آماری، اکولوژیکی و عملیاتی طراحی شد. درنهایت با حذف قطعات نمونه واقع در عرصه‌های فاقد درخت و دارای میزان شیب بیش از ۷۰ درصد (عرصه‌های حمایتی)، تعداد ۶۰ قطعه نمونه با استفاده از GPS در سطح رویشگاه‌های جنگلی منطقه حفاظت‌شده هلن برای اندازه‌گیری تاج درختان پیاده شدند. در سطح هر یک از قطعه‌های نمونه، اندازه دو قطر عمود بر هم تاج درختان با استفاده از متر نواری با دقت سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و بر اساس متوسط قطر تاج درختان، درصد تاج‌پوشش در قطعه‌های نمونه با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

رابطه (۱) $$\mathbf{cc_i = \frac{\pi}{4}(CD_{1i} \times CD_{2i})}$$

در رابطه ۱: cc_i : سطح تاج درخت به متر مربع؛ CD_{1i} و CD_{2i} قطر بزرگ و کوچک درخت i به متر است.

رابطه (۲) $$cc\% = \frac{\sum_{i=1}^{n} cc_i}{A} \times 100$$

در رابطه ۲: cc%: درصد تاج پوشش در قطعه نمونه؛ cc_i : سطح تاج درخت به متر مربع و A: مساحت قطعه نمونه به متر مربع است (Askari, Zobeiri & Sohrabi, 2013).

سپس با استفاده از مقادیر درصد تاج پوشش محاسبه شده در قطعات نمونه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه تغییرات درصد تاج پوشش در سطح منطقه که نشان‌دهنده تغییرات درجه حساسیت پوشش جنگلی نیز می‌باشد، تهیه شد.

۲-۲-۲- نقشه‌بندی مخاطرات محیطی چندگانه در سطح منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن

- نقشه‌بندی مخاطره خشکسالی

شاخص بارش استاندارد (SPI) به دلیل کاربرد آسان، سازگاری مکانی و انعطاف‌پذیری زمانی به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی رویدادهای خشکسالی و مدیریت ریسک مرتبط با آن‌ها در سراسر نقاط جهان مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang et al., 2012; Tamassoki, Soleymani, Bahrami & Abbasgharemani, 2014). برای محاسبه این شاخص از سری زمانی ۱۵ ساله داده‌های بارندگی ماهانه (۱۳۸۵–۱۴۰۰) مربوط به پنج ایستگاه سینوپتیک شهرکرد، بروجن، کوهرنگ، لردگان و ایذه که دارای پراکنش مناسب در پیرامون منطقه موردمطالعه بودند از سازمان هواشناسی کشور استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار DIP و تبدیل داده‌های بارندگی ماهانه به فرمت txt و در نظر گرفتن مقیاس زمانی یکساله، مقادیر SPI یکساله هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک محاسبه شد (Mafi-Gholami, 2015). مقدار SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف بیان‌کننده مقیاس زمانی اثرات خشکسالی بر روی منابع آبی است. مقادیر SPI با مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماهه) نشان‌دهنده تغییرات در رطوبت خاک است که در بخش کشاورزی دارای اهمیت بسیار است و مقادیر SPI با مقیاس‌های زمانی بلندتر (۶ ماهه، یکساله و بیشتر) نشان‌دهنده تغییرات بلندمدت در مقادیر آب‌های جاری سطحی و زیرزمینی و ذخایر و منابع آبی است که در زمینه تأثیر تغییرات بارندگی بر اکوسیستم‌های طبیعی و مدیریت منابع آب در سکونتگاه‌های انسانی دارای اهمیت است (Wu, Hayes, Weiss & Hu, 2001). ماه سپتامبر (پایان فصل تابستان) زمانی است که گیاهان و درختان به اوج نیاز آبی خود رسیده‌اند و بنابراین محاسبه شاخص‌های خشکسالی در این زمان می‌تواند به بهترین نحو تأثیرات کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی را بر ساختار و سطح سلامت جنگل‌ها نشان دهند. به‌عبارت‌دیگر، سپتامبر زمانی است که اثرات تجمعی خشکسالی بر روی پوشش گیاهی و منابع آب جنگل‌ها بیشترین وضوح را دارد (Mafi-Gholami et al., 2019). برای محاسبه SPI، آمار درازمدت داده‌های بارندگی هر ایستگاه با تابع توزیع گاما برازش یافته و تابع حاصل برای پیدا کردن احتمال تجمعی بارندگی آن ایستگاه و برای ماه معین و مقیاس زمانی موردنظر، استفاده می‌شود. SPI یک مقدار نرمال‌شده با میانگین صفر و انحراف معیار یک است و ازاین‌رو، SPI مقدار انحراف استانداردی است که یک رویداد مشخص از شرایط نرمال، منحرف می‌شود. مقادیر SPI مثبت نمایانگر بارش بیشتر از مقدار بارش متوسط و مقادیر منفی آن بیانگر بارش کمتر از مقدار متوسط آن است (McKee, Doesken & Kleist, 1995). تابع توزیع گاما به‌صورت رابطه (۳) است:

رابطه (۳) $g\ (x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \chi^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \qquad \text{for } x > 0$

که در این رابطه: $\alpha>0$: پارامتر شکل؛ $\beta>0$: پارامتر مقیاس؛ $x>0$: مقدار بارندگی و $\Gamma(\alpha)$: تابع گاما است.

در این مطالعه تعداد کم و پراکنش مکانی ایستگاه‌های موردبررسی، امکان محاسبه یک مدل سمی‌واریوگرام مطلوب را میسر نمی‌ساخت، چنانچه میرونن (Meirvenne, 1998) نیز اجرای روش کریجینگ را برای تعداد کم نمونه و با تغییرات مکانی زیاد نامناسب دانسته است. ازاین‌رو در این مطالعه نیز مانند مطالعه انجام‌شده توسط روبینسون و مترنیچت (Robinson & Metternicht, 2006) و چن و لیو (Chen & Liu, 2012)، روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)[1] که یکی دیگر از روش‌های مناسب درون‌یابی است برای محاسبه شدت خشکسالی در سطح منطقه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.7 مورد استفاده قرار گرفت. درنهایت، شدت وقوع خشکسالی در سطح منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن نقشه‌بندی شد و از نقشه فازی‌سازی شده آن جهت تهیه نقشه ریسک وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح منطقه استفاده شد.

- **نقشه‌بندی مخاطره شدت تبخیر و تعرق**

برای نقشه‌بندی این مخاطره نیز از مقادیر میانگین مربوط به سری زمانی ۱۵ ساله مقادیر تبخیر و تعرق سالانه دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۵–۱۴۰۰) مربوط به پنج ایستگاه سینوپتیک شهرکرد، بروجن، کوهرنگ، لردگان و ایذه استفاده شد. با استفاده از دستور IDW در نرم‌افزار Arc GIG و به‌کارگیری مقادیر میانگین تبخیر و تعرق سالانه هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک، تغییرات شدت تبخیر و تعرق در سطح منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن نقشه‌بندی شد و از نقشه فازی‌سازی شده آن برای تهیه نقشه ریسک وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح منطقه استفاده گردید.

- **نقشه‌بندی مخاطرات سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی**

در این مطالعه برای تهیه نقشه‌های ریسک سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی در سطح منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن از نتایج مطالعات انجام شده (Khosravi et al., 2020; Ngo et al., 2021; Jaafari, Rahmati,

[1] Inverse Distance Weighted

(Zenner & Mafi-Gholami, 2022) استفاده شد. نقشه‌های ریسک سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی تهیه شده در مطالعات فوق دارای فرمت رستری و اندازه سلول ۳۰×۳۰ متر بودند. نقشه‌سازی ریسک این سه مخاطره بر مبنای استفاده از نقاط شاهد وقوع این مخاطرات در سال‌های گذشته و تحلیل رابطه میان موقعیت مکانی این نقاط با متغیرهای محیطی با استفاده از روش‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین بوده است. با استفاده از مرز منطقه موردمطالعه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه ریسک وقوع سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی در سطح منطقه برش داده شد و از نقشه فازی‌سازی شده آن‌ها برای تهیه نقشه ریسک وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح منطقه استفاده گردید.

۲-۲-۳- تعیین وزن نسبی مخاطرات محیطی

وزن نسبی هر یک از مخاطرات محیطی با استفاده از روش دلفی بسته طی یک فرایند چهار مرحله‌ای مطابق حسن‌زاده و همکاران (Hasanzadeh, Danehkar & Azizi, 2013) و مافی غلامی و همکاران (Mafi-Gholami, Feghhi, Danehkar & Yarali, 2015) شامل طراحی پرسش‌نامه، انتخاب متخصصان، ارسال و دریافت پرسش‌نامه‌ها به‌دفعات لازم و تجزیه‌وتحلیل نهایی پرسش‌نامه‌ها تعیین شد. به‌طورکلی، در روش دلفی چارچوب مشخصی در مورد نحوه انتخاب و تعداد متخصصان وجود ندارد و فاکتورهای متعددی مانند هدف تحقیق، کیفیت تصمیم، توانایی گروه تحقیق در اداره کردن فرایند مطالعه، زمان جمع‌آوری داده‌ها و منابع در دسترس و نیز پذیرش پاسخ، در تعیین تعداد اعضای گروه تأثیرگذار است (Manca et al., 2007). به‌طورکلی تعداد شرکت‌کنندگان در روش دلفی از ۵ تا ۲۰ نفر متغیر است (Landeta, 2006)، اما در گروه‌های همگن تعداد ۱۰ تا ۱۵ نفر کافی است و در شرایط آرمانی حتی گروه‌های چهارنفره هم می‌توانند عملکرد مناسبی داشته باشند (Windle, 2004). درنهایت، شناسایی و انتخاب متخصصان با استفاده از روش‌های مختلفی مانند قضاوت و تصمیم‌گیری مدیریت اصلی پروژه، موقعیت سازمانی افراد و مرور نویسندگان مقالات انجام می‌شود (Okoli & Pawlowski, 2004). در این مطالعه نیز با نظر مدیریت پروژه اقدام به انتخاب دقیق ۵ نفر از متخصصانی گردید که دارای سابقه علمی و عملی کافی در حوزه حمایت و حفاظت از رویشگاه‌های جنگلی زاگرس و مدیریت منابع طبیعی (حداقل ۱۰ سال سابقه فعالیت) بودند و نظرات خود را در زمینه درجه اهمیت مخاطرات معرفی شده بیان کردند.

به‌طورکلی قانون مشخصی در زمینه تعداد تکرارهای ارسال پرسش‌نامه وجود ندارد و آنچه تعیین‌کننده تعداد تکرارهاست، سطحی از توافق نظر نهایی است که موردپذیرش گروه ناظر بر اجرای فرایند دلفی قرار می‌گیرد (Bederman, McIsaac, Coyte, Kreder & Wright, 2010). ازاین‌رو، در مطالعه صورت گرفته توسط میلر (Miller, 2001) بیان شده است که در صورت انتخاب صحیح و آگاهانه متخصصان توسط گروه ناظر بر اجرای فرایند دلفی، تکرار ارسال پرسش‌نامه تغییر قابل‌توجهی را در سطح توافق نظر صورت گرفته در مورد گزینه‌های مطرح شده ایجاد نخواهد کرد و باوجوداین توافق نظر میان متخصصان می‌توان ارسال پرسش‌نامه‌ها را تنها در یک مرحله انجام داد. در این مطالعه، مطابق با روش به کاررفته توسط بدرمن و همکاران (Bederman et al., 2010) مفهوم اجماع نظر به‌صورت شرط همگنی و یا سازگاری عقیده میان متخصصان تعریف شد. آلفای کرونباخ یکی از شاخص‌های آماری است که برای ارزیابی سازگاری توافق نظر میان متخصصان در روش دلفی مورد استفاده قرار گرفته است (Cronbach, 2004Bederman et al., 2010). محاسبه این شاخص به‌صورت رابطه (۴) است:

رابطه (۴) $$\alpha_x = k/k-1(1-\sum \sigma_{y_i}^2/\sigma_x^2)$$

در این رابطه k: تعداد متخصصان؛ $\sigma_{y_i}^2$: واریانس مربوط به هر یک از پاسخ‌های هر یک از متخصصان و σ_x^2: واریانس مجموع پاسخ‌های مربوط به هر یک از متخصصان است. مقدار آلفای کرونباخ بین مقادیر ۰ تا ۱ متغیر است. مقادیر نزدیک به صفر، بیان‌کننده عدم توافق نظر میان متخصصان در تخصیص رتبه مشابه به یک گزینه مشخص است؛ درحالی‌که مقدار شاخص برابر با یک نشان‌دهنده توافق نظر کامل میان متخصصان در رتبه‌بندی است (Cronbach, 2004). در این مطالعه مقدار آلفای کرونباخ در دور نخست برابر با ۰/۹۳ به‌دست آمد که نشان‌دهنده اتفاق‌نظر زیاد میان متخصصان در رتبه‌بندی مخاطرات موردنظر بود؛ بنابراین، در این مطالعه، پرسش‌نامه‌ها تنها یک‌مرتبه برای رتبه‌بندی گزینه‌ها برای متخصصان ارسال شد.

۲-۲-۴- اولویت‌بندی مخاطرات محیطی

آماره‌های اصلی مورد استفاده در مطالعات دلفی برای تجزیه‌وتحلیل نظرات متخصصان در پرسش‌نامه‌ها شامل اندازه‌های مرکزی (میانگین، میانه و نما) و شاخص‌های پراکندگی (انحراف معیار و محدوده میان چارکی)

است (Kennedy, 2004)، که در این میان، استفاده از میانه و نما و میانگین نتایج مطلوب‌تری را به‌دست می‌دهد (Windle, 2004). در این مطالعه نیز بر اساس شیوه به‌کاررفته توسط حسن‌زاده و همکاران (Hasanzadeh et al., 2013) و مافی غلامی (Mafi-Gholami, 2015) برای جمع‌بندی آرای پرسش‌شوندگان از آماره میانگین برای محاسبه امتیاز وزن‌دار هر عامل اثرگذار و درنهایت درصد و درجه اهمیت آن استفاده شد. تعداد انتخاب‌های صورت‌گرفته برای هر درجه اهمیت به‌عنوان امتیاز آن درجه اهمیت (ni) در نظر گرفته شد. وزن عوامل نیز در دامنه بین ۰ تا ۱۰ در نظر گرفته شد و چنان‌که ذکر شد هر درجه اهمیت معرف یک دامنه از وزن است. برای هر عامل دو مؤلفه آماری شامل درصد (P) و درجه (D) اهمیت محاسبه شد. به‌منظور تعیین درصد اهمیت (P) ابتدا حداکثر امتیاز وزن‌دار قابل حصول (A)، از ضرب بالاترین امتیاز قابل‌انتظار (برابر با مجموع تعداد پرسش‌شوندگان (N) است) در حداکثر وزن تعدیل شده (W=10) به‌دست آمد (رابطه ۵). سپس از تقسیم نمودن مقدار حداکثر وزن تعدیل شده (W) بر مجموع وزن‌های هر عامل ($\sum x_i$)، ضریب وزن تعدیل‌شده (y_i) محاسبه شد (رابطه ۶). با استفاده از ضریب وزن تعدیل‌شده (y_i) و امتیاز هر معیار (n_i)، امتیاز وزن‌دار (z_i) حاصل شد (رابطه ۷). از تقسیم نمودن مجموع امتیاز وزن‌دار هر عامل بر حداکثر امتیاز وزن‌دار قابل حصول آن (A)، درصد اهمیت آن عامل به‌دست آمد (رابطه ۸). درنهایت، میانگین وزنی اهمیت هر تنش و یا آشفتگی از مجموع حاصل‌ضرب امتیاز در وزن (درجه اهمیت) تقسیم‌بر مجموع کل امتیازها (برابر با تعداد کل پرسش‌شوندگان که در این مطالعه برابر با ۵ بود) محاسبه و به‌عنوان درجه اهمیت (D) هر عامل اثرگذار در نظر گرفته شد (رابطه ۹).

رابطه (۵) $$A = N \times W$$

رابطه (۶) $$y_i = \frac{W}{\sum x_i} \times x_i$$

رابطه (۷) $$z_i = y_i \times n_i$$

رابطه (۸) $$P = \frac{\sum z_i}{A} \times 100$$

رابطه (۹) $$D = \frac{\sum (x_i \times n_i)}{N}$$

در این مرحله، برای هر یک از مخاطرات موردبررسی، ضریب اهمیت نرمال‌شده (NIC)[1] یا همان وزن نسبی محاسبه شد. به‌این‌ترتیب که حاصل‌ضرب درصد و درجه اهمیت هر عامل (ضریب اهمیت) بر مقدار مجموع ضرایب اهمیت کلیه عوامل تقسیم‌شده و مقدار نرمال‌شده ضریب اهمیت (وزن نسبی) به دست آمد (رابطه ۱۰).

$$NIC = \frac{P \times D}{\sum(P \times D)}$$ رابطه (۱۰)

در این رابطه NIC عبارت از ضریب اهمیت نرمال‌شده، P عبارت از درصد اهمیت و D عبارت از درجه اهمیت هر مخاطره هستند.

۲-۲-۵- نقشه‌بندی تغییرات مکانی آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن

در این مرحله، نقشه‌های فازی‌سازی شده هر یک از مخاطرات محیطی پس از ضرب در وزن نسبی محاسبه شده با استفاده از روش دلفی در نرم‌افزار ArcGIS با یکدیگر ادغام شدند. با توجه به این‌که با افزایش مقدار تاج پوشش از درجه حساسیت رویشگاه‌های جنگلی نسبت به تنش‌ها و آشفتگی‌های محیطی گوناگون کاسته می‌شود، نقشه تغییرات وقوع مخاطرات محیطی چندگانه با معکوس نقشه فازی‌سازی شده تغییرات درصد تاج پوشش در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از رابطه (۱۱) یکدیگر ادغام شدند:

$$VI = \frac{EI + (1 - SI)}{2}$$ رابطه (۱۱)

در این رابطه VI نمایه آسیب‌پذیری، EI ریسک مخاطرات چندگانه و SI حساسیت منطقه موردمطالعه است.

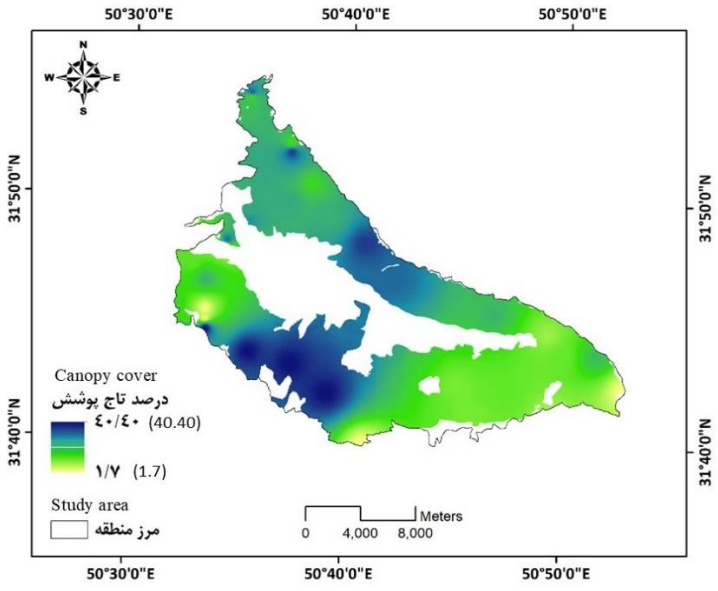
درنهایت نقشه طبقه‌بندی‌شده آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن نسبت به وقوع مخاطرات محیطی چندگانه بر اساس مقادیر انحراف معیار در سه‌طبقه با درجه آسیب‌پذیری کم (<۱/۳۷۶)، متوسط (۱/۶۱۹-۱/۳۷۶)، زیاد (>۰/۶۱۹) تهیه شد.

[1] Normalized Importance Coefficient (NIC)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج نقشه‌بندی درجه حساسیت

اندازه‌گیری قطر تاج درختان در قطعه‌های نمونه نشان داد که مقدار متوسط این متغیر رویشی در منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن برابر با ۳۱۵/۲ سانتی‌متر بود و مقادیر حداقل و حداکثر این متغیر رویشی در منطقه نیز به ترتیب برابر با ۸۰۰ سانتی‌متر و ۱۱۵ سانتی‌متر بود. مقدار میانگین وسعت تاج در منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن برابر با ۲۰/۳۵ متر مربع محاسبه شد. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار درصد تاج‌پوشش در منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن به ترتیب ۴۰/۴ متر مربع و ۱/۷ متر مربع بود. بر اساس وسعت تاج محاسبه‌شده در قطعه‌های نمونه، میانگین درصد تاج‌پوشش در منطقه حفاظت شده جنگلی هلن برابر با ۲۰/۳۵ درصد بود. طبقه‌بندی درجه حساسیت منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن بر اساس نقشه تغییرات میانگین درصد تاج‌پوشش در سطح رویشگاه جنگلی نشان داد که متناسب با تغییرات درصد تاج پوشش، بخش مرکزی رویشگاه جنگلی منطقه دارای درجه حساسیت بالاتری نسبت به سایر بخش‌های آن هستند. نتایج همچنین نشان داد که بخش‌های غربی و شرقی دارای درجه حساسیت پایین هستند (شکل ۲).

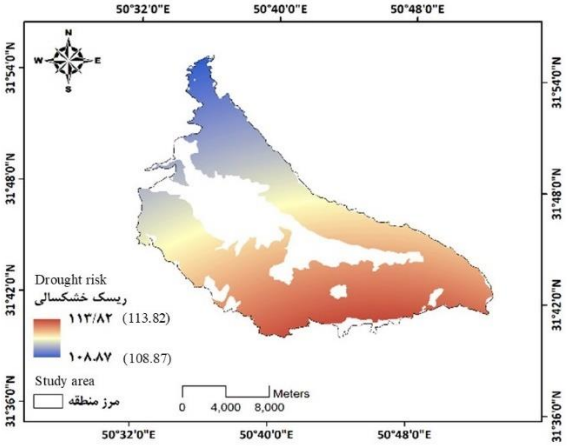


شکل ۲- تغییرات درصد تاج پوشش در سطح منطقه حفاظت شده جنگلی هلن

Fig.2. Canopy cover changes in Helen Forest protected area

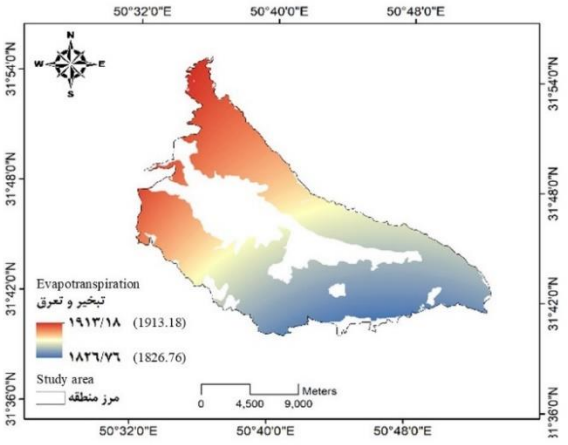
۳-۲- نتایج نقشه‌سازی مخاطرات محیطی چندگانه

شکل‌های شماره ۳ تا ۷ به ترتیب نقشه‌های مربوط به تغییرات مقادیر وقوع مخاطرات پنج‌گانه شامل خشکسالی، تبخیر و تعرق، سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی را در سطح منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهند. تلفیق نقشه‌های استاندارد شده وزن‌دار مخاطرات موردبررسی و تهیه نقشه در معرض قرارگرفتن نشان داد که بخش‌های شرقی و غربی در معرض بیشترین ریسک مخاطرات موردبررسی قرار دارند (آسیب‌پذیری زیاد) و در مقابل، بخش‌های جنوبی و شمالی در معرض کمترین ریسک قرار دارند (آسیب‌پذیری کم و متوسط).



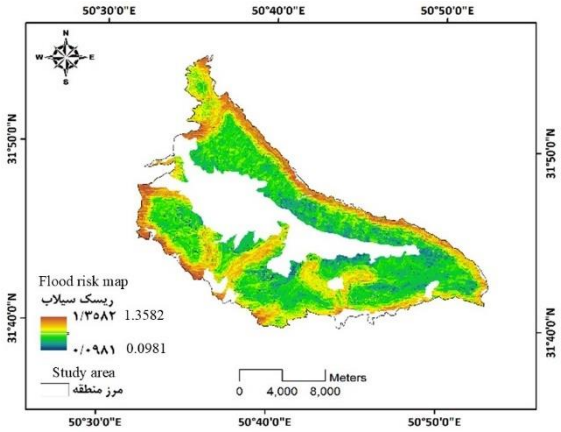
شکل ۳- نقشه ریسک وقوع خشکسالی

Fig. 3. Drought risk map



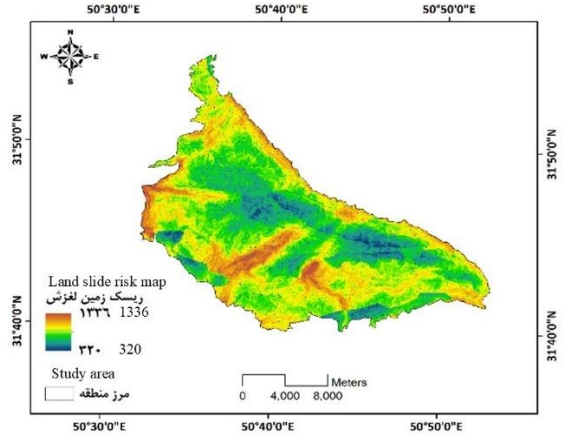
شکل ۴- نقشه تبخیر و تعرق

Fig. 4. Evapotranspiration map



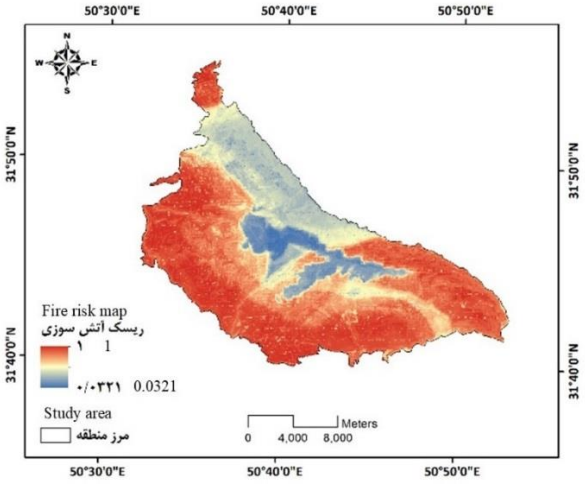
شکل ۵- نقشه ریسک سیل

Fig. 5. Flood risk map



شکل ۶- نقشه ریسک زمین‌لغزش

Fig.6. Landslide risk map

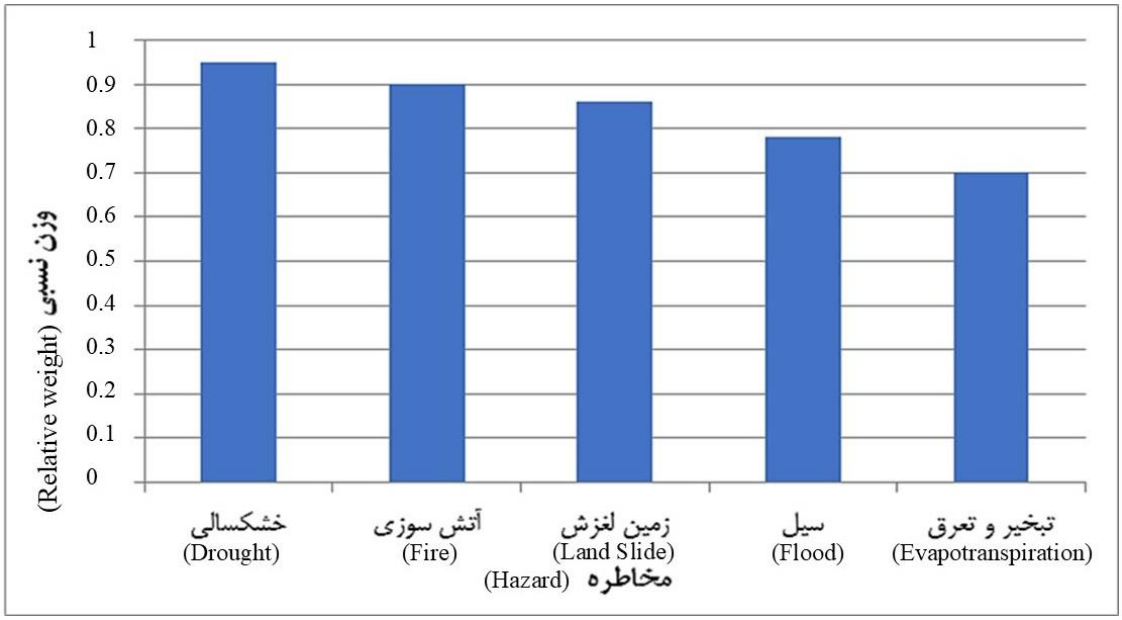


شکل ۷- نقشه ریسک آتش‌سوزی

Fig.7. Fire risk map

۳-۳- نتایج محاسبه وزن نسبی مخاطرات محیطی

محاسبه مقادیر ضریب اهمیت نرمال‌شده (وزن نسبی) بر اساس درصد و درجه اهمیت نشان داد که مخاطرات خشکسالی، آتش‌سوزی، زمین‌لغزش، سیل و تبخیر و تعرق به ترتیب دارای وزن نسبی برابر با ۰/۹۵، ۰/۸۲، ۰/۷۱، ۰/۵۸ و ۰/۳۲ بودند. بر این اساس خشکسالی بیشترین وزن نسبی را در بین تمام مخاطرات موردبررسی داشت و پس‌ازآن نیز در بین مخاطرات موجود، دومین رتبه را به خود اختصاص داد. نتایج همچنین نشان داد که مخاطره تبخیر و تعرق در سطح منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن در رتبه آخر قرار دارد. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت کمتر این مخاطره در وارد آوردن اثرات نامطلوب محیطی بر منطقه موردمطالعه نسبت به سایر مخاطرات محیطی موردبررسی بود (شکل ۸).



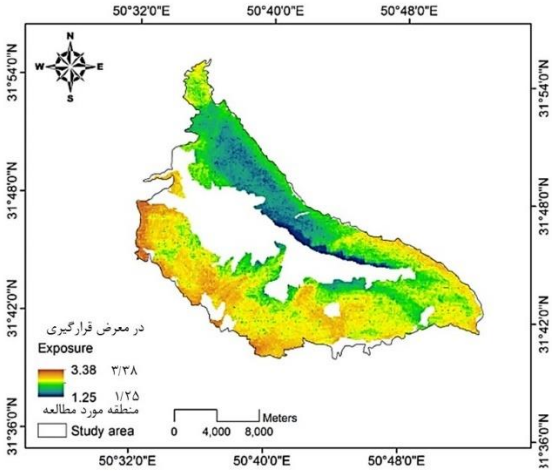
شکل ۸- وزن نسبی مخاطرات محیطی محاسبه‌شده با استفاده از روش دلفی

Fig.8. Relative weight of environmental hazards using Delphi method

۳-۴- نقشه‌بندی تغییرات مکانی آسیب‌پذیری

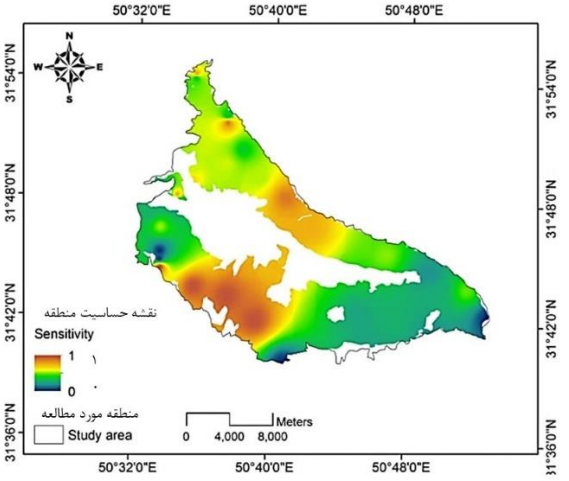
تلفیق نقشه‌های وزن‌دار فازی پنج نوع مخاطره محیطی شامل خشکسالی، تبخیر و تعرق، سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی (شکل ۹) و نقشه فازی تغییرات درجه حساسیت رویشگاه جنگلی منطقه حفاظت‌شده هلن (شکل ۱۰) در محیط نرم‌افزار ArcGIS نشان داد که طیفی از تغییرات مکانی آسیب‌پذیری در بخش‌های مختلف منطقه وجود دارد (شکل ۱۱). میزان آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن از ۱/۲۵ تا ۳/۳۸ متغیر است. طبقه‌بندی نقشه تغییرات سطح آسیب‌پذیری در سطح رویشگاه جنگلی منطقه حفاظت‌شده هلن در سه‌طبقه با درجه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد نشان داد که میزان آسیب‌پذیری در بخش‌های شرقی و غربی منطقه بیشتر از سایر بخش‌های آن است (آسیب‌پذیری زیاد). در مقابل، میزان آسیب‌پذیری در بخش‌های جنوبی و شمالی کمتر از سایر بخش‌های منطقه حفاظت‌شده است (آسیب‌پذیری کم و متوسط). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ۶۷۰۱/۸ و ۱۰۸۰۶/۳ و ۱۱۶۶۴/۴ هکتار از وسعت رویشگاه جنگلی منطقه

حفاظت‌شده هلن به ترتیب در طبقات با درجه آسیب‌پذیری کم (۲۳ درصد)، متوسط (۳۷ درصد) و زیاد (۵۱ درصد) قرار دارد (شکل ۱۲).



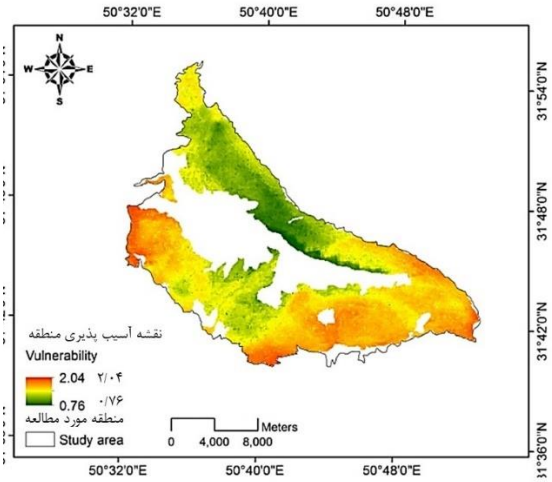
شکل ۹- نقشه قرارگیری منطقه در معرض مخاطرات

Fig.9. Study area exposure map



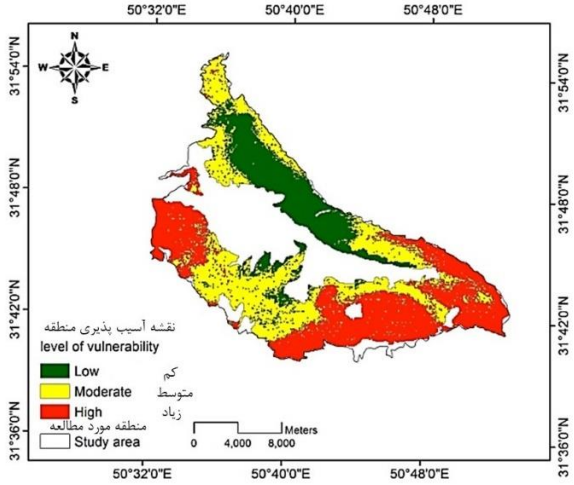
شکل ۱۰- نقشه حساسیت منطقه موردمطالعه

Fig.10. Study area sensitivity map



شکل ۱۱- نقشه تغییرات آسیب‌پذیری منطقه

Fig.11. Study area vulnerability map



شکل ۱۲- نقشه طبقه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه

Fig.12. Study area vulnerability classification

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تعیین وزن نسبی مخاطرات محیطی چندگانه‌شان داد که با توجه به آگاهی متخصصان از وضعیت کنونی منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن، از میان پنج مخاطره محیطی خشکسالی، تبخیر و تعرق، آتش‌سوزی، سیل و

زمین‌لغزش، دو مخاطره آتش‌سوزی و خشکسالی درمجموع از اهمیت بالاتری نسبت به سایر مخاطرات محیطی مؤثر بر این منطقه حفاظت‌شده برخوردار بودند. البته این نتایج چندان دور از انتظار نبود چنانکه سایر محققان و متخصصان نیز در میان عوامل گوناگون اثرگذار در تقلیل کنونی و آینده مورد انتظار در وسعت و سلامتی رویشگاه‌های جنگلی زاگرس، مخاطرات آتش‌سوزی و خشکسالی را دلیل افت و کاهش سطح این اکوسیستم‌ها بیان نموده‌اند (Jafari & Arman, 2014; Ahmadi, 2019). ذکر این نکته ضروری است که پایین‌بودن ضرایب اهمیت برخی از تنش‌ها و آشفتگی‌ها نشان‌دهنده ناچیزبودن تأثیر آن‌ها بر منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن نیست چنانکه وقوع تنش‌ها و آشفتگی‌هایی مانند تبخیر و تعرق که در اولویت‌های آخر به لحاظ وزن نسبی قرار دارند، می‌توانند اثرات مخربی را بر ساختار و عملکرد این اکوسیستم‌ها وارد آورند اما با توجه به نظر متخصصان و بر اساس وضعیت محیطی منطقه موردمطالعه، هنوز در اولویت قرار ندارند.

این مطالعه با هدف نقشه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده هلن، از طریق ترکیب دو بخش نقشه‌بندی شدت مخاطرات محیطی و نقشه‌بندی درجه حساسیت رویشگاه جنگلی منطقه انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر درجه آسیب‌پذیری هر یک از بخش‌های منطقه حفاظت‌شده، نمایانگر تأثیر هم‌زمان میزان حساسیت و شدت مخاطرات چندگانه مؤثر بر این منطقه است. به‌طور خاص، نقشه نهایی درجه آسیب‌پذیری نشان داد که بخش‌های شرقی و غربی منطقه دارای آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها هستند. این امر به دلیل درجه حساسیت بالاتر و شدت بیشتر مخاطراتی همچون خشکسالی، تبخیر و تعرق، سیل، زمین‌لغزش و آتش‌سوزی در این بخش‌ها است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مطالعات مشابه در دیگر مناطق نشان می‌دهد که روش ترکیبی نقشه‌بندی شدت مخاطرات و درجه حساسیت، می‌تواند به‌طور مؤثری در شناسایی مناطق با اولویت بالاتر برای اقدامات مدیریتی و حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، مطالعه مشابهی در منطقه حفاظت‌شده حرا نشان داد که استفاده ازاین‌روش می‌تواند بهبود چشمگیری در شناسایی و اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر داشته باشد (Sobhani & Danehkar, 2023). همچنین، نتایج این تحقیق همسو با نتایج مطالعه کومار و همکاران (Kumar et al., 2021) و هو و همکاران (Hu, Ma, Huang & Guo, 2021) است که

نشان دادند ترکیب عوامل محیطی و حساسیت رویشگاه‌ها می‌تواند به درک بهتری از دینامیک آسیب‌پذیری در مناطق دارای اهمیت اکولوژیک منجر شود. این تحقیق نشان داد که رویشگاه‌های جنگلی واقع در بخش‌های شرقی و غربی منطقه حفاظت‌شده دارای درجه حساسیت بیشتر و نیز در معرض طیف شدیدتری از ریسک مخاطرات محیطی چندگانه نسبت به سایر بخش‌های منطقه هستند. به‌عبارت‌دیگر، این نتایج نشان‌دهنده اولویت این بخش از رویشگاه جنگلی در انجام برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از وارد آمدن و یا کاهش صدمات ناشی از قرارگرفتن در معرض مخاطرات محیطی چندگانه است. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری برای ارزیابی تطبیقی این روش در دیگر مناطق حفاظت‌شده کشور انجام شود تا اثربخشی و قابلیت تعمیم آن موردبررسی قرار گیرد.

نتایج نقشه‌بندی تبخیر و تعرق و خشکسالی در منطقه حفاظت‌شده نشان داد که رابطه‌ای معکوس بین این دو پدیده وجود دارد. این یافته‌ها حاکی از آن است که مناطقی که میزان تبخیر و تعرق بالاتری دارند، معمولاً شدت خشکسالی کمتری را تجربه می‌کنند. این امر به دلیل وجود پوشش گیاهی بیشتر و دسترسی بهتر به منابع آب مانند بارندگی و آب‌های زیرزمینی است که باعث می‌شود این مناطق قادر به جذب آب کافی برای فرآیند تبخیر و تعرق باشند. این نتایج با یافته‌های مشابه در مناطق مختلف تأیید شده است که نشان می‌دهد تبخیر و تعرق بالا معمولاً در مناطق با رطوبت خاک بیشتر و منابع آب قابل‌دسترس‌تر رخ می‌دهد و این مناطق کمتر دچار خشکسالی می‌شوند (Rehana & Monish, 2021). تحقیقات در شمال چین نیز نشان داده است که تبخیر و تعرق واقعی به‌شدت با میزان بارندگی مرتبط است، اما این رابطه با دیگر عوامل مانند تغییرات دمایی و دسترسی به آب تنظیم می‌شود (Su et al., 2022). از سوی دیگر، محاسبه شاخص خشکسالی (SPI) معمولاً بر اساس میزان بارندگی در یک دوره زمانی معین انجام می‌شود و بر این اساس در مناطقی که بارندگی کم است و درنتیجه رطوبت خاک کاهش می‌یابد و به دلیل نقصان آبی، مقادیر شاخص خشکسالی در این مناطق بالا است (CDG, 2024).

در این مطالعه، تمرکز اصلی بر ارزیابی مخاطرات محیطی طبیعی و حساسیت رویشگاه‌های جنگلی قرار داشت. بااین‌حال برای داشتن یک ارزیابی جامع و کامل از آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده هلن، لازم است

مخاطرات انسان‌ساخت نیز موردبررسی قرار گیرند. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، بررسی و ارزیابی تأثیرات مخاطرات انسان‌ساخت نظیر بهره‌برداری، چرای دام، توسعه روستایی و کشاورزی و گردشگری بر رویشگاه‌های جنگلی و منطقه حفاظت‌شده هلن صورت گیرد. این امر می‌تواند به درک کامل‌تری از دینامیک آسیب‌پذیری منطقه و همچنین بهبود برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریتی کمک کند. علاوه براین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده جنگلی هلن سایر مخاطرات محیطی همانند آفات و بیماری‌ها نیز در نظر گرفته شوند و در بررسی روند تغییرات رخ داده در ساختار و گستره رویشگاه‌های جنگلی این منطقه دو شاخص گستره و تراکم منطقه نیز به‌عنوان معیارهای حساسیت در ارزیابی آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گیرند.

References

Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, *16*(3), 268-281. http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

Ahmadi, V. (2019). Crisis Management in Forest Fire by use of Image Landsat in Model Fire Risk (Case Study: Bioreh Protected Area, Illam Province). *Geospatial Engineering Journal*, *10*(2), 27-37. [In Persian] http://magiran.com/p2001760

Askari, Y., Zobeiri, M., & Sohrabi, H. (2013). Comparison of five distance sampling methods for estimating quantitative characteristics of Zagros Forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *21*(2), 316-328. [In Persian] http://doi: 10.22092/ijfpr.2013.3860

Bederman, S. S., McIsaac, W. J., Coyte, P. C., Kreder, H. J. N. N., & Wright, M. J. G. (2010). Referral practices for spinal surgery are poorly predicted by clinical guidelines and opinions of primary care physicians. *Medical Care*, *48*, 852-858. https://www.jstor.org/stable/25750566

Bohle, H. G. (2002). Vulnerability: editorial to the special issue. *Geographica Helvetica*, *57*(1), 2-4. http://dx.doi.org/10.5194/gh-57-2-2002

Bryant, C., Carvajal Sánchez, N., Delusca, K., Daouda, O., & Sarr, A. (2013). Metropolitan vulnerability and strategic roles for periurban agricultural territories in the context of climate change and variability. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *22*(2), 55-68. https://doi.org/10.1023/A%3A1005653320241

Cabral, A. I., Saito, C., Pereira, H., & Laques, A. E. (2018). Deforestation pattern dynamics in protected areas of the Brazilian Legal Amazon using remote sensing data. *Applied Geography*, *100*, 101-115. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.10.003

Callahan, R. P., Riebe, C. S., Sklar, L. S., Pasquet, S., Ferrier, K. L., Hahm, W. J., ... & Holbrook, W. S. (2022). Forest vulnerability to drought controlled by bedrock composition. *Nature Geoscience*, *15*(9), 714-719. http://doi.org/10.1038/s41561-022-01012-2

Chen, F. W., & Liu, C. W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment, 10*(3), 209-222. https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1

Climate Data Guide (CDG). (2024). Standardized Precipitation Index (SPI). Climate Data Guide. Retrieved 02 03, 2024, from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi.

Cronbach, L. J. (2004). My current thoughts on coefficient alpha and successor procedures. *Educational and Psychological Measurement, 64*, 391-418. https://10.1177/0013164404266386

Darvishsefat, A. A. (2006). *Atlas of Protected Areas of Iran*. Tehran: Tehran University Press. [In Persian]

Gallopin, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change, 16*(3), 293-303. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Hasanzadeh, M., Danehkar, A., & Azizi, M. (2013). The application of Analytical Network Process to environmental prioritizing criteria for coastal oil jetties site selection in Persian Gulf coasts (Iran). *Ocean & Coastal Management, 73*, 136-144. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.12.004

Hu, X., Ma, C., Huang, P., & Guo, X. (2021). Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection–A case of Weifang City, China. *Ecological Indicators, 125*, 107464. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107464

Jaafari, A., Rahmati, O., Zenner, E. K., & Mafi-Gholami, D. (2022). Anthropogenic activities amplify wildfire occurrence in the Zagros eco-region of western Iran. *Natural Hazards, 114*(1), 457-473. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05397-6

Jafari, A., & Arman, Z. (2014). Monitoring of Vegetation Cover change in Helen Forested Protected Area and its Causes based on Bi-temporal Analysis of NDVI. *Journal of Natural Environment, 67*(4), 391-402. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jne.2014.53068

Kasperson, R., Dow, K., Archer, E. R., Cáceres, D., Downing, T. E., Elmqvist, T., ... & Ziervogel, G. (2005). Vulnerable peoples and places. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends: findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*, 146-162.

Kennedy, H. P. (2004). Enhancing Delphi research: methods and results. *Journal of Advanced Nursing, 45*(5), 504-511. https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2003.02933.x

Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S. D., Saco, P. M., Bui, D. T., & Lee, S. (2020). Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. *Journal of Hydrology*, 591, 125552. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125552

Korhonen, L., Korpela, I., Heiskanen, J., & Maltamo, M. (2011). Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment, 115*(4), 1065-1080. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.011

Kumar, M., Kalra, N., Singh, H., Sharma, S., Rawat, P. S., Singh, R. K., … & Ravindranath, N. H. (2021). Indicator-based vulnerability assessment of forest ecosystem in the Indian Western

Himalayas: An analytical hierarchy process integrated approach. *Ecological Indicators, 125*, 107568. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107568

Landeta, J. (2006). Current validity of the Delphi method in social sciences. *Technological Forecasting and Social Change, 73*(5), 467-482. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.09.002

Liu, J., Linderman, M., Ouyang, Z., An, L., Yang, J., & Zhang, H. (2001). Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science, 292*(5514), 98-101. https://doi.org/10.1126/science.1058104

Mafi-Gholami, D. (2015). *Vulnerability assessment of mangroves for sustainable management (case study: Hormozgan province mangroves).* PhD thesis. Faculty of Natural Resources, Tehran University. [In Persian]

Mafi-Gholami, D., Feghhi, J., Danehkar, A., & Yarali, N. (2015). Classification and Prioritization of Negative Factors Affecting on Mangrove Forests Using Delphi Method (a Case Study: Mangrove Forests of Hormozgan Province, Iran). *Advances in Bioresearch, 6*(3), 78-92. https://doi.org/10.15515/abr.0976-4585.6.3.7892

Mafi-Gholami, D., Zenner, E. K., Jaafari, A., Bakhtyari, H. R. R., & Bui, D. T. (2019). Multi-hazards vulnerability assessment of southern coasts of Iran. *Journal of Environmental Management, 252*, 109628. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109628

Mafi-Gholami, D., Pirasteh, S., Ellison, J. C., & Jaafari, A. (2021). Fuzzy-based vulnerability assessment of coupled social-ecological systems to multiple environmental hazards and climate change. *Journal of Environmental Management*, 299, 113573. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113573

Manca, D. P., Varnhagen, S., Brett-MacLean, P., Allan, G. M., Szafran, O., Ausford, A., ... & Turner, D. (2007). Rewards and challenges of family practice: Web-based survey using the Delphi method. *Canadian Family Physician*, *53*(2), 277-286.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995). *Drought monitoring with multiple time scales*. Paper presented of the 9th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.

Meirvenne, V. (1998). Integrating properties of soil map delineations into ordinary kriging. *European Journal of Soil Science, 49*(2), 213-229. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00157.x

Metzger, M. J., Leemans, R., & Schröter, D. (2005). A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *7*(4), 253-267. https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.06.011

Miller, G. (2001). The development of indicators for sustainable tourism: results of a Delphi survey of tourism researchers. *Tourism Management, 22*(4), 351-362. https://doi.org/10.1016/S0261-5177(00)00067-4

Mildrexler, D., Yang, Z., Cohen, W. B., & Bell, D. M. (2016). A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sensing of Environment, 173*, 314-325. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.024

Ngo, P. T. T., Panahi, M., Khosravi, K., Ghorbanzadeh, O., Kariminejad, N., Cerda, A., & Lee, S. (2021). Evaluation of deep learning algorithms for national scale landslide susceptibility mapping of Iran. *Geoscience Frontiers*, *12*(2), 505-519. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.06.013

Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information and Management*, *42*(1), 15–29. https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002

Pirasteh, S., Fang, Y., Mafi-Gholami, D., Abulibdeh, A., Nouri-Kamari, A., & Khonsari, N. (2024). Enhancing vulnerability assessment through spatially explicit modeling of mountain social-ecological systems exposed to multiple environmental hazards. *Science of The Total Environment*, *930*, 172744. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172744

Pringle, R. M. (2017). Upgrading protected areas to conserve wild biodiversity. *Nature*, *546*, 91-99. https://doi.org/10.1038/nature22902

Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Panahi, M., Rezaie, F., & Blaschke, T. (2019). Multi-hazard probability assessment and mapping in Iran. *Science of the Total Environment*, *692*, 556-571. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.203

Rahmati, O., Yousefi, S., Kalantari, Z., Uuemaa, E., Teimurian, T., Keesstra, S., ... & Tien Bui, D. (2019). Multi-hazard exposure mapping using machine learning techniques: A case study from Iran. *Remote Sensing*, *11*(16), 1943. https://doi.org/10.3390/rs11161943

Rehana, S., & Monish, N. T. (2021). Impact of potential and actual evapotranspiration on drought phenomena over water and energy-limited regions. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 215-238. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03521-3

Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, *50*(2), 97-108. https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.003

Saatchi, S., Longo, M., Xu, L., Yang, Y., Abe, H., André, M., … & Elmore, A. C. (2021). Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors. *One Earth*, *4*(7), 988-1003. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.002

Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, *16*(3), 282-292. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

Sobhani, P., & Danehkar, A. (2023). Assessment of environmental hazards and vulnerability of Hara protected area using DPSIR model. *Environmental Hazards Management*, *10*(3), 215-232.[In Persian] http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.366567.797

Su, T., Sun, S., Wang, S., Xie, D., Li, S., Huang, B., ... & Feng, T. (2022). Spatiotemporal variation of actual evapotranspiration and its relationship with precipitation in northern China under global warming. *Remote Sensing*, *14*(18), 4554. https://doi.org/10.3390/rs14184554

Tamassoki, E., Soleymani, Z., Bahrami, F., & Abbasgharemani, H. (2014). A survey of drought and variation of vegetation by statistical indexes and remote sensing (Case study: Jahad Forest in Bandar Abbas). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *20*(1), 012033. IOP Publishing. https://doi:10.1088/1755-1315/20/1/012033

Tidball, K., & Stedman, R. (2013). Positive dependency and virtuous cycles: from resource dependence to resilience in urban social-ecological systems. *Ecological Economics*, *86*, 292-299. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.10.004

Thakur, S., Dhyani, R., Negi, V. S., Patley, M. K., Rawal, R. S., Bhatt, I. D., & Yadava, A. K. (2021). Spatial forest vulnerability profile of major forest types in Indian Western Himalaya. *Forest Ecology and Management*, *497*, 119527. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119527

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... & Schiller, A. (2003). *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*. Paper presented of the National Academy of Sciences, 100(14), 8074-8079. https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100

Windle, P. E. (2004). Delphi Technique: assessing component needs. *Journal of Peri Anesthesia Nursing*, *19*(1), 46-47. https://doi.org/10.1016/j.jopan.2003.11.005

Wilhelmi, O. V., & Morss, R. E. (2013). Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event: A Fort Collins case study. *Environmental Science & Policy*, *26*, 49-62. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.07.005

Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. I. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *21*(6), 745-758. https://doi.org/10.1002/joc.658

Zhang, L., Xiao, J., Li, J., Wang, K., Lei, L., & Guo, H. (2012). The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, 7(4), 045706. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045706

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.102-129 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.86597.1462 Open access

Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province

Roghayeh Jahdi[a*], Mohammad Vasegh Alhaj khalaf [b]

[a] *Associate Professors in Forest Sciences, Department of Forest Science and Engineering, Faculty of of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

[b] *PhD. Student in Forestry, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran*

Received: 29 January 2024 ***Revised: 28 May 2024*** ***Accepted: 10 June 2024***

Extended Abstract

Introduction

In Iran, various fire spread models have been used to predict fire behavior and spread at regional and local scales (Alhaj Khalaf, Shataee Joibary, Jahdi & Bacciu, 2021; Jahdi, Salis, Alcasena & Del Giudice, 2023). However, the calculation of an integrated fire risk index using these fire spread models has not yet been conducted. Typically, fire risk assessments are based on a set of fire spread descriptors that are used to map fire-prone areas and identify the most appropriate fire and fuel management measures in line with predefined goals (e.g., reducing fire intensity or minimizing fire size). Fire and fuel management involves a comprehensive approach that integrates land management practices, considering fire regimes, impacts, values at risk, and multiple resource use activities. Despite the merits of each approach, limited resources often prevent the implementation of management measures in all areas with significant fire risk. Therefore, it is essential to prioritize high-risk areas and identify appropriate management strategies that maximize ecosystem protection. This study aims to develop an integrated method for identifying areas with the highest fire risk in the forests and rangelands of Guilan Province. The method combines simulation models of fire spread with landscape data (topography and fuel), fire weather conditions, and historical ignition point data.

[*] .Corresponding author: Roghayeh Jahdi Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir Tel:+989112340249

How to cite this Article: Jahdi, R., & Alhaj Khalaf, M. W. (2024). Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 102-129.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Additionally, anthropogenic factors, such as proximity to roads and settlements, are included in the fire risk modeling process, given their significant influence on fire behavior and regimes (Twidwell et al., 2016). The results of this research can support land-use planning, management, and future studies on fire hazards.

Materials and Methods

Study Area: This research was conducted in Guilan Province, which spans 1,404,400 hectares in northern Iran. The area ranges from -74 meters in the north to approximately 3,700 meters in the southeast. The province receives an average of 1,100 mm of annual rainfall, and the relative humidity averages 80%, decreasing during the summer months with 185 mm of rainfall during this period.

Methods:

Three Landsat-8 OLI/TIRS L1TP images from October 2021 were used to identify the main land cover types and produce a land cover map of the study area using ENVI 5.6 software. A map of surface fuel models was created by assigning local fuel models (Jahdi et al., 2020, 2023) and standard fuel models (Scott & Burgan, 2005) to the land cover types. Additionally, a vegetation density map and forest canopy density map (in percentage) for 2021 were generated from Landsat-8 images using the FCD model in ENVI software.

Historical fire ignition data were used to calculate ignition probability by interpolating ignition points using the Inverse Distance Weighting (IDW) algorithm with a fixed radius of 5 km. The frequency of fire recurrence was determined from historical fire perimeters. Weather data, including temperature, relative humidity, wind speed, and wind direction, were collected for the fire season in the study area.

To prepare input data for fire risk modeling:

1. FlamMap 6 fire simulator (Finney, 2006) was used to model fire behavior, including fireline intensity and fire rate of spread, at a 100-meter resolution across the study area.
2. Raster maps showing Euclidean distance from roads and settlements were created using ArcMap 10.8 software.
3. Kernel density estimation was applied to convert the historical ignition point map into a fire density raster map.

The fireline intensity, fire rate of spread, human factor maps, and fire history maps were rescaled to values between 0 and 1. These layers were combined to calculate the fire risk index (Xofis, Konstantinidis, Papadopoulos & Tsiourlis, 2020). The fire risk index values ranged from 0 (low risk) to 1 (highest risk).

Results and Discussion

Fifteen land cover classes were identified in the study area (Fig. 2, Table 4). The overall accuracy of the classification was 91%, with a Kappa statistic of 0.88. Dense broadleaf forest (30.6%) and orchard-irrigation farming (26%) were the dominant land cover types. Approximately 65% of the study area comprised natural forests, plantations, woodlands,

shrublands, and rangelands. The remaining area included agricultural lands, built-up areas, water bodies, and bare lands.
Based on the simulation outputs for fireline intensity and fire rate of spread (Fig. 4):

- In over 93% of the study area, the fire rate of spread did not exceed 0.25, and less than 7% of the area had higher values.
- Similarly, in over 90% of the area, the fireline intensity remained below 0.25, with about 10% exceeding this threshold.
- The highest values for fireline intensity and fire rate of spread were observed at high altitudes with dense vegetation, consistent with findings by Okano & Yamano (2015), which showed topography and slope significantly influenced fire behavior in broadleaf forests.

Human factors, such as proximity to roads and the fire kernel density/fire history (Fig. 5), were found to impact a smaller proportion of the study area. This finding aligns with the study by Xofis et al. (2020).

The integration of these components (Fig. 4 and Fig. 5) produced the final fire risk index map (Fig. 6). Fire risk values ranged from 0.0 to 0.68, with an average value of 0.11. Lowlands covered by non-burnable fuel models had the lowest risk (0.0), while the highest fire risk values were observed in the highlands with dense forest cover.

Conclusion

This study demonstrates how landscape information (topography and fuel), weather conditions, and historical fire data, combined with human factors, can be used to estimate fire risk spatially using fire behavior modeling. Moderate and high-risk areas account for 21% of Guilan Province, where fire management efforts should be prioritized. Specific measures include:

- Strengthening fire prevention infrastructure.
- Conducting fire prevention training to raise public awareness.
- Enhancing ecosystem resilience in vulnerable areas.

While many fires remain random and difficult to fully control, estimating fire risk and developing prediction models can help mitigate fire hazards, reduce potential damages, and improve the allocation of fire prevention resources.

Keywords: Fire Risk Index, Fire Behavior Modeling, Anthropogenic Fire Factors, Ecosystem Resilience,Gilan Province, Iran.

How to cite this Article: Jahdi, R., & Alhaj Khalaf, M. W. (2024). Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13*(4), 102-129.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۱۲۹-۱۰۲ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.86597.1462 دسترسی آزاد

مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی رفتار آتش در استان گیلان

رقیه جهدی[۱]-دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

محمد واثق الحاجی خلف -دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۱/۹ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۳/۲۱

چکیده

استان گیلان یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های ریسک آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در ایران است. در این تحقیق، شاخص ریسک آتش‌سوزی در این استان بر اساس داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای سنجش‌ازدور که عوامل انسانی و بیوفیزیکی سیمای سرزمین را توصیف می‌کند، تهیه شد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI/TIRS L1TP سال ۲۰۲۱ و نیز الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)، طبقه‌بندی نظارت شده این تصاویر برای تهیه نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه انجام شد. شاخص ریسک آتش‌سوزی (دامنه ارزش از ۰/۰ تا ۱) بر اساس ۱) رفتار آتش‌سوزی (شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش که توسط مدل شبیه‌ساز آتش FlamMap (Finney, 2006) مشخص می‌شود)؛ ۲) تاریخچه آتش‌سوزی (مربوط به داده‌های آماری آتش‌سوزی طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲)؛ و ۳) عوامل انسانی (با استفاده از رابطه معکوس این تأثیر با فاصله اقلیدسی از جاده‌ها و سکونت‌گاه‌ها) محاسبه شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی، ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰ تا ۰/۶۸ با میانگین ۰/۱۱ متغیر بود. مقدار کمینه شاخص ریسک آتش در بخش‌های پست و کم ارتفاع که عمدتاً توسط مدل‌های ماده سوختنی غیرقابل سوختن (اراضی لخت، باغ-زراعت آبی، مناطق انسان‌ساز و مناطق آبی) پوشیده شده است، مشاهده می‌شود. درحالی‌که مقدار بیشینه شاخص ریسک آتش در ارتفاعات، جایی که پوشش‌های جنگلی متراکم و با دسترسی محدود به جاده و تجهیزات اطفای آتش در مقایسه با مناطق کم ارتفاع وجود دارد، مشاهده می‌شود. شاخص ریسک آتش‌سوزی محاسبه‌شده نشان داد که حدود ۲۱ درصد از استان، ازجمله مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های جنگلی اولیه و کهن‌رُست از نظر اکولوژیکی، در برابر آتش‌سوزی‌های جنگلی آسیب‌پذیر است. بر اساس این نتایج، در این مناطق

[۱].نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۲۳۴۰۲۴۹

Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

باید منابع مدیریت آتش با تمرکز بیشتری کنترل و برنامه‌ریزی شود، زیرساخت‌های پیشگیری از آتش تقویت شود، آموزش پیشگیری از آتش برای ارتقای آگاهی مردم در برابر آتش انجام شود و اقدامات مختلفی برای افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر این مناطق باید در نظر گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: شاخص خطر آتش‌سوزی ، مدل‌سازی رفتار آتش ، عوامل انسانی موثر بر آتش‌سوزی ، تاب‌آوری اکوسیستم ، استان گیلان ، ایران.

۱- مقدمه

مخاطره آتش[1] و ریسک آتش[2]، اگرچه در مواردی با هم در نظر گرفته می‌شوند، اما متمایز هستند. مخاطره آتش، احتمال آتش[3] (که احتمال آتش‌سوزی سالانه در یک مکان خاص است) و یک ارزیابی کمی از رفتار آتش مانند شدت آتش[4] را ترکیب می‌کند (Scott, Thompson & Calkin, 2013)، که با هر دو قابلیت‌های اطفاء آتش و سختی آتش[5] مرتبط است (Parisien, Dawe, Miller, Stockdale & Armitage, 2019). ریسک آتش‌سوزی محصول احتمال آتش (یا احتمال سوختن) و آثار بالقوه آتش‌سوزی (منفی یا مثبت) است (Finney, 2005). بخش «آثار» این معادله به هدف کاربر و ماهیت ارزش‌های در معرض خطر بستگی دارد؛ «ریسک» نیز می‌تواند مظاهر مختلفی را به همراه داشته باشد. مدل‌سازی ریسک آتش یک رویکرد کلیدی برای کشف روابط پیچیده بین رخداد آتش، عوامل محرک آن و آثار بالقوه است و با مراحل مختلف آتش‌سوزی شامل پیشگیری، اطفا و بازیابی مرتبط است (Oliveira, Rocha & Sá, 2021).

مدل‌های گسترش آتش مانند Behave، FARSITE و FlamMap به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی مخاطره، قرار گرفتن در معرض[6] و ریسک آتش استفاده شده‌اند (Sá et al., 2022; Salis et al., 2021). این مدل‌ها می‌توانند گسترش و رفتار آتش را تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف و سناریوهای مدیریت ماده سوختنی تخمین بزنند و اطلاعاتی را تولید کنند که می‌تواند در حمایت از تصمیمات مدیریت آتش استفاده شود (Finney, 2006). در ایران، شبیه‌سازی‌های گسترش آتش در مقیاس‌های منطقه‌ای و بیشتر محلی برای پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش (Alhaj Khalaf, Shataee Joibary, Jahdi & Bacciu, 2021)، تجزیه‌وتحلیل اثربخشی تیمارهای ماده سوختنی (Jahdi, Salis, Alcasena & Del Giudice, 2023) و قرار گرفتن در معرض آتش (Jahdi et al., 2020) استفاده شده است؛ اما تاکنون محاسبه شاخص یکپارچه ریسک آتش با استفاده از

1- Wildfire hazard
2- Wildfire risk
3- Wildfire likelihood
4- Fire intensity
5- Fire severity
6- Exposure

این مدل‌های گسترش آتش انجام نشده است. اگرچه ارزیابی ریسک آتش در جنگل‌ها و مراتع کشور بر پایه سایر روش‌ها مانند رگرسیون لجستیک و تحلیل سلسله‌مراتبی (Teimouri & Kornejady, 2023; Heydari, Attar Roshan, Jaferyan & Abiyat, 2021b) انجام شده است. به‌منظور مکان‌یابی مناطق مستعد آتش‌سوزی و تعیین اقدامات مدیریت آتش و ماده سوختنی با توجه به اهداف از پیش تعریف‌شده (مانند شدت آتش کمتر یا اندازه آتش کوچک‌تر)، ارزیابی‌های ریسک آتش‌سوزی بر اساس مجموعه‌ای از مشخصات گسترش آتش انجام می‌شود. دراین‌ارتباط، تیمارهای کاهش ماده سوختنی می‌تواند شدت آتش‌سوزی را کاهش دهد و نیز می‌تواند فرصت‌هایی برای اطفای آتش ایجاد کنند که درنهایت منجر به کاهش قرار گرفتن در معرض و خطر برای افراد، زیرساخت‌ها، و بوم‌سازگان‌ها و خدمات آن‌ها شود (Alcasena et al., 2021).

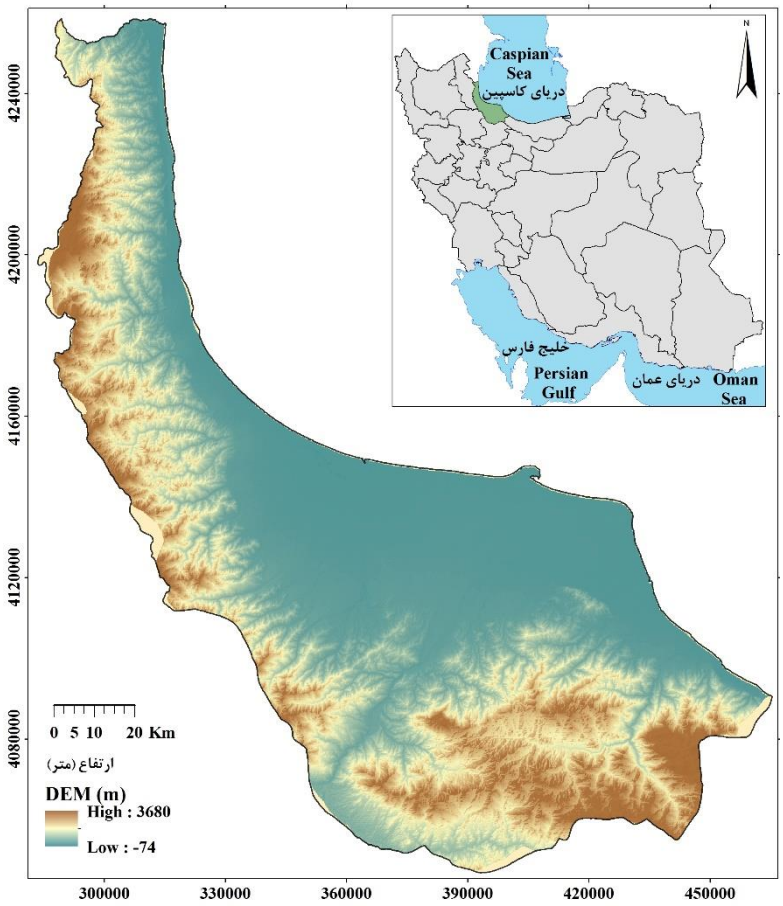
مدیریت آتش و ماده سوختنی یک رویکرد جامع است که شامل مدیریت یکپارچه زمین است که در آن رژیم‌ها و آثار آتش‌سوزی، ارزش‌های در معرض خطر و فعالیت‌های چندگانه استفاده از منابع در نظر گرفته می‌شود (Hood, Varner, Jain & Kane, 2022). علی‌رغم محاسن و کاستی‌های هر رویکرد، منابع محدود مانع اجرای چنین اقدامات مدیریتی در تمام موقعیت‌های با خطر آتش‌سوزی قابل‌توجه می‌شود؛ بنابراین، شناسایی موقعیت‌هایی که در معرض خطر بالاتر قرار دارند و مناسب‌ترین نوع اقدامات مدیریتی که حفاظت از بوم‌سازگان‌ها را به حداکثر می‌رساند، بسیار مهم است. ازاین‌رو، هدف این تحقیق توسعه یک روش یکپارچه برای شناسایی مناطق با بالاترین ریسک آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان گیلان است. در طول دهه‌های گذشته، آتش‌سوزی‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیم و افزایش دما ناشی از فعالیت‌های انسانی همراه با احتراق‌های انسانی به دلایل عمدی و سهوی به‌طور قابل‌توجهی بر جنگل‌ها و مراتع استان گیلان تأثیر گذاشته است؛ بنابراین، ارائه یک مدل ارزیابی دقیق ریسک آتش برای این استان که در آن آتش‌سوزی‌های جنگلی یک ریسک مکرر هستند و هرساله خسارات جدی ایجاد می‌کند، ضروری است. روش ارائه شده در این تحقیق مبتنی بر مدل شبیه‌ساز گسترش آتش و با استفاده از داده سیمای سرزمین (توپوگرافی و ماده سوختنی)، شرایط آب‌وهوای آتش و داده نقاط احتراق تاریخی در منطقه مورد مطالعه است. هم‌چنین، با توجه به اینکه انسان‌ها رفتار و رژیم آتش را به طرز چشمگیری تغییر داده و آن را به عاملی در درجه اول انسان‌زا تبدیل کرده است (Twidwell et al., 2016)، در این مطالعه آثار عوامل انسانی مانند فاصله از جاده و سکونت‌گاه‌ها نیز در مدل‌سازی شاخص ریسک آتش لحاظ شده است. برای نخستین بار در مناطق جنگلی کشور، در این تحقیق از داده‌های سنجش‌ازدور، مدل‌سازی رفتار آتش و سایر مؤلفه‌های مرتبط با ریسک آتش برای برآورد مکانی ریسک آتش‌سوزی در یکی از استان‌های شمالی با وجود جنگل‌ها و مراتع حساس به آتش‌سوزی با استفاده از فرمول محاسبه شاخص ریسک آتش (FRI) استفاده شد. انتظار می‌رود شاخص محاسبه شده به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب برای پیشگیری از آتش و نیز کاهش ریسک آتش

کمک کند. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق می‌تواند در حمایت از برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین و مطالعات بیشتر در مورد ریسک‌های آتش‌سوزی استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

استان گیلان ۱۴۰۴۴۰۰ هکتار وسعت دارد و در شمال ایران (′۳۸°۲۷-′۳۶ °۳۶ عرض شمالی، ′۵۰°۲۶ -′۴۸°۳۴ طول شرقی) واقع شده است (شکل ۱). تغییرات ارتفاعی این استان از ارتفاع ۷۴- متری (نواحی شمالی در بخش غربی کرانه‌های جنوبی دریای کاسپین) تا حدود ۳۷۰۰ متری (نواحی جنوب شرقی همراه با کوه‌های دیلمان در امتداد کوه‌های البرز و نواحی غربی در امتداد کوه‌های تالش) است. در طول این شیب ارتفاعی، انواع خاک‌های جلگه‌ای، کوهپایه‌ای و کوهستانی در این استان وجود دارد (Statistical Yearbook of Guilan Province, 2019). هم‌چنین، میانگین بارندگی استان ۱۱۰۰ میلی‌متر در سال و میانگین رطوبت نسبی حدود ۸۰ درصد است (Janbozorgi, Hanifepour & Khosravi, 2021). رطوبت نسبی در ماه‌های تابستان کمتر می‌شود و به‌طور متوسط حدود ۱۸۵ میلی‌متر بارندگی دارد (Meteorological Quarterly of the Guilan Province, 2019).



شکل ۱- نقشه موقعیت استان گیلان در شمال ایران و مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه.

Fig.1. Location map of Guilan Province in northern Iran and Digital Elevation Model (DEM) of the study area

۲-۲ داده ورودی

سیستم شبیه‌سازی رفتار آتش به مجموعه‌ای از داده‌های ورودی نیاز دارد که شامل لایه‌های رستری برای توصیف سیمای سرزمین، نقاط احتراق تاریخی آتش و اطلاعاتی در مورد شرایط آب‌وهوایی آتش و محتوای رطوبت ماده سوختنی مربوطه است (جدول ۱). لایه‌های رستری فایل سیمای سرزمین شامل داده‌های توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) و پوشش گیاهی (تراکم تاج پوشش و مدل ماده سوختنی سطحی) است که در اندازه تفکیک ۱۰۰ متری در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. داده‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از طریق یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM؛ اندازه تفکیک ۳۰ متر) در دسترس بود (شکل ۱). در این مطالعه، دانش مبتنی بر کارشناس و تحقیق با منابع داده تهیه شده (شامل تصاویر ماهواره‌ای و کار میدانی) برای تولید نقشه‌های مدل‌های ماده سوختنی محلی ترکیب شد. بر این اساس، بعد از تهیه نقشه تیپ‌های پوشش زمین،

مدل‌های ماده سوختنی سطحی به تیپ‌های پوشش زمین اختصاص داده شد تا یک نقشه پایه برای مدل‌سازی آتش تولید شود.

جدول ۱- مجموعه داده‌ها، منابع، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مورداستفاده برای آماده‌سازی آن‌ها به‌عنوان ورودی در مدل‌سازی ریسک آتش در این تحقیق.

Table 1- Data sets, sources, models and softwares used to prepare them as input in wildfire risk modeling in this research

نرم‌افزار مورداستفاده **Software used**	مدل مورداستفاده **Model used**	منبع **Source**	نوع داده **Data type**
ArcMap 10.8	3D Analyst	Digital Elevation Model (DEM; 30 m resolution) - National Cartographic Center of Iran مدل رقومی ارتفاعی (DEM؛ اندازه تفکیک ۳۰ متر)- سازمان نقشه‌برداری کشور	Topography (slope, direction, and elevation) توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع)
ENVI 5.6	Radiometric Calibration and FLAASH Atmospheric Correction, FMASK algorithm, image composite generation and contrast enhancement, Support Vector Machine (SVM) and FCD classification algorithm کالیبراسیون رادیومتریکی و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH، الگوریتم FMASK ، تولید ترکیب‌ها و بهبود کنتراست تصاویر، الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) و FCD	Landsat-8 OLI/TIRS L1TP satellite images and fieldwork تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI/TIRS L1TP و کار میدانی	Vegetation (canopy cover and surface fuel model) پوشش گیاهی (تراکم تاج پوشش و مدل ماده سوختنی سطحی)
ArcMap 10.8	Inverse distance weighting (IDW) algorithm and Kernel Density Estimation (KDE) tool الگوریتم وزن‌دهی معکوس فاصله و ابزار برآورد تراکم کرنل	Fire reports registered in the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Guilan Province (2023) and satellite data گزارش‌های آتش ثبت شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان (۱۴۰۲) و داده ماهواره‌ای	Historical ignition point data داده نقاط احتراق تاریخی
R	"Meteoland" software package بسته نرم‌افزاری Meteoland Model (Nelson ,2000) as well as the US National Fire Danger Rating System (NFDRS)	-	Fire weather آب‌وهوای آتش
-	مدل (Nelson ,2000) و نیز سیستم رتبه‌بندی خطر آتش ملی ایالات‌متحده امریکا	-	Fuel moisture رطوبت ماده سوختنی
ArcMap 10.8	Euclidean distance فاصله اقلیدسی	National Cartographic Center of Iran سازمان نقشه‌برداری کشور	Human factors (distance from roads and settlements) عوامل انسانی (فاصله از جاده ها و سکونتگاه‌ها)
FlamMap 6. شبیه‌ساز آتش (Finney,2006)	Fire behavior modeling using input data مدل‌سازی رفتار آتش با استفاده از داده‌های ورودی		

برای شناسایی تیپ‌های پوشش زمین و تولید نقشه آن در منطقه مورد مطالعه از سه تصویر Landsat-8 OLI/TIRS L1TP استفاده شد و با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.6 تجزیه‌وتحلیل شد. مشخصات این تصاویر در جدول ۲ ارائه شده است. مراحل پیش‌پردازش برای این تصاویر شامل کالیبراسیون رادیومتریکی و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH است. پس از تصحیح اتمسفری، مقادیر پیکسل‌ها در تصاویر بازتاب سطحی را نشان می‌دهند. به‌منظور حذف پوشش ابر در این تصاویر از الگوریتم FMASK در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. در ادامه، تولید ترکیب‌ها و بهبود کنتراست تصاویر انجام شد. به‌منظور طبقه‌بندی نظارت شده این تصاویر، مجموعه داده‌های آموزشی شناسایی شد که تیپ‌های مختلف پوشش زمین را نشان می‌دهند. این تیپ‌های پوشش با بررسی‌های میدانی در هر پوشش زمین مانند مناطق آبی، اراضی دیم، جنگل، مرتع، اراضی لخت، مناطق انسان‌ساز و ... انتخاب شدند. این مناطق بر اساس طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) شناسایی شدند. SVM تکنیک یادگیری ماشین نظارت شده با کارایی بالا است که از یک طبقه‌بندی دودویی یا باینری بر اساس تئوری آماری یادگیری ماشین و ابرصفحه جداکننده بهینه استفاده می‌کند (Awad & Khanna, 2015). هدف ابرصفحه جداکننده بهینه، تفکیک مناسب بین دو کلاس نمونه‌های استفاده شده (کلاس‌های حضوروغیاب) برای به حداکثر رساندن حاشیه بین دو کلاس در یک مجموعه داده است (Ghayour et al., 2021). اطمینان حاصل شد که مجموعه آموزشی دارای تعداد کافی نمونه مستقل برای هر کلاس است تا تنوع بین طبقاتی را نشان دهد. در این مطالعه، از سیستم موقعیت‌یاب جهانی[1]، تصاویر Google Earth تصحیح شده با وضوح‌بالا و نیز نقشه کاربری اراضی استان گیلان (Land use plan of Guilan Province, 2016) به‌عنوان مرجعی برای انتخاب و کنترل کیفیت نمونه‌های تعلیمی با ۱۰۰۰ نقطه واقعیت زمینی به‌طور تصادفی انتخاب شده، استفاده شد. در این مطالعه، در هر پوشش زمین، متناسب با سطح آن پراکنش نقاط واقعیت زمینی انجام شد (جدول ۳). از این نقاط واقعیت زمینی انتخاب شده، ۲۰۰ نقطه مرجع برای ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده استفاده شد. در این راستا، با استفاده از ماتریس خطای طبقه‌بندی کننده، دقت کلی و ضریب کاپا با کاربرد ابزار ROIs واقعیت زمین در ENVI محاسبه شد.

[1]- GPS

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده برای تهیه نقشه پوشش زمین استان گیلان.

Table 2- Characteristics of the satellite images used to prepare the land cover map of Guilan Province.

اندازه تفکیک (متر) **Resoulution (m)**	تعداد باند **Bands**	نوع داده **Data type**	سنجنده **Sensor**	پوشش ابر (درصد) **Cloud fraction (%)**	شماره گذر / ردیف **Path/row number**	تاریخ **Date**	تصویر **Image**
30	11	L1TP/T1	OLI/TIRS	2.5	34 / 166	2021-10-22	Landsat-8
				8	34 / 165	2021-10-15	
				3.5	34 / 165	2021-10-15	

در این تحقیق، نقشه تیپ‌های پوشش زمین از مجموعه داده بالا تهیه شد. سپس، نقشه مدل‌های ماده سوختنی سطحی با تخصیص انواع مدل‌های ماده سوختنی محلی (Jahdi et al., 2020, 2023) و مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (Scott & Burgan, 2005) به تیپ‌های پوشش زمین منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۱، استخراج شد. هم‌چنین، نقشه تراکم پوشش گیاهی و تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) برای سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر لندست-۸ مورداستفاده برای تهیه نقشه پوشش زمین و بر اساس مدل FCD در نرم‌افزار ENVI تهیه شد.

داده نقاط احتراق تاریخی آتش با تاریخ شروع و پایان آتش‌سوزی‌های مربوطه بر اساس گزارش‌های آتش ثبت شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان تهیه شد. باوجوداین، منابع مختلف خطا ازجمله داده‌های ثبت نشده یا به‌درستی ثبت نشده ممکن است بر دقت این اطلاعات تأثیر بگذارد؛ بنابراین، در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای (محصول آتش فعال از طیف‌سنج تصویربردار با وضوح متوسط[1]) برای تکمیل و بهبود دقت موقعیت نقاط احتراق و نیز وسعت آتش‌سوزی استفاده شد. بر اساس این اطلاعات، احتمال احتراق با درون‌یابی نقاط احتراق تاریخی با استفاده از یک الگوریتم وزن‌دهی معکوس فاصله با شعاع ثابت ۵ کیلومتر تولید شد. هم‌چنین، توزیع تکرار آتش‌سوزی برای محیط آتش تاریخی در منطقه مورد مطالعه، محاسبه شد.

[1]- MODIS

جدول ۳- تعداد نقاط تعلیمی انتخاب شده در هر پوشش زمین برای طبقه‌بندی پوشش زمین در استان گیلان

Table 3- Number of selected training points in each land cover for land cover classification in Guilan Province

درصد نقاط **Points percentage**	تعداد نقاط **Points number**	**Land use**	**پوشش زمین**
4	40	Woodland	اراضی جنگلی
0.5	5	Bare ground	اراضی لخت
22	220	Orchard-irrigation farming	باغ- زراعت آبی
5	50	Dense broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ کم تراکم
33	330	Sparse broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ متراکم
5	50	Semi-dense broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ نیمه متراکم
1.5	15	Broadleaved plantation	جنگل‌کاری پهن‌برگ
1.5	15	Conifer plantation	جنگل‌کاری سوزنی‌برگ
0.5	5	Shrublands	درختچه‌زار
3	30	Dry farming	زراعت دیم
3	30	Scarce & low rangeland	مرتع کم تراکم
9	90	Dense rangeland	مرتع متراکم
7	70	Medium density rangeland	مرتع نیمه متراکم
3	30	Water bodies	مناطق انسان‌ساز
2	20	Built-up lands	مناطق آبی
100	**1000**		**کل**

داده‌های شرایط آب‌وهوایی شامل متغیرهای دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و جهت باد برای فصل آتش-سوزی در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شدند. در این تحقیق، از بسته نرم‌افزاری "Meteoland" در R استفاده شد که چندین ابزار را برای تسهیل برآورد آب‌وهوای روزانه در سیمای سرزمین، در شرایط فعلی و نیز در شرایط آینده، ادغام می‌کند. این بسته شامل توابع ۱) برای درون‌یابی آب‌وهوای روزانه ازجمله آثار توپوگرافی و ۲) برای تصحیح سوگیری‌های یک سری‌های آب‌وهوای معین (به‌عنوان‌مثال، خروجی‌های مدل اقلیمی) است (De Cáceres, Martin StPaul, Turco, Cabon & Granda, 2018). داده هواشناسی برای دوره ۳۰ ساله با استفاده از این بسته در نرم‌افزار R با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر درون‌یابی شد. علاوه بر این، رطوبت ماده سوختنی براساس مدل نیلسن (Nelson ,2000) و نیز سیستم رتبه‌بندی خطر آتش ملی ایالات‌متحده امریکا محاسبه شد و در سه کلاسه ۱-ساعت (موادسوختنی ریز دارای قطر کمتر از ۰/۶۴

سانتی‌متر)، ۱۰-ساعت (موادسوختنی با قطر ۰/۶۴ تا ۲/۵۴سانتی‌متر) و ۱۰۰-ساعت (موادسوختنی با قطر ۲/۵۴ تا ۷/۶۲ سانتی‌متر) به دست آمد.

مدل‌سازی رفتار آتش

در این مطالعه از شبیه‌ساز آتش FlamMap 6. (Finney, 2006) برای مدل‌سازی رفتار آتش در اندازه تفکیک ۱۰۰ متری برای کل منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این مدل شبیه‌ساز آتش دوبعدی، نرخ گسترش، شدت خط آتش و طول شعله را با استفاده از شرایط آب‌وهوایی و رطوبت ماده سوختنی زنده ثابت برای ارزیابی رفتار آتش بالقوه برای یک سناریوی معین در یک سیمای سرزمین محاسبه می‌کند. اگرچه این مدل نقاط اشتعال یا تغییرات شرایط آب‌وهوایی را در طول یک رویداد آتش‌سوزی در نظر نمی‌گیرد، این یک روش قدرتمند است که معمولاً برای برآورد ریسک آتش بر اساس پوشش گیاهی و ویژگی‌های توپوگرافی استفاده می‌شود (Calkin, Ager & Gilbertson-Day, 2010). از این نظر، در مقایسه با شبیه‌سازهای دیگر مانند FARSITE (Finney, 2004) برای این مطالعه مناسب‌تر است، زیرا امکان شناسایی مناطق با پتانسیل بالا برای ایجاد آتش با شدت بالا را درصورتی‌که شرایط آب‌وهوایی مناسب آتش وجود داشته باشد، فراهم می‌کند (Xofis, Konstantinidis, Papadopoulos & Tsiourlis, 2020).

شدت خط آتش (I؛ کیلووات بر متر) که اغلب به آن شدت Byram گفته می‌شود، نرخ آزاد شدن انرژی یا گرما در واحد زمان در واحد طول جبهه آتش است. شدت خط آتش را نمی‌توان به‌طور مستقیم روی زمین اندازه‌گیری کرد (Byram, 1959)، بلکه محاسبه آن از طریق معادله (۱) است:

$$I = H \times w \times r \quad (۱)$$

که در آن:

H= بازده حرارتی (کیلوژول بر کیلوگرم)

W= بار ماده سوختنی (کیلوگرم بر مترمربع)؛

R= نرخ گسترش آتش (متر بر ثانیه).

نرخ گسترش آتش (R؛ متر در دقیقه) در هر نقطه از پلی‌گون محیط آتش، با سوختن در شرایط ثابت و گسترش در سطح زمین محاسبه می‌شود. در رابطه (۲) برای محاسبه نرخ گسترش، نسبت بین سرعت گرم-شدن ماده‌سوختنی و انرژی موردنیاز برای رساندن همان ماده‌سوختنی به احتراق ارائه می‌شود (Rothermel, 1972):

$$R = \frac{I_R \xi (1+\emptyset_w+\emptyset_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (۲)$$

که در آن:

R = نرخ گسترش ($m\ min^{-1}$)، نرخ پخش روبه‌جلو جبهه آتش سطحی، در شرایط ثابت؛

I_R = شدت واکنش (kJ min^{-1} m^{-2})، نرخ آزادسازی انرژی در واحد سطح از جبهه آتش؛

ξ = نسبت پخش شار[1] (بدون بعد)، بخشی از انرژی آزاد شده مؤثر در گرم‌شدن و احتراق ماده‌سوختنی مجاور؛

ρ_b= تراکم توده (kg m^{-3})، جرم خشک ماده‌سوختنی در هر واحد حجم؛

ε = تعداد منبع گرمایشی مؤثر (بدون بعد)، به‌عنوان عامل وزن‌دهی در مدل روترمل که نسبت بین تراکم توده و جرم ماده‌سوختنی داخل در فرآیند احتراق است؛

Q_{ig} = گرمای قبل از احتراق (kJ kg^{-1})، انرژی موردنیاز برای احتراق؛

ضرایب Φ_s و Φ_w به ترتیب مربوط به شیب زمین و باد است.

در این مطالعه، نقشه‌های شبیه‌سازی شده شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش به مقیاسی بین ۰ و ۱ تغییر داده شد تا از آن‌ها برای محاسبه شاخص ریسک آتش (Xofis et al., 2020) استفاده شود.

محاسبه شاخص ریسک آتش

در این مطالعه از یک رویکرد یکپارچه برای محاسبه شاخص ریسک آتش استفاده شد. ورودی‌های این شاخص شامل مشخصه‌های رفتار آتش (شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش شبیه‌سازی شده) به همراه عوامل انسانی و تاریخچه آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه است. در این کار، عوامل انسانی با استفاده از فاصله از جاده‌ها و سکونتگاه‌ها در شاخص ریسک آتش ادغام شد. به این منظور، نقشه‌های رستری نشان دهنده فاصله اقلیدسی از همه جاده‌ها و سکونتگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار ArcMap 10.8 ایجاد شد. در مطالعات متعددی اثر قابل‌توجه این عوامل انسانی روی ریسک آتش گزارش شده است. به‌عنوان‌مثال، کتری و همکاران (Catry, Rego, Bação & Moreira, 2009) ارتباط قوی بین ریسک احتراق و فاصله از جاده‌ها برای فواصل کم (مانند ۰–۵۰۰ متر) گزارش کردند. هم‌چنین در مطالعه کلانک و همکاران (Kolanek, Szymanowski & Raczyk, 2021) رخداد آتش با نزدیکی به زیرساخت‌های انسانی، ازجمله جاده‌ها و سکونتگاه‌ها ارتباط مستقیم دارد.

علاوه بر عوامل انسانی اشاره شده، تاریخچه آتش‌سوزی نیز با ترسیم الگوی مکانی آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه مورد مطالعه در محاسبه شاخص ریسک آتش در نظر گرفته شد. مطابق با مطالعه دورف و همکاران (Dorph, Marshall, Parkins & Penman, 2022)، تاریخچه آتش‌سوزی و طرح‌های مکانی نقاط احتراق در ارزیابی ریسک‌های آتش در یک منطقه مهم است؛ بنابراین، داده‌های مربوط به تمام آتش‌سوزی‌هایی که در ۳۰ سال گذشته در منطقه ثبت شده‌اند، از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان جمع‌آوری شده و

[1] Propagating flux ratio

به‌صورت نقشه وکتور نقطه‌ای و پلی‌گونی تهیه شدند. از ابزار برآورد تراکم کرنل در ArcMap برای تبدیل نقشه نقطه‌ای احتراق تاریخی به نقشه رستری تراکم آتش منطقه مورد مطالعه استفاده شد؛ مانند نقشه‌های مشخصه‌های رفتار آتش شبیه‌سازی شده، نقشه‌های عوامل انسانی و تاریخچه آتش نیز به مقادیر بین ۰ و ۱ تغییر مقیاس داده شد.

مطابق با روش بکار رفته در مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) عواملی که معرف ریسک آتش هستند، باید وزن‌دهی شوند. دراین‌ارتباط، ۲۰ درصد از وزن ریسک آتش به عوامل انسانی (نزدیکی به زیرساخت‌های انسانی) و ۱۰ درصد به الگوی فضایی احتراق‌های گذشته اختصاص داده شد. ۷۰ درصد باقیمانده نیز به مشخصات رفتار آتش شبیه‌سازی شده (شدت خط آتش و نرخ گسترش) اختصاص یافت. این دو مشخصه مهم رفتار آتش که به نوع و شرایط ماده سوختنی مرتبط هستند، تا حد زیادی تعیین می‌کنند که یک آتش‌سوزی چقدر می‌تواند بحرانی و فاجعه‌بار باشد. مطابق با مرور منابع قبلی (Xofis et al., 2020; Scott et al., 2013)، ۵۰ و ۲۰ درصد از وزن ریسک آتش به ترتیب به‌شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش اختصاص یافت؛ بنابراین با ترکیب چهار عامل محاسبه شده و در نظر گرفتن وزن‌های مرتبط، فرمول نهایی محاسبه شاخص ریسک آتش (FRI) به‌صورت رابطه (۳) به دست آمد:

$$FRI = (0.5 \times I) + (0.2 \times R) + (0.2 \times HI) + (0.1 \times FH) \quad (۳)$$

که در آن:

I= شدت خط آتش

R= نرخ گسترش آتش

HI= شاخص انسانی

FH= تاریخچه آتش.

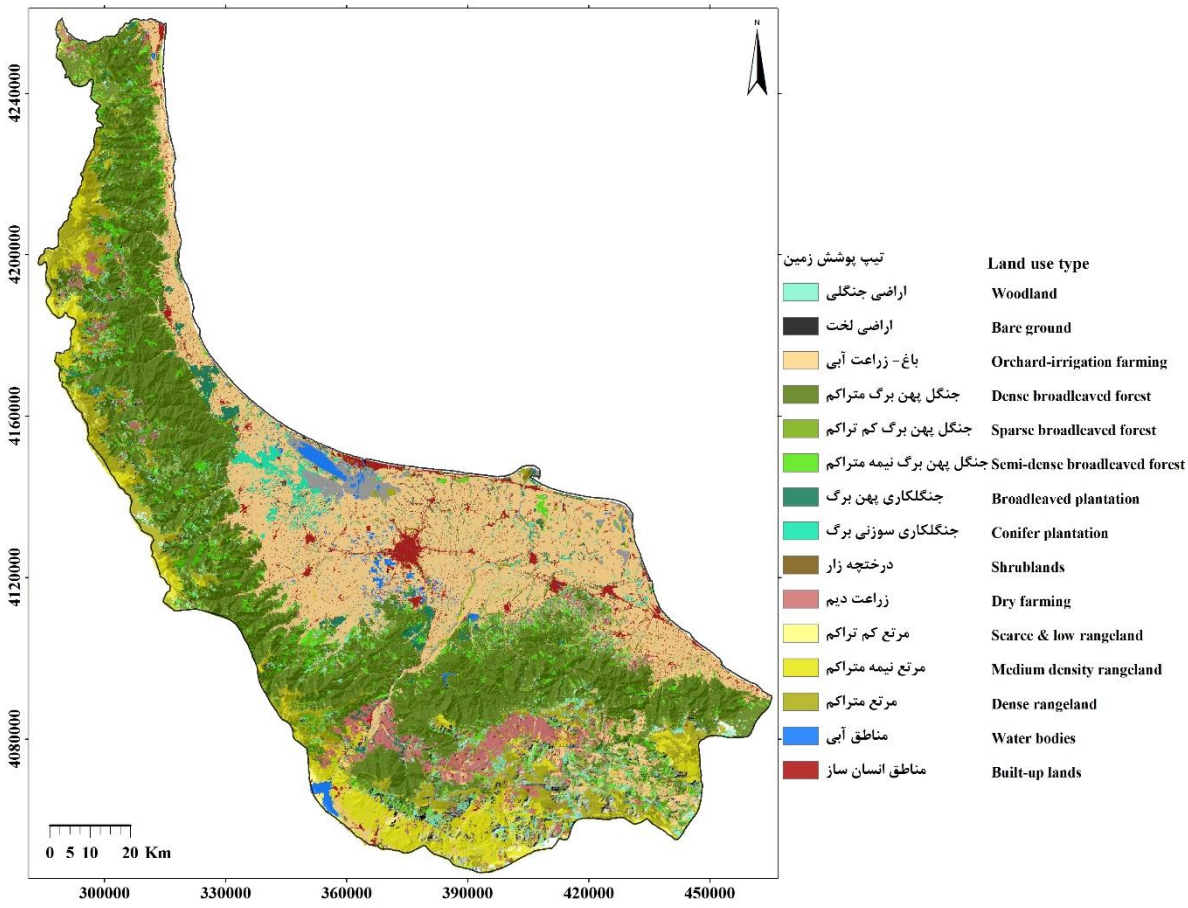
نقشه حاصل از محاسبه شاخص ریسک آتش نیز به‌مانند ورودی‌های آن در مقادیر بین ۰ و ۱ است که ۰ نشان‌دهنده ریسک کم و ۱ بیشترین ریسک است.

۳- نتایج و بحث

در منطقه مورد مطالعه، بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای ۱۵ طبقه پوشش زمین شناسایی شد (شکل ۲ و جدول ۴). صحت کلی و آماره کاپای برآورد شده به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۸۸ بود. دو پوشش جنگل پهن‌برگ متراکم (۳۰/۶ درصد) و باغ–زراعت آبی (۲۶ درصد) در این منطقه غالب هستند. تقریباً ۶۵ درصد از تیپ‌های پوشش زمین شامل جنگل‌های طبیعی، جنگل‌کاری‌ها، اراضی جنگلی، درختچه‌زارها و مراتع هستند. بقیه اراضی کشاورزی، مناطق انسان‌ساز، مناطق آبی و اراضی لخت هستند. مطابق با جدول ۴ مدل‌های ماده

سوختنی محلی و استاندارد (Scott & Burgan, 2005) به تیپ‌های پوشش زمین در استان گیلان اختصاص یافت. این مدل‌ها می‌توانند ورودی برای اجرای شبیه‌سازی رفتار آتش و همچنین برای برآورد شاخص ریسک آتش و آثار آتش باشند.

در منطقه مورد مطالعه، مدل‌های ماده سوختنی جنگل در مناطق مرتفع و کوهستانی غالب است. جنگل پهن-برگ خزان‌کننده متراکم (۳۰/۶ درصد)، نیمه‌متراکم (۴/۳ درصد) و کم‌تراکم (۴/۴ درصد) به‌صورت نواری در سراسر منطقه مورد مطالعه گسترده است، درحالی‌که جنگل‌کاری‌های همیشه‌سبز سوزنی‌برگ (حدود ۱ درصد) در مناطق کم‌ارتفاع به‌صورت پراکنده است. مدل‌های ماده سوختنی مراتع (در مجموع ۱۸/۷ درصد) شامل علفزارها و بوته‌زارها در مناطق جنوبی استان و تا حدی غرب آن غالب است. بیشتر بوته‌زارها دارای تراکم متوسط و زیاد هستند. مدل‌های ماده سوختنی باغ-زراعت آبی (۲۶ درصد) در سراسر شمال استان و تاحدی شرق استان غالب است، درحالی‌که زراعت دیم (۴ درصد) در بخش جنوب-مرکزی استان پراکنش دارد. توزیع بالاتر این مناطق کشاورزی (باغ-زراعت آبی و زراعت دیم) در مقایسه با سایر پوشش‌های زمین در بخش شمالی استان مطابق با نتیجه تحقیق محمد حسنی لر و همکاران (Mohammad Hasani Lor, Vafakhah & Pourghasemi, 2016) است. مدل‌های ماده سوختنی درختچه‌زار (۰/۲۵ درصد) و اراضی جنگلی (۳/۶ درصد) نیز به‌صورت محدود و پراکنده در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. درنهایت، مدل‌های ماده سوختنی مناطق انسان‌ساز (۳/۲ درصد) مربوط به شهرها و روستاها است که بیشتر در بخش شمالی استان و در مرز جنوبی دریای کاسپین در حومه شهرها و مناطق روستایی توزیع شده است. مناطق آبی (۲/۴ درصد) نیز به‌صورت پراکنده در بخش شمالی، مرکزی و جنوبی استان موجود است.



شکل ۲- تیپ‌های پوشش زمین در استان گیلان

Fig.2. Land use types of the Guilan Province

جدول ۴- تیپ‌های پوشش زمین و مدل‌های ماده سوختنی محلی و استاندارد (Scott & Burgan, 2005) اختصاص یافته در استان گیلان

Table 4- Land use types and custom and standard (Scott & Burgan, 2005) fuel models designated for the Guilan Province

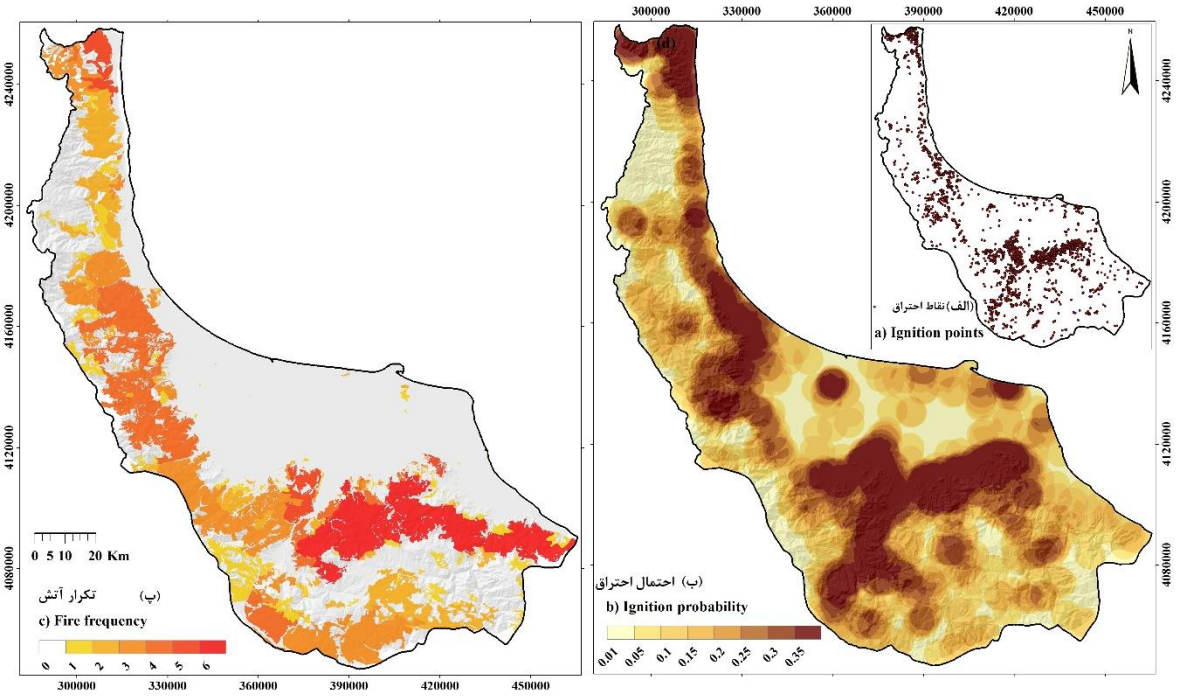
مدل ماده سوختنی	پوشش (درصد)	مساحت (هکتار)	پوشش زمین	
Fuel model	**Cover (%)**	**Area (ha)**	**Land use**	
FM36	3.58	50209.11	Woodland	اراضی جنگلی
NB9 (Scott & Burgan, 2005)	0.10	1407.27	Bare ground	اراضی لخت
NB3 (Scott & Burgan, 2005)	26.01	365219.53	Orchard-irrigation farming	باغ- زراعت آبی
FM30	4.43	62188.70	Dense broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ کم تراکم
FM31	3.62	430023.04	Sparse broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ

				متراکم
جنگل پهن‌برگ نیمه متراکم	Semi-dense broadleaved forest	60701.95	4.32	FM32
جنگل‌کاری پهن‌برگ	Broadleaved plantation	20828.75	1.48	FM34
جنگل‌کاری سوزنی–برگ	Conifer plantation	13640.59	0.97	FM35
درختچه‌زار	Shrublands	3559.43	0.25	FM33
زراعت دیم	Dry farming	56155.09	4.00	FM26
مرتع کم تراکم	Scarce & low rangeland	31776.07	2.26	FM27
مرتع متراکم	Dense rangeland	140328.11	9.99	FM28
مرتع نیمه متراکم	Medium density rangeland	90838.43	6.47	FM29
مناطق انسان‌ساز	Water bodies	44361.98	3.16	NB1 (Scott & Burgan, 2005)
مناطق آبی	Built-up lands	33161.94	2.36	NB8 (Scott & Burgan, 2005)
کل	**Total**	**1404400**	**100**	–

FM مخفف Fuel Model (مدل ماده سوختنی) FM stands for Fuel Model.

NB مخفف Non-burnable (غیرقابل سوختن) NB stands for Non-burnable.

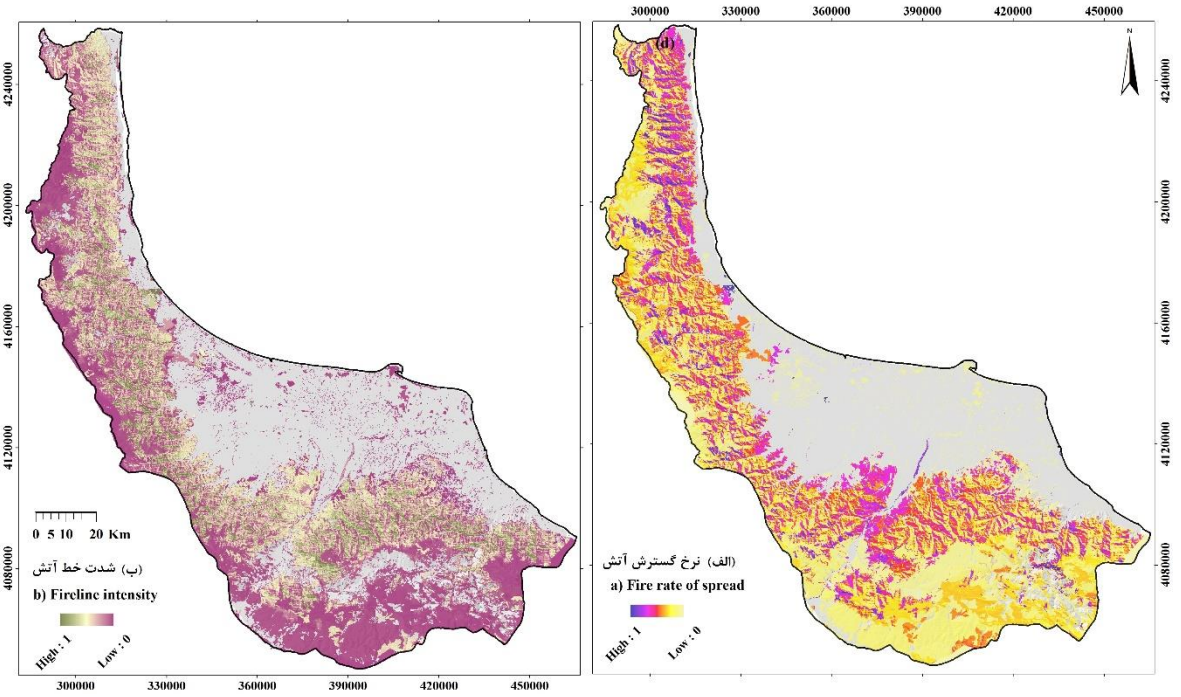
در مورد اطلاعات حوادث آتش‌سوزی تاریخی در منطقه مورد مطالعه، نقشه احتمال احتراق با درون‌یابی نقاط احتراق تاریخی (۲۱۸۰ نقطه احتراق؛ شکل ۳الف) با استفاده از الگوریتم وزن‌دهی معکوس در کل منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۳ب). بر اساس این نقشه، بیشترین احتمال احتراق در مرکز و شمال–غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد که با آتش‌سوزی‌ها از نظر تاریخی هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، شکل ۳پ نقشه توزیع تکرار آتش‌سوزی (فراوانی آتش) برای محیط آتش تاریخی در جنگل‌ها و مراتع منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه، بیشترین تکرار آتش در نواحی شرقی–مرکزی و ناحیه کوچکی در منتهی–الیه غربی استان رخ داده است.



شکل ۳- نقشه‌های توزیع مکانی نقاط احتراق تاریخی (الف؛ ۲۰۲۲-۱۹۹۲)، احتمال احتراق (ب) و تکرار آتش‌سوزی‌های (پ) مشاهده شده در استان گیلان

Fig.3. Spatial distribution maps of historical ignition points (a; 1992-2022), ignition probability (b), and fire frequency (c) observed in Guilan Province.

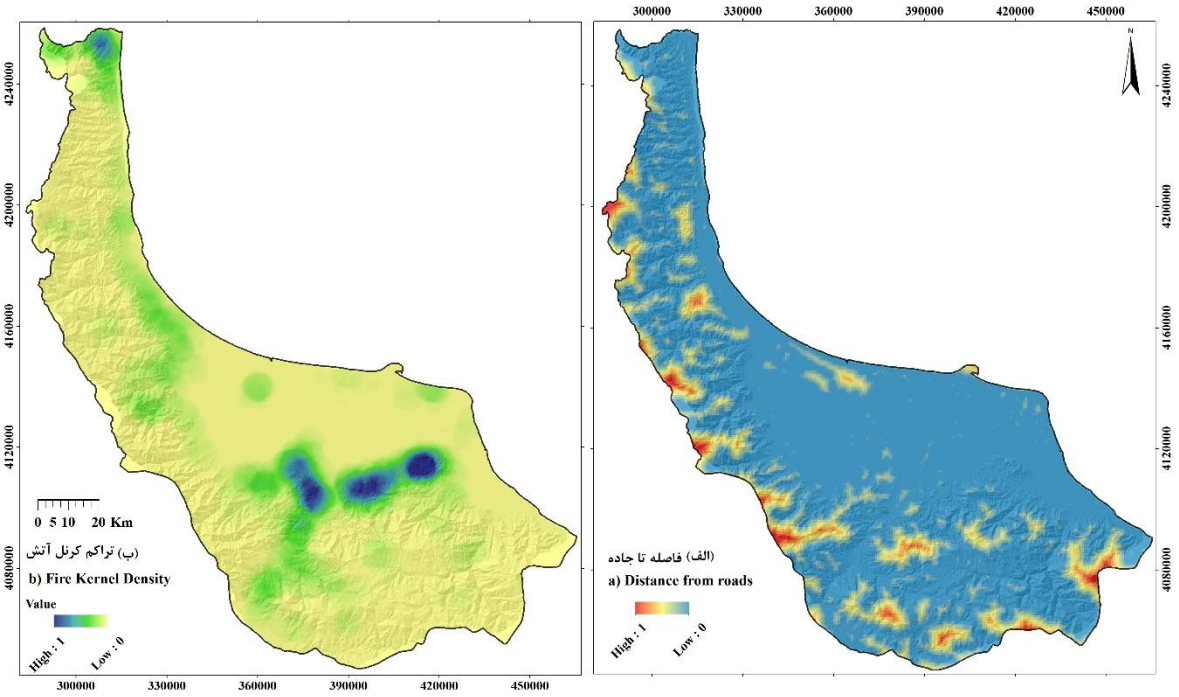
در ادامه، رفتار آتش برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش ارزیابی شد (شکل ۴). نتایج تجزیه‌وتحلیل توزیع ارزش‌های این خروجی‌ها نشان می‌دهد که در بیش از ۹۳ درصد از منطقه مورد مطالعه ارزش نرخ گسترش آتش از آستانه ۰/۲۵ فراتر نمی‌رود و کمتر از ۷ درصد این منطقه دارای ارزش‌های بالاتر است. هم‌چنین، در بیش از ۹۰ درصد از منطقه مورد مطالعه مقدار شدت خط آتش از ۰/۲۵ فراتر نمی‌رود و حدود ۱۰ درصد این منطقه نیز دارای ارزش‌های بالاتر است. با توجه به نقشه توپوگرافی (شکل ۱) و نقشه پوشش زمین (شکل ۲) به نظر می‌رسد که بالاترین مقادیر شدت خط آتش و نرخ گسترش در بالاترین ارتفاعات و نیز در پوشش‌های گیاهی متراکم باشد. این نتیجه مشابه با نتیجه اوکانو و یامانو (Okano & Yamano, 2015) است که مقادیر حداکثر شدت خط آتش شامل اثر توپوگرافی بود، در جایی که سراشیبی قرار داشت و توسط جنگل‌های پهن‌برگ متراکم احاطه شده بود.



شکل ۴- نقشه‌های توزیع مقادیر تجدید مقیاس‌شده (بدون بعد) نرخ گسترش آتش (الف) و شدت خط آتش (ب) شبیه‌سازی شده برای استان گیلان

Fig. 4. Distribution maps of rescaled (dimensionless) values of fire rate of spread (a) and fireline intensity (b) simulated for Guilan province

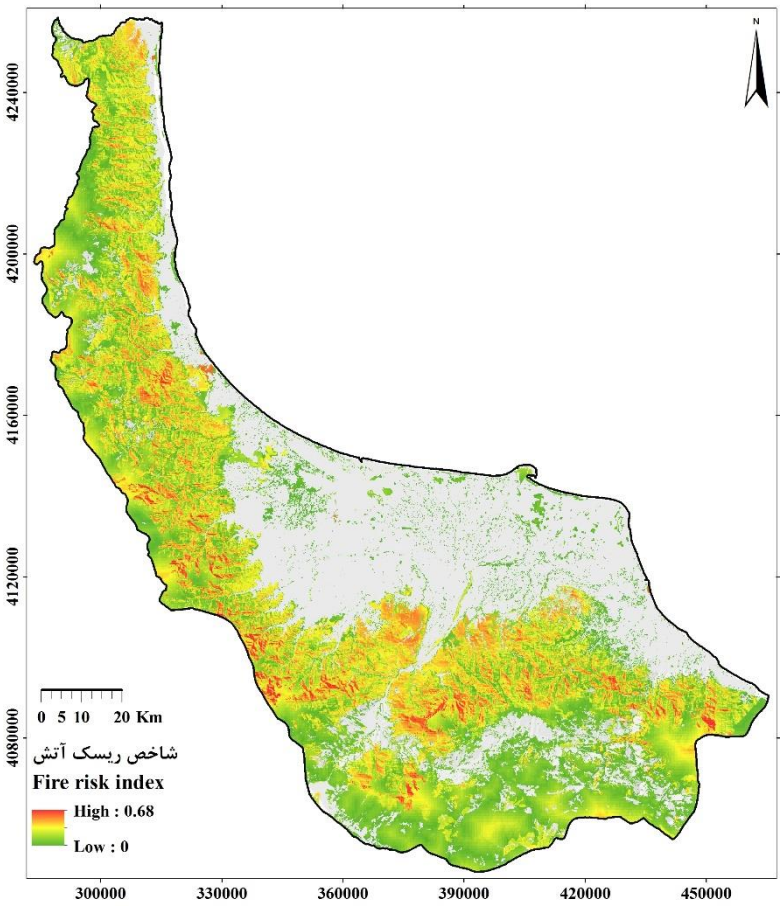
دو مؤلفه دیگر شاخص ریسک آتش شامل عامل انسانی فاصله تا جاده و تراکم کرنل آتش/تاریخچه آتش (شکل ۵ الف و ب) که عمدتاً به احتمال وقوع آتش‌سوزی مربوط می‌شود، به نسبت بسیار کمتری از منطقه مورد مطالعه اشاره دارد. این نتیجه مشابه با مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) بود.



شکل ۵- نقشه‌های توزیع مقادیر تجدید مقیاس‌شده (بدون بعد) فاصله تا جاده (الف) و تراکم کرنل آتش (ب) برای استان گیلان

Fig. 5. Distribution maps of rescaled (dimensionless) values of distance to road (a) and fire kernel density (b) for Guilan province

درنهایت، ادغام چهار مؤلفه بالا (شکل ۴ و شکل ۵) منجر به محاسبه شاخص نهایی و مشخص مکانی ریسک آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه شد (شکل ۶). ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰ تا ۰/۶۸ با میانگین ۰/۱۱ متغیر بود. مقدار شاخص ریسک آتش ۰/۰ در بخش‌های پست و کم‌ارتفاع منطقه مورد مطالعه، که عمدتاً توسط مدل‌های ماده سوختنی غیرقابل سوختن (اراضی لخت، باغ-زراعت آبی، مناطق انسان‌ساز و مناطق آبی؛ جدول ۴) پوشیده شده است، مشاهده می‌شود. درحالی‌که مقدار بیشینه ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات، جایی که پوشش‌های جنگلی متراکم وجود دارد، مشاهده می‌شود. در این مطالعه، مشابه با مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) شاخص ریسک آتش موزائیک پیچیده‌ای از مناطق با خواص اشتعال‌پذیری متفاوت و درجه ریسک آتش متفاوت را نشان می‌دهد که منعکس‌کننده تنوع گیاهی ترکیبی و ساختاری و همچنین نقش برجسته توپوگرافی منطقه مورد مطالعه است. هم‌چنین، الگوی توزیع ارزش‌های شاخص ریسک آتش نشان می‌دهد که در حدود ۷۹ درصد از منطقه مورد مطالعه با ریسک آتش‌سوزی کم (شاخص ریسک کمتر از ۰/۲۵) و حدود ۲۱ درصد این منطقه با ریسک آتش‌سوزی زیاد (شاخص ریسک بیش از ۰/۲۵) مواجه است.



شکل ۶- نقشه شاخص ریسک آتش برای استان گیلان

Fig. 6. Fire risk index map for Guilan province

مطابق با نتایج به دست آمده در این مطالعه، ریسک آتش از مناطق پست و کم‌ارتفاع به سمت ارتفاعات در منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. از دلایل کم بودن شاخص ریسک آتش در این مناطق می‌توان به این مورداشاره کرد که اولاً مناطق کم‌ارتفاع اغلب با زمین‌های کشاورزی و سایر فعالیت‌های انسانی ترکیب شده است که این مناطق به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی اغلب با آتش‌سوزی‌های مکرر، اما با سطح کوچک (به دلیل دسترسی زیاد به جاده و تجهیزات اطفای آتش) همراه است که به‌عنوان‌مثال برای از بین بردن پسچر مزارع سوزانده می‌شود. دوماً حضور شدید انسان در این منطقه منجر به تخریب پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش بار ماده سوختنی آماده اشتعال و نیز کاهش احتمال آتش‌سوزی با شدت بالا در این مناطق شده است. در مطالعه راتکلیف و همکاران (Ratcliff et al., 2022) نیز مدل‌های رفتار آتش نشان داد که کاهش ماده سوختنی در منطقه مورد مطالعه طول شعله و شدت آتش را کاهش می‌دهد و منجر به آتش‌سوزی‌های قابل‌کنترل‌تر می‌شود؛ بنابراین، احتمال بالاتری از تبدیل‌شدن یک آتش‌سوزی به آتش‌سوزی بزرگ در

ارتفاعات و نواحی با دسترسی محدود به جاده و تجهیزات اطفای آتش در مقایسه با مناطق کم ارتفاع وجود دارد. در گزارش گالوس و همکاران (Glaves, Crowle, Bruemmer & Lenaghan, 2020) نیز در مناطق پست تعداد آتش‌سوزی‌های بسیار بیشتر رخ داده است، اگرچه آتش‌سوزی‌های بزرگ با ارتفاعات مرتبط هستند. مطابق با مطالعه نارایانارج و ویمبرلی (Narayanaraj & Wimberly, 2012) اشتعال‌های ناشی از انسان در نزدیکی جاده‌ها، در مناطق پر تراکم جاده‌ها و نزدیک نواحی مسکونی متمرکز شده‌اند. در مقابل، اشتعال‌های طبیعی ناشی از رعدوبرق در مناطق کم تراکم جاده، دور از نواحی مسکونی و در مناطق کم تراکم جمعیت متمرکز بودند. اگرچه بیشتر آتش‌سوزی‌های کوچک در مناطق مجاور جاده‌ها رخ می‌دهد، اما آن‌ها تنها بخش کوچکی از کل سطح سوخته‌شده را تشکیل می‌دهند. در مقابل، آتش‌سوزی‌های بزرگ در مناطق دور از جاده، بیشتر سطح سوخته‌شده را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین، تأثیر جاده‌های جنگلی در محدود کردن اندازه آتش احتمالاً بیشتر از تأثیر جاده‌ها بر افزایش اشتعال آتش است.

در مورد ریسک آتش در جنگل‌های این منطقه که اغلب جنگل‌های معتدله یا پهن‌برگ خزان‌کننده هستند نیز لازم به ذکر است که این جنگل‌ها، علی‌رغم بار ماده سوختنی مرده نسبتاً زیاد، که در اثر ریزش سالانه برگ‌ها و سرعت تجزیه نسبتاً آهسته این منطقه ایجاد می‌شود، به‌طورکلی دارای شرایط مرطوبی هستند که باعث افزایش رطوبت ماده سوختنی و جلوگیری از اشتعال آن و نیز تبدیل شدن به آتش‌سوزی با شدت بالا می‌شود. بااین‌وجود، به دلیل وزش بادهای گرم محلی (گرمیج یا گرمش) در مواقع زیادی از سال به‌ویژه در پائیز و زمستان، این جنگل‌ها به‌سرعت رطوبت خود را از دست داده و آماده اشتعال می‌شوند. در مطالعه عابد و همکاران (Abed, Sahraeyan & Rezaei, 2016) نیز به نقش گرمش به‌عنوان بادی گرم و خشک که بیشتر در فصل سرد سال، در شمال رشته‌کوه البرز می‌وزد و علت اصلی آن استقرار سامانه پرفشار بر روی فلات ایران و سامانه کم‌فشار بر روی جنوب دریای کاسپین است، در افزایش احتمال آتش‌سوزی جنگل‌ها در گیلان اشاره شده است. هم‌چنین، مطابق مطالعه اورز و همکاران (Evers, Holz, Busby & Nielsen-Pincus, 2022) در جنگل‌های بارانی معتدله، فعالیت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که دارای زمستان‌های معتدل و مرطوب و تابستان‌های خشک گرم است، با حوادث آتش‌سوزی اپیزودیک با شدت متوسط تا بالا تحت تأثیر بادهای گرم و خشک مشخص می‌شود. در مطالعه حیدری و همکاران (Heydari, Arabi & Warziniack, 2021a) نیز آتش‌سوزی جنگل‌ها با ماه‌های گرم و خشک مرتبط است و افزایش این ماه‌ها منجر به افزایش فعالیت و ریسک آتش‌سوزی شده است.

تخمین ریسک آتش و شناسایی نواحی پرریسک (آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر آتش با شدت بالا) احتمالاً اولین قدم ضروری برای توسعه یک راهبرد مدیریت آتش مؤثر است (Shi & Zhang, 2023). با شناسایی این نواحی پرریسک، برنامه‌ریزی برای اقدامات کاهش ریسک و آسیب آتش ازجمله کاهش یا حذف ماده

سوختنی اقدام ضروری بعدی است (Mauri, Hernández Paredes, Núñez Blanco & García Feced, 2023). این در حالی است که در ایران رویکردهای سنتی مدیریت آتش تقریباً به‌طور انحصاری بر اطفای آتش تکیه دارند و علی‌رغم افزایش میزان منابع تخصیص‌یافته به‌منظور تجهیز نیروها و بهبود فنون و روش‌های اطفاء حریق در دهه‌های گذشته، موفقیتی در این زمینه حاصل نشده است؛ بنابراین، یک رویکرد جایگزین پیشنهاد می‌شود که باید بر اساس تعادل بهتر بین فعالیت‌های اطفای آتش، فعالیت‌های پیشگیرانه و افزایش سطح آمادگی شامل مدیریت ماده سوختنی باشد. هم‌چنین، مدیریت یکپارچه آتش به‌عنوان یک رویکرد مؤثرتر مدیریت آتش پیشنهاد می‌شود که از شیوه‌های مدیریت جنگل‌ها و مراتع ازجمله کاهش ماده سوختنی، تبدیل و جداسازی برای کاهش احتمال اشتعال به آتش‌سوزی با شدت بالا و افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان استفاده می‌کند (Wollstein et al., 2022). از سوی دیگر، با وجود عدم قطعیت‌های مربوط به آثار تغییرات اقلیمی بر رژیم‌های آتش‌سوزی، به نظر می‌رسد که آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع در آینده شدیدتر خواهند شد. در مواجه با این آثار، برنامه‌ریزی برای سوزاندن تجویزی[1] تحت سناریوهای شبیه‌سازی آتش آزمایش شده، همراه با سایر تیمارهای کاهش ماده سوختنی می‌تواند برای کاهش شدت آتش‌سوزی‌های آینده موردتوجه قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد چگونه انواع اطلاعات سیمای سرزمین (توپوگرافی و ماده‌سوختنی)، شرایط آب‌وهوایی و سابقه تاریخی آتش در منطقه به همراه عوامل انسانی مؤثر مانند فاصله تا جاده و سکونت‌گاه‌ها، می‌توانند برای تولید تخمین‌های مکانی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از مدل‌سازی رفتار آتش استفاده شوند. آماده‌سازی این ورودی‌ها برای مدل‌سازی بسیار زمان‌بر و دشوار است؛ بااین‌حال، این چالش نباید متخصصان و مدیران جنگل و مرتع را از استفاده از این مدل‌ها منصرف کند. با توجه به توزیع مکانی شاخص ریسک آتش‌سوزی در این مطالعه، مناطق با ریسک متوسط و زیاد ۲۱ درصد از استان گیلان را شامل می‌شود؛ بنابراین، در این مناطق باید منابع مدیریت آتش با تمرکز بیشتری کنترل و برنامه‌ریزی شود، زیرساخت‌های پیشگیری از آتش تقویت شود، آموزش پیشگیری از آتش برای ارتقای آگاهی مردم در برابر آتش انجام شود و اقدامات مختلفی برای افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر این مناطق انجام شود. اگرچه با وجود انجام این اقدامات، آتش‌سوزی‌های احتمالی زیادی همچنان به‌صورت تصادفی و نامشخص باقی می‌مانند و کنترل کامل آن‌ها بسیار دشوار است؛ اما برآورد ریسک آتش‌سوزی و تهیه مدل پیش‌بینی آن می‌تواند در

[1] Prescribed fire

کاهش ریسک آتش‌سوزی، جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از آتش‌سوزی و تخصیص بهتر منابع پیشگیری از آتش‌سوزی کمک کند. روش ارائه شده در این تحقیق، امکان پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی و ارزیابی کمی آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌ها و مراتع را برای تجزیه‌وتحلیل وضعیت جامع این آتش‌سوزی‌ها، درک توزیع مکانی و درجه آسیب آتش‌سوزی‌ها و ارائه یک راهکار علمی برای پشتیبانی فنی به‌منظور پیشگیری و مدیریت آتش‌سوزی را فراهم می‌کند.

References

Abed, H., Sahraeyan, F., & Rezaei, P. (2016). The Effects of Garmesh Wind on Weather Conditions of Rasht Synoptic Weather Station. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *4*(2), 59-76. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v4i2.29820

Alcasena, F., Ager, A., Le Page, Y., Bessa, P., Loureiro, C., & Oliveira, T. (2021). Assessing Wildfire Exposure to Communities and Protected Areas in Portugal. *Fire*, *4*, 82. https://doi.org/10.3390/fire4040082

Alhaj Khalaf, M. W., Shataee Joibary, S., Jahdi, R., & Bacciu, V. (2021). Improved forest fire spread mapping by developing custom fire fuel models in replanted forests in Hyrcanian forests, Iran. *Forest Systems*, *30*(2), e008. https://doi.org/10.5424/fs/2021302-17980

Awad, M., & Khanna, R. (2015). Support Vector Machines for Classification. *In Efficient Learning Machines*. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_3

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. *Forest Fire Control and Use*, 61 - 89.

Calkin, D. E., Ager, A. A., & Gilbertson-Day, J. (2010). Wildfire risk and hazard: procedures for the first approximation. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-235. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.*

Catry, F. X., Rego, F. C., Bação, F. L., & Moreira, F. (2009). Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, *18*(8), 921-931. https://doi.org/10.1071/WF07123

De Cáceres, M., Martin StPaul, N., Turco, M., Cabon, A., & Granda, V. (2018). Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling & Software*, *108*, 186-196. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.003

Dorph, A., Marshall, E., Parkins, K. A., & Penman, T. D. (2022). Modelling ignition probability for human- and lightning-caused wildfires in Victoria, Australia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*, 3487–3499. https://doi.org/10.5194/nhess-22-3487-2022.

Evers, C., Holz, A., Busby, S., & Nielsen-Pincus, M. (2022). Extreme Winds Alter Influence of Fuels and Topography on Megafire Burn Severity in Seasonal Temperate Rainforests under Record Fuel Aridity. *Fire*, *5*, 41. https://doi.org/10.3390/fire5020041

Finney, M. A. (2004). *FARSITE, Fire Area Simulator--model development and evaluation* . US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Finney, M. A. (2005). The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*, *211*, 97–108. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010

Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. *In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. Fuels Management-How to Measure Success. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 213-220* .

Ghayour, L., Neshat, A., Paryani, S., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., … & Ahmad, A. (2021). Performance Evaluation of Sentinel-2 and Landsat 8 OLI Data for Land Cover/Use Classification Using a Comparison between Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, *13*, 1349. https://doi.org/10.3390/rs13071349

Glaves, D. J., Crowle, A. J. W., Bruemmer, C., & Lenaghan, S. A. (2020). *The causes and prevention of wildfire on heathlands and peatlands in England*. Natural England Evidence Review NEER014. Peterborough: Natural England.

Heydari, H., Arabi, M., & Warziniack, T. (2021a). Effects of Climate Change on Natural-Caused Fire Activity in Western U.S. National Forests. *Atmosphere*, *12*, 981. https://doi.org/10.3390/atmos12080981

Heydari, M., Attar Roshan, S., Jaferyan, E., & Abiyat, M. (2021b). Modeling and Zoning of Fire Prone Areas in Zagros Forests Using Geographic Information System Based on Logistic Regression. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(2), 43-58. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68903.1019

Hood, S. M., Varner, J. M., Jain, T. B., & Kane, J. M. (2022). A framework for quantifying forest wildfire hazard and fuel treatment effectiveness from stands to landscapes. *Fire Ecology*, *18*, 33. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00157-0

Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F. J., Arabi, M., Arca, B., & Duce, P. (2020). Evaluating landscape-scale wildfire exposure in northwestern Iran. *Natural Hazards*, *101*, 911–932. https://doi.org/10.1007/s11069-020-03901-4

Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F., & Del Giudice, L. (2023). Assessing the Effectiveness of Silvicultural Treatments on Fire Behavior in the Hyrcanian Temperate Forests of Northern Iran. *Environmental Management*, *72*, 682–697. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01785-1

Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modeling*, *1* (2), 1-13. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2021.1215

Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human Activity Affects Forest Fires: The Impact of Anthropogenic Factors on the Density of Forest Fires in Poland. *Forests*, *12*, 728. https://doi.org/10.3390/f12060728

Land use plan of Guilan Province. (2016). Management and Planning Organization (MPO) of Guilan Province. [In Persian]

Mauri, E., Hernández Paredes, E., Núñez Blanco, I., & García Feced, C. (2023). Key Recommendations on Wildfire Prevention in the Mediterranean. *European Forest Institute*,*10*. https://doi.org/10.36333/rs6

Meteorological Quarterly of the Guilan Province. (2019). General Meteorological Department of Guilan Province. [In Persian]

Mohammad Hasani Lor, S., Vafakhah, M., & Pourghasemi, H. R. (2016). *Determining the land use area of Gilan Province using supervised classification*. Paper presented of the 2th National Conference on Passive Defense in Agriculture, Natural Resources and Environment with Sustainable Development Approach, Tehran.[In Persian] https://civilica.com/doc/567112

Narayanaraj, G., & Wimberly, M. C. (2012). Influences of forest roads on the spatial patterns of human- and lightning-caused wildfire ignitions Applied Geography. *Applied Geography*, *32*(2), 878-888. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.004

Nelson Jr, R. M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, *30*(7), 1071-1087. https://doi.org/10.1139/x00-032

Okano, Y., & Yamano, H. (2015). Forest fire propagation simulations for a risk assessment methodology development for a nuclear power plant. *Case Studies in Fire Safety*, *4*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.csfs.2015.05.001

Oliveira, S., Rocha, J., & Sá, A. (2021). Wildfire risk modeling. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *23*, 100274. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100274

Parisien, M. C., Dawe, D. A., Miller, C., Stockdale, C. A., & Armitage, O. B. (2019). Applications of simulation-based burn probability modelling: A review. *International Journal of Wildland Fire*, *28*, 913-926. https://doi.org/10.1071/WF19069

Ratcliff, F., Rao, D., Barry, S., Dewees, S., Macaulay, L., Larsen, R., … & Forero, L. (2022). Cattle grazing reduces fuel and leads to more manageable fire behavior. *California Agriculture*, *76*(2), 60-69. https://doi.org/10.3733/ca.2022a0011

Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Vol. 115). Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.

Sá, A. C. L., Aparicio, B. A., Benali, A., Bruni, C., Salis, M., Silva, F., … & Pereira, J. (2022). Coupling wildfire spread simulations and connectivity analysis for hazard assessment: a case study in Serra da Cabreira, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*, 3917–3938. https://doi.org/10.5194/nhess-22-3917-2022

Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Palaiologou, P., Alcasena-Urdiroz, F., Ager, A., … & Duce, P. (2021). Application of simulation modeling for wildfire exposure and transmission assessment in Sardinia, Italy. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *58*,102189. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102189

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard Fire Behavior Fuel Models : A Comprehensive Set for Use with Rothermel' S Surface Fire Spread Model*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Scott, J. H., Thompson, M. P., & Calkin, D. E. (2013). *A wildfire risk assessment framework for land and resource management*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Paper RMRS-GTR-315.

Shi, C., & Zhang, F. (2023). A Forest Fire Susceptibility Modeling Approach Based on Integration Machine Learning Algorithm. *Forests*, *14*, 1506. https://doi.org/10.3390/f14071506

Statistical Yearbook of Guilan Province. (2019). Guilan Province Governor's Planning Office, Office of Statistics and Information GIS(2011-2018). .[In Persian]

Teimouri, M., & Kornejady, A. (2023). Evaluating Fire Hazard Potentials using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Logistic Regression Approaches in Golestan National Park. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(3), 171-191. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79999.1313

Twidwell, D., West, A. S., Hiatt, W. B., Ramirez, A., Winter, J. T., Engle, D. M., … & Carlson, J. D. (2016). Plant Invasions or Fire Policy: Which Has Altered Fire Behavior More in Tallgrass Prairie?. *Ecosystems*, *19*, 356–368. https://doi.org/10.1007/s10021-015-9937-y

Wollstein, K., Creutzburg, M. K., Dunn, C., Johnson, D. D., O'Connor, C., & Boyd, C. S. (2022). Toward Integrated Fire Management to Promote Ecosystem Resilience. *Rangelands*, *44*(3), 227-234. https://doi.org/10.1016/j.rala.2022.01.001

Xofis, P., Konstantinidis, P., Papadopoulos, I., & Tsiourlis, G. (2020). Integrating Remote Sensing Methods and Fire Simulation Models to Estimate Fire Hazard in a South-East Mediterranean Protected Area. *Fire*, *3*, 31. https://doi.org/10.3390/fire3030031

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.130-158 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88423.1493 Open access

The Relationship Between Quantitative and Qualitative Networks of Groundwater with the Characteristics of Alluvial fan in The Southern Hillside of Alborz center (Karaj to Takestan)

Ali Rajabi Eslami[a] , Manijeh Ghahroudi Tali[b*], Alireza Salehipour Milani[c]

[a] *PhD student in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Tehran Shahid Beheshti University, Tehran,Iran.*
[b] *Professor in Geomorphology Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Shahid Beheshti University, Tehran,Iran.*
[c] *Assistant Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Shahid Beheshti University, Tehran,Iran.*

Received: 9 June 2024 ***Revised: 1 September 2024*** ***Accepted: 3 October 2024***

Extended Abstract

Introduction

Groundwater is considered one of the most important indicators of environmental development, and land planners pay great attention to identifying the quantitative and qualitative status of these resources. In general, the sustainable management of groundwater resources during crises can reduce the effects of drought and water shortages. This issue is particularly significant in the central plains of Iran, where water scarcity and low rainfall are prevalent. Therefore, to manage these resources effectively, it is crucial to identify the factors that influence them. In recent years, increased attention has been paid to landforms and environmental indicators as parameters affecting the permeability and variability of groundwater. Over the past decade, there has been a notable increase in studies and articles in this field.

Among the key landforms in the geomorphology of arid and semi-arid regions of Iran are alluvial fans. Due to their unique structure, these fans provide an ideal environment for groundwater storage. This research focuses on the southern slopes of the central Alborz mountains to develop a model based on geomorphic parameters for assessing the quantitative and qualitative potential

[*] .Corresponding author: Manijeh Ghahroudi Tali Email: E-mail: m-ghahroudi@sbu.ac.ir Tel:+989121263968

How to cite this Article: Rajabi Eslami, A. , Ghahroudi Tali, M. , & Salehipour, A. (2024). The Relationship Between Quantitative and Qualitative Networks of Groundwater with the Characteristics of Alluvial fan in The Southern Hillside of Alborz center (Karaj to Takestan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),130-158

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

of groundwater. The findings of this study present innovative approaches to utilizing landforms in identifying areas with suitable groundwater potential.

Material and Methods

The alluvial fans located in the southern slopes of the central Alborz hills cover a significant part of the western plains of Tehran Province, as well as the southern plains of Alborz and Qazvin provinces. The total area of this region is 7,450 square kilometers, and it is part of the sub-basins of the Salt Lake system.

In this research, the morphometric characteristics of 23 alluvial fans in the southern plains of central Alborz were analyzed using correlational research and ex-post facto methods. With a practical approach, the boundaries of the alluvial fans were delineated using satellite images and topographic maps. Eleven morphometric parameters, including sweep angle, area, volume, concavity, slope, apex and base height, length, base length, radius, and height difference of the alluvial fans, were extracted.

Additionally, the relationships between water table depth, well discharge, and electrical conductivity (EC) of groundwater with morphometric parameters were evaluated using statistical analysis of 587 water wells.

Results and Discussion

The results showed that changes in discharge, EC, and water table depth were influenced by the morphometry of the alluvial fans, with contributions of 63%, 27%, and 54%, respectively. Furthermore, the results revealed that among the 11 morphometric parameters, increases in the average values of four parameters—area, cone length, base length, and radius of the alluvial fan—led to higher groundwater extraction potential. Conversely, decreases in apex height, sweep angle, and base height corresponded to increases in flow rates.

The findings indicated that in alluvial fans where the apex and base elevations are higher than others, the water table is lower relative to ground level due to increased sedimentation and sediment thickness. Moreover, the depth of the water table increases with the enlargement of the area, length, base length, and radius of the alluvial fans. Alluvial fans with large, circular, fan-shaped structures exhibited higher levels of groundwater stagnation.

Conclusion

Reducing concavity or sediment diameter on the surface of alluvial fans can effectively decrease soil refinement during water infiltration. This study highlights that examining geomorphic landforms prior to implementing water resource management plans can The analysis of groundwater electrical conductivity (EC) demonstrated that EC values increased in alluvial fans with high sediment volume and low concavity.significantly reduce errors in selecting locations for aquifer recharge or groundwater well excavation.

This research, through its innovative approach and robust statistical analysis, has introduced a new model to evaluate the role of alluvial fans in the quantitative and qualitative changes in groundwater. The findings offer an efficient and effective framework for identifying groundwater table potentials, providing valuable insights for sustainable water resource management.

Keywords:Groundwater Resources, Alluvial Fan Morphometry, Geomorphic Indicators, Sustainable Groundwater Management, Central Alborz Groundwater Dynamics

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۱۵۸-۱۳۰

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88423.1493 دسترسی آزاد

ارتباط پارامترهای کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی البرز مرکزی (کرج تا تاکستان)

علی رجبی اسلامی- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

منیژه قهرودی تالی[۱]- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

علیرضا صالحی پور میلانی- استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۳/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۱۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۷/۱۲

چکیده

آب زیرزمینی به‌عنوان جزئی از یک سیستم تعاملی با سطح زمین در قلمرو تأثیرپذیری ژئومورفولوژی قرار دارد و به میزان زیادی تحت تأثیر و کنترل لند فرم‌ها و فرآیندها است و می‌تواند بر میزان کمیت و کیفیت آب زیرزمینی اثر بگذارد. یکی از لند فرم‌های مهم ژئومورفولوژی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مخروط افکنه‌هاست که محیط بسیار مناسبی را برای ذخیره‌سازی آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. در این پژوهش سعی شده به تحلیل ارتباط تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های مخروط افکنه‌ها در دشت‌های جنوبی البرز مرکزی پرداخته شود، تا از این طریق بتوان روشی مناسب و مبتنی بر پارامترهای ژئومورفیک را برای پتانسیل‌یابی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه داد. بر این اساس به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی ابتدا مرز ۲۳ مخروط افکنه ترسیم و ۱۱ پارامتر مورفومتری شامل زاویه جاروب، مساحت، حجم، تقعر، شیب، ارتفاع رأس و قاعده، طول، طول قاعده، شعاع و اختلاف ارتفاع مخروط افکنه استخراج گردید. همچنین ارتباط عمق سطح ایستابی، دبی آب چاه و میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی با پارامترهای مورفومتری در 587 حلقه چاه آب با استفاده از تحلیل‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد تغییرات دبی، هدایت الکتریکی و عمق سطح ایستابی به ترتیب با میزان ۶۳٪، ۲۷ ٪ و ۵۴٪ تحت تأثیر مورفومتری مخروط افکنه‌ها قرار دارد. با افزایش میزان مساحت، طول، شعاع و طول قاعده مخروط افکنه‌ها میزان دبی آب چاه‌ها افزایش پیدا می‌کند و با افزایش حجم و تقعر میزان هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش نشان داد ویژگی مخروط افکنه‌ها می‌تواند به‌عنوان روشی در ارزیابی تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک مورداستفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: منابع آب زیرزمینی ریخت‌سنجی مخروط افکنه ، شاخص‌های ژئومورفولوژیکی ، دینامیک آب زیرزمینی البرز مرکزی.

[۱] نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۲۶۳۹۶۸

Email: m-ghahroudi@sbu.ac.ir

۱-مقدمه

کشور ایران با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارش سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر از کشورهای کم آب در جهان محسوب می‌شود (Asadi & Abd Manafi, 2022). این گستره بزرگ جغرافیایی با مشخصات هیدرولوژیکی خاص نظیر ۱۱۷ میلیارد مترمکعب حجم آب قابل‌دسترس، بر اساس آمارهای وزارت نیرو سالانه ۹۸.۱ میلیارد مترمکعب آب تجدید پذیر در کشور توزیع می‌شود که ۴۴.۳ میلیارد مترمکعب آن از منابع سطحی برداشت می‌شود و ۵۳.۹ میلیارد مترمکعب از منابع سفره‌های زیرزمینی برداشته می‌شود که از این میزان ۵۰.۵ میلیارد مترمکعب از چاه‌ها و ۳.۴ میلیارد مترمکعب از قنوات است Mehr News (Agency, 2022). به‌طورکلی منابع آب زیرزمینی در صورت حفاظت از آن‌ها به‌عنوان منابعی استراتژیک که در مواقع بحرانی می‌توانند آثار خشک‌سالی یا کم‌آبی را تقلیل دهند از اهمیت بسزایی برخوردارند و این وابستگی در بخش وسیعی از دشت‌های مرکزی ایران به دلیل نازل بودن بارش‌ها بیشتر است (Asadi & Abd Manafi, 2022) بنابراین توجه ویژه به مدیریت استراتژی و شناسایی پتانسیل‌های منابع آب زیرزمینی در برنامه‌های توسعه کشور امری مهم و اجتناب‌ناپذیر است. به‌طورکلی روش‌های سنتی نظیر ژئوالکتریک که در جهت شناخت پتانسیل آب‌های زیرزمینی به کار گرفته می‌شوند، اغلب زمان‌بر بوده و به نیروی انسانی و هزینه کرد زیاد نیاز دارد (Adabi khosh, 2019). در اینجا باید اشاره نمود که آبخوان‌ها به دلیل تعامل مستقیم و غیرمستقیم با سطح زمین در محدوده تأثیرپذیری لند فرم‌های ژئومورفولوژی قرار داشته و به‌وسیله آن کنترل می‌شود (این کنترل توسط تغییرهای بسیاری صورت گرفته که عبارت‌اند توپوگرافی و فرم، ویژگی مواد سطحی یا مورفوژنز، تغییرات آب و هوایی و هوازدگی‌ها، تغییرات زمانی (Zektser & Everett, 2004) بر این اساس می‌توان گفت توجه و تأکید بر ویژگی لندفرم‌ها و شاخص‌های ژئومورفیک به‌عنوان یک شاخص یا نمایانگر (Ravindran & Jeyaram, 1997) علاوه بر اینکه در مقایسه با روش‌های معمول اکتشاف آب زیرزمینی نقش واحدهای ژئومورفیک را در قالب یک پارامتر بسیار مهم در کنترل پتانسیل آب‌های زیرزمینی نادیده نمی‌گیرد بلکه ازنظر دقت عملیاتی،مسائل مالی و زمان انجام کار بسیار مقرون‌به‌صرفه و سریع است (Khalili Naftchali & Khashai, 2016) ازاین‌رو برای شناسایی لند فرم‌های مؤثر بر آب زیرزمینی می‌توان از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های تصمیم‌گیری استفاده نمود (Agarwal, Agarwal, Garg & Garg, 2013). مخروط افکنه‌ها یکی از لند فرم‌های مهم واصلی مناطق دشتی می‌باشند (Ghahraman, Zanganeh Asadi & Akbari, 2022) که برحسب نوع ساختار و ویژگی‌های خود، محیط بسیار مناسبی را برای نگهداشت آب زیرزمینی در اختیار نواحی کم آب قرار می‌دهد (Ravindran & Jeyaram, 1997). با توجه به اینکه اقلیم ایران اساساً خشک و نیمه‌خشک است و جریان‌ها و سیلاب‌های فصلی زیادی دارد، بخش وسیعی از مخروط افکنه‌ها از رسوبات درشت‌دانه تشکیل‌شده‌اند که توان بالایی در ذخیره و نگهداشت آب زیرزمینی دارند.

به‌طورکلی مخروط افکنه‌ها به‌عنوان یک لند فرم مهم در مناطق دشتی از دهانه‌ی رودخانه‌های خروجی از کوهستان شروع‌شده و تا نواحی پست دشت ادامه دارند (Blair & McPherson, 2009). این لندفرم‌ها یکی از مکان‌های مناسب برای حفر چاه‌های آب بوده که به دلیل ساختار رسوبی مناسب منابع و ذخایر قابل‌توجهی در آن‌ها تشکیل می‌شوند (Sedghi & Samani, 2015). در سال‌های اخیر نقش عوارض طبیعی و لند فرم‌ها در اکتشاف و مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک روش بهینه و کارآمد موردتوجه بسیاری از محققین داخلی قرارگرفته است (Rajabi Eslami, Ghahroudi Tali & Salehipour Milani, 2024)، که در اینجا به‌تفصیل برخی مطالعات صورت گرفته در ایران و جهان بیان شده است. هاتفی اردکانی و اختصاصی (Hatefi Ardakani & Ekhtesasi, 2016) در مقاله خود به بررسی پتانسیل آب زیرزمینی از طریق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که آبرفت‌های کواترنر متشکل از تراس‌ها و مخروط افکنه‌های کم ارتفاع جدید از مناطق بالقوه مناسب آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند. علایی طالقانی و همکاران (Alaei Taleghani, Shafiei & Rajabi, 2018) در پژوهش خود با روش استنباطی و تحلیلی وزنی- تجربی به تأثیر عوامل ژئومورفولوژی بر تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی دشت میاندره کرمانشاه پرداختند و این نتیجه رسیدند که به ترتیب دشت سیلابی و مخروط افکنه، رسوبات دامنه‌ای و سپس ارتفاعات در ذخیره منابع آب زیرزمینی بیشترین نقش را داشته و کمترین نقش مربوط به اراضی بدلندی است. افشاری و همکاران (Afshari, Ghohroudi Tali, Sadough & Ehteshami Moin Abadi, 2019) نقش شاخص‌های ژئومورفولوژیکی نظیر شاخص شیب طول رودخانه، شاخص شکل حوضه، شاخص عدم تقارن حوزه زهکشی را در شناسایی پتانسیل مخاطرات موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که بامطالعه مورفومتری حوضه می‌توان شدت مخاطرات را به ۳ رده فعالیت طبقه‌بندی نمود. همچنین وادی و همکاران (Wadi, Wu, Malik, Fuad & Thaw, 2022) به شناسایی پتانسیل بالقوه آب زیرزمینی در مناطق سنگی و نیم خشک بیتیرا سودان پرداختند.

مخروط افکنه‌ها با ابعاد کوچک تا بسیار بزرگ در تمامی بخش‌های دشت‌های جنوبی البرز مرکزی موجود بوده و همگی در پایین‌دست حوضه‌های سیل‌خیز و بالادست دشت‌های انتهایی قرار دارند دشت‌های جنوبی البرز مرکزی در مجاورت شهرهای بزرگ نظیر تهران، کرج و قزوین قرار دارد و به همین دلیل از مناطق بسیار پرجمعیت کشور بوده که ۱۰ درصد از صنایع آب‌برو همچنین زمین‌های کشاورزی وسیعی را در خود جای‌داده است (Mehr News Agency, 2022). به‌گونه‌ای که فقط بخش کشاورزی در استان قزوین دارای ۸۰ هزار بهره‌بردار بوده و ۱۳ درصد تولید ناخالص استان مربوط به این حوزه است؛ بنابراین اهمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در این منطقه انکارناپذیر است. این مناطق به دلیل ضخامت زیاد رسوبات کواترنری حاصل از مخروط افکنه‌های جدید و قدیمی، تغذیه ضعیف از بستر رودخانه‌ها (به دلیل فصلی بودن رودها)

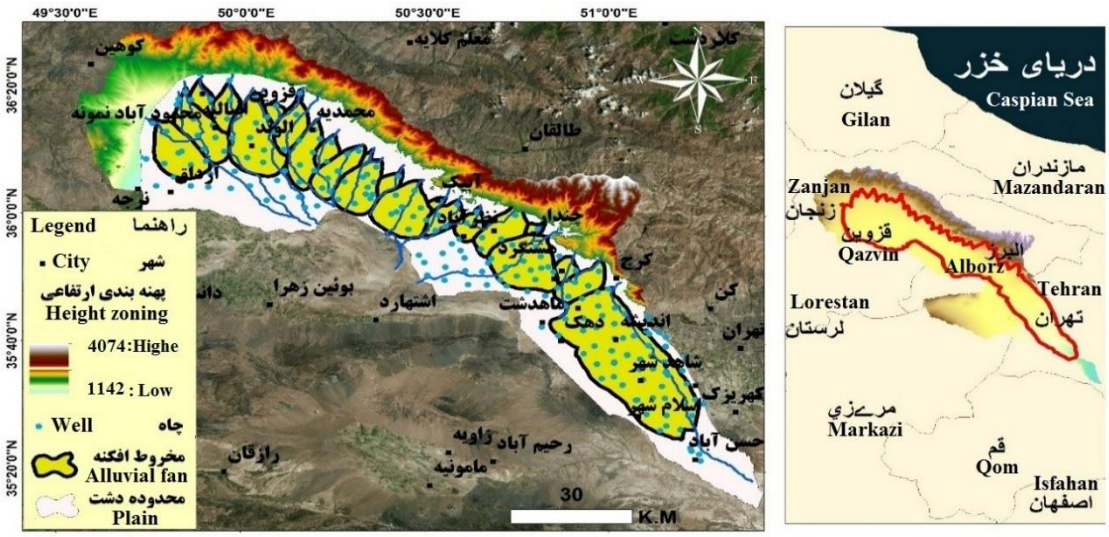
و بارندگی بسیار کم ازنظر کمیت آب زیرزمینی در وضعیت نامطلوب قرار دارد و این امر با افزایش عواملی نظیر افزایش سکونت‌گاه‌های انسانی، صنعتی و همچنین عدم شناخت لندفرم‌های مؤثر در کیفیت و کمیت آب زیرزمینی به‌خصوص در نواحی پرجمعیت شهری سبب ناپایداری منابع آب زیرزمینی گردیده و نیازمند مدیریت و پتانسیل‌یابی مناسب است (Rajabi Eslami, 2018). روش این تحقیق مبتنی بر تجزیه‌وتحلیل داده‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هواشناسی و بافت خاک است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش سبب شناسایی یک منطقه بالقوه جهت احداث سد برای تغذیه سفره آب زیرزمینی جدید در منطقه گردید (Wadi et al., 2022) در پژوهشی مشابه الروزق و همکاران به پهنه‌بندی مناطق بالقوه آب زیرزمینی بر اساس معیارهای ژئوهیدرولیکی در شمال امارات متحده عربی پرداختند(Al-Ruzouq et al., 2019). هدف این پژوهش ارزیابی پارامترهای مورفولوژی مخروط افکنه‌ها بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی آب‌های زیرزمینی است تا با استفاده از یافته‌های این تحقیق رویکردی جدید در استفاده از لند فرم در شناسایی مناطق با پتانسیل مناسب ارائه نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه موردمطالعه

مخروط افکنه‌های موجود در دشت‌های جنوبی البرز مرکزی شامل بخش وسیعی از دشت‌های غربی استان تهران و دشت‌های جنوبی استان البرز و قزوین است که در محدوده جغرافیایی ′۳۰ °۵۰ تا ′۲۰ °۵۱ طول شرقی و′۲۰ °۳۵ تا ′۳۰ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). وسعت این منطقه ۷۴۵۰ کیلومترمربع بوده و ازنظر تقسیمات وزارت نیرو از زیر حوضه‌های دریاچه نمک محسوب می‌شود (Rajabi Eslami, 2018)، این منطقه از شمال به رشته‌کوه البرز مرکزی محدودشده است و در جنوب به کوه‌های ایران مرکزی می‌رسد. قسمت اعظمی از حوضه به‌صورت چاله است. این چاله با شکافی که در طاقدیس جنوبی آن بانام ارتفاعات حلقه در وجود دارد به چاله مجاور شهر اشتهارد راه پیدا می‌کند و کف چاله از رسوبات رسی و تبخیری شور پوشیده شده است و سطح ایستابی در این منطقه بسیار بالا است. ارتفاع متوسط حوضه ۱۶۰۰ متر، و ماکزیمم ارتفاع در کوه‌های شمالی در حدود ۴۰۰۰ متر و کمترین ارتفاع در خروجی حوضه در حدود ۱۰۰۰ متر است (Nayebzadeh, Madadi & Azizi, 2018). بر اساس داده‌های آماری ایستگاه‌های سینوپتیک ۴ ایستگاه اصلی تهران، قزوین، کرج و هشتگرد و اقلیم نمای آمبرژه، نوع اقلیم منطقه مطالعاتی در محدوده مناطق اقلیم خشک قرار دارد (Iran Meteorological Organization, 2023). این مناطق ازنظر حاکمیت فرایندهای ژئومورفیک، تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناختی البرز جنوبی بوده و گستره وسیعی از این مناطق را مخروط افکنه‌ها کواترنری با نهشته‌های ناپیوسته و درشت‌دانه (در حد قلوه‌سنگ تا سیلت) تشکیل داده است. در دوره

کواترنری فرسایش آبی باعث ایجاد آبرفت‌های رودخانه‌ای و دشت‌های سیلابی متعدد گردیده که همین امر سبب شده تا لند فرم‌های غالب را مخروط افکنه‌ها، آبرفت‌ها و دشت‌های سیلابی تشکیل بدهد (Ghahroudi Tali, Khodamoradi & Ali Nouri, 2023). همچنین اکثر رودخانه‌های محدوده مطالعاتی به‌صورت فصلی بوده و از مهم‌ترین رودخانه‌های موجود در این منطقه می‌توان به رودهای کرج، قزوین، کردان، زیاران، رودخانه هشتگرد و ... اشاره نمود با توجه به این‌که در محدوده حوضه آبریز تهران-کرج، مناطق مسکونی و صنعتی بسیاری وجود دارد، پایین بودن میزان بارش مفید و افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر سبب مشکلات متعددی گردیده که نیازمند مدیریت و پتانسیل‌یابی مناسب آب زیرزمینی در این نواحی است (Khamis Abadi, Manshori, Sayadi & Salari, 2012)



شکل ۱- محدوده مطالعاتی و مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی البرز مرکزی

Fig.1. Study area and alluvial fans of The Southern slopes of central Alborz

۲-۲ -روش انجام پژوهش

با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش ارتباط ویژگی‌های مخروط افکنه‌ها با پارامترهای آب زیرزمینی و تعیین شناسایی پتانسیل مناسب این منابع است، بنابراین نوع روش استفاده‌شده در این تحقیق با توجه به هدف از نوع کاربردی است. همچنین بر مبنای نحوه گرداوری اطلاعات نوع روش تعیین‌شده در این مقاله به‌صورت توصیفی و غیر آزمایشگاهی است. با توجه به این‌که روش‌های توصیفی از انواع مختلفی برخوردار است و در این پژوهش نیز رابطه میان متغیرها به‌صورت مقایسه‌ای و برحسب هدف پژوهش تحلیل‌شده است، لذا نوع روش استفاده‌شده به‌صورت توصیفی همبستگی[1] و توصیفی مقایسه‌ای (پس رویدادی)[2] است؛

[1] Correlational Research

بنابراین به جهت تهیه اطلاعات موردنیاز عمق سطح ایستابی، انحراف معیار تغییرات زمانی سطح ایستابی، دبی آب چاه و میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی ۵۸۷ حلقه چاه شرب، کشاورزی و شهری از سازمان منابع آب کشور برحسب آخرین دوره آماربرداری سرسری چاه‌های آب ایران (دور دوم) از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ تهیه شد. درواقع دبی آب قابل‌برداشت چاه‌ها به همراه عمق سطح ایستابی دو پارامتر مهم در شناسایی پتانسیل بهره‌برداری آب زیرزمینی می‌باشند (Yari, Soltani-Gerdefaramarzi & Ghasemi, 2019). همچنین هدایت الکتریکی به‌عنوان یک شاخص مهم در تعیین میزان غلظت پارامترهای کیفی و املاح و یون‌های آب در تشخیص کلی کیفیت آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. بعد از ترسیم محدوده مخروط افکنه‌ها، میانگین عمق سطح ایستابی، دبی آب چاه‌ها و هدایت الکتریکی در هر محدوده تفکیک و به‌وسیله متد درون‌یابی کریجینگ[1] پهنه‌بندی و محاسبه گردید (شکل ۲). سپس مرز ۲۳ مخروط افکنه برحسب تغییرات منحنی‌های میزان و انطباق آن با شکستگی‌های نیمرخ ارتفاعی در محدوده رسوب‌گذاری هر رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لند ست ۸ و نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی در نرم‌افزار Arc Gis 10.5 ترسیم گردید. برای ارزیابی میزان اثرگذاری مخروط افکنه‌ها بر آب‌های زیرزمینی از پارامترهای مورفومتری ذیل استفاده شد که شامل: مساحت مخروط افکنه به کیلومتر، شعاع مخروط به متر، زاویه جاروب (رابطه ۱)، ارتفاع رأس مخروط افکنه به متر، ارتفاع قاعده مخروط افکنه به متر، میزان ناهمواری مخروط (اختلاف ارتفاع قاعده از رأس مخروط افکنه) طول مخروط به متر، شیب مخروط افکنه به درجه، تقعر مخروط افکنه (شعاع مخروط / ضلع H)، طول قاعده مخروط به متر و حجم مخروط افکنه. همچنین به‌منظور استخراج حجم مخروط (v) از رابطه ۲ استفاده‌شده است که پارامترهای آن عبارت‌اند از R^2: شعاع مخروط به متر، H: اختلاف ارتفاع رأس و قاعده مخروط به متر، S:زاویه جاروب مخروط افکنه π معادل ۳/۱۴

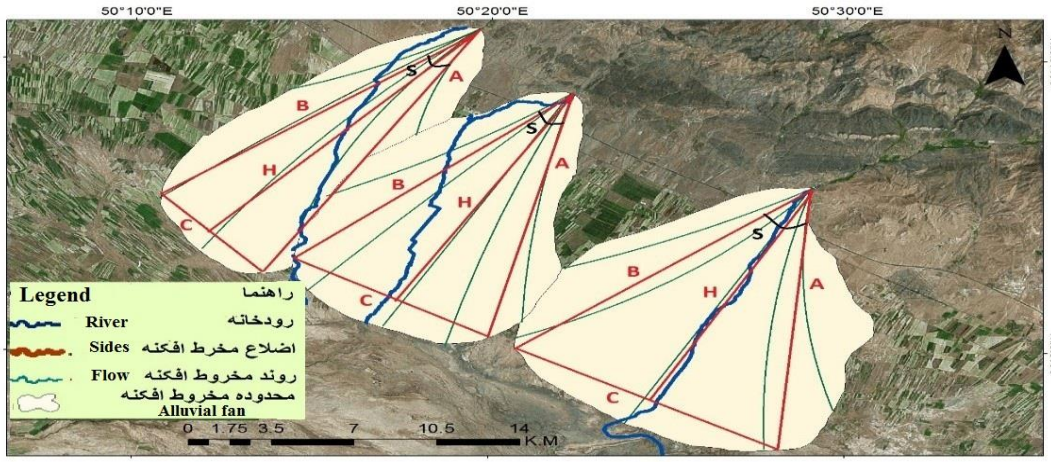
رابطه (۱)

$$S = \cos^{-1}\left[\frac{a^2 + b^2 - C^2}{2 * ab}\right]$$

رابطه (۲)

$$v = \left[\frac{\pi * R^2 * H}{3}\right] * \left[\frac{s}{360}\right]$$

[2] Ex-Post Facto
[1] Kiriging



شکل ۲- نمونه ترسیم هندسی مخروط افکنه‌ها جهت انجام محاسبات مورفومتری

Fig.2. samples of geometric drawing of alluvial fans for performing morphometric calculations

در این مقاله پس از استخراج داده‌های مورفومتری، ابتدا نقشه‌های هم ارزش دبی، سطح ایستابی و هدایت الکتریکی تهیه و برای هر مخروط افکنه ترسیم شد و برحسب اطلاعات چاه‌های آب موجود در هر یک از مخروط افکنه‌ها (به‌صورت مجزا) ارتباط بین ویژگی‌های مخروط افکنه و پارامترهای آب زیرزمینی ارزیابی شد. همچنین به‌منظور طبقه‌بندی مورفومتری مخروط افکنه‌ها از تحلیل خوشه‌ای سلسه‌مراتبی[1] در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ استفاده گردید و نمودار درختی آن ترسیم شد (شکل ۳). به‌طورکلی تحلیل خوشه‌ای تلاش می‌کند گروه‌های نسبتاً همگن از متغیرها را بر اساس خصوصیات انتخاب‌شده شناسایی کند. این روند از الگوریتمی استفاده می‌کند که با هر متغیر در خوشه‌ای جداگانه کار را شروع کرده و خوشه‌ها را تا جایی ترکیب می‌کند که تنها یک خوشه باقی بماند (Shariat Panah & Ranjbari, 2005). در سطح‌بندی مکان‌ها به روش تحلیل خوشه‌ای درواقع یک سطح شباهت زیادی به همدیگر داشته اما تفاوت قابل‌توجهی با مکان‌های سطوح دیگر دارند (Hekmatnia & Mousavi, 2006) معادله ۳ محاسبه فاصله اقلیدسی خوشه‌بندی سلسه‌مراتبی را نشان می‌دهد.

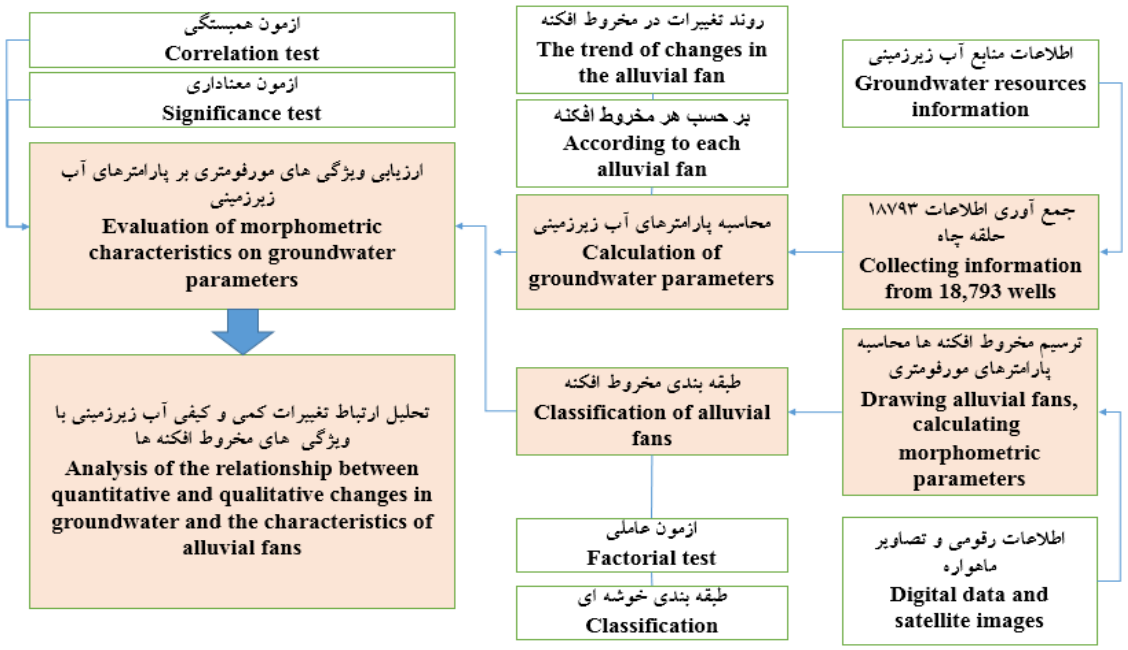
رابطه (۳)

$$(d(a)) = \sqrt{\sum_{\Sigma=1}^{n} (xi - yi)^2}$$

در فرمول شماره ۳ d (a) فاصله اقلیدسی در هر پارامتر آب زیرزمینی است و x و y مقدار عددی و مقدار متغیرها است. جهت تعیین مهم‌ترین عامل مورفومتری از آزمون تحلیل عاملی به روش عاملی تأییدی استفاده گردید. همچنین با توجه به نا پارامتریک و یا پارامتریک بودن داده‌های هر خوشه به‌وسیله آزمون معناداری

[1] HCA

کروسکال- والیس و واریانس یک‌طرفه، میزان معناداری پارامترهای آب زیرزمینی در هر خوشه مشخص گردید. در ادامه هر خوشه تفکیک‌شده به‌صورت مجزا به‌وسیله آزمون همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان همبستگی پارامترهای مورفومتری هر خوشه با تغییرات پارامترهای آب زیرزمینی آن خوشه سنجیده شد.



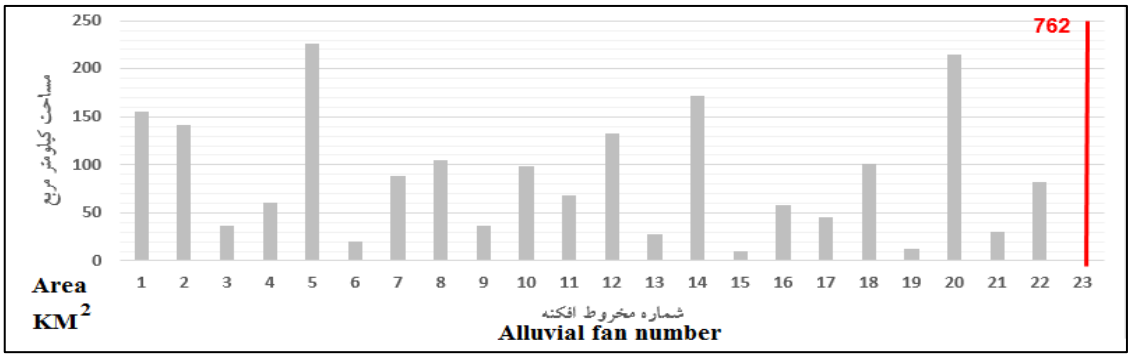
شکل ۳- مراحل انجام تحقیق

Fig.3. the research steps

۳- نتایج و بحث

۳- ۱-مورفومتری مخروط افکنه‌ها

مخروط افکنه‌های موردمطالعه در دشت‌های جنوبی البرز مرکزی شامل ۲۳ مخروط افکنه اصلی است. اندازه مخروط افکنه‌ها در منطقه موردمطالعه با توجه به وجود مخروط افکنه‌های تکامل‌یافته و مخروط افکنه‌های کوچک دارای پراکنش مختلف است.



شکل ۴- پراکندگی مخروط افکنه‌ها بر اساس میزان مساحت

Fig.4. Distribution of alluvial fans based on their areas

با توجه به جدول ۱ بزرگ‌ترین مخروط افکنه منطقه موردمطالعه بر روی رودخانه تهران کرج تشکیل‌شده (مخروط افکنه شماره ۲۳) که مساحت آن برابر ۷۶۲ کیلومترمربع است. همچنین مخروط افکنه‌های ۵ و ۲۰ همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده است بعد از مخروط افکنه شماره ۲۳ بزرگ‌ترین مساحت در منطقه را با وسعت ۲۲۵ و ۲۱۵ کیلومترمربع دارا هستند. مخروط افکنه شماره ۱۱ با مساحت ۶/۸ کیلومترمربع کوچک‌ترین مخروط افکنه در منطقه بوده محسوب می‌شود. بیشترین حجم مربوط به مخروط افکنه شماره ۲۰ با میزان ۳۴۴۴ مترمکعب بوده (شکل ۴) و کمترین حجم نیز مربوط به مخروط افکنه شماره ۱۱ و ۶ است. لازم به توضیح بوده که مخروط افکنه شماره ۲۳ اگرچه بیشترین مساحت را نسبت به سایرین دارا است اما مخروط افکنه شماره ۲۰ به دلیل شکل بادبزنی و تقعر ۱/۵ متری سطح آن دارای بیشترین حجم رسوب است. با توجه به اینکه اختلاف ارتفاع رأس مخروط از قاعده مخروط نشان‌دهنده میزان ناهمواری سطح مخروط افکنه‌ها است، می‌توان بیان نمود که این پارامتر ازجمله عامل‌های مورفومتری مهم در مخروط افکنه‌ها بوده که می‌تواند در زمان نفوذپذیری و تشکیل آبخوان بسیار مهم باشد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود کمترین میزان اختلاف رأس از قاعده مخروط افکنه مربوط به مخروط افکنه‌های شماره ۱۸ بوده که میزان آن برابر ۴۷۰ متر است. زاویه جاروب نیز از دیگر پارامترهایی است که تا حدودی نشان دهد نقش تراکم انشعاب در رأس مخروط افکنه است و بیشترین زاویه جاروب مربوط به مخروط افکنه شماره ۲۰ است. تقعر مخروط افکنه یکی پارامترهای تعیین‌کننده ضخامت و ستبرای رسوب و ظاهر مخروط افکنه‌ها است. بیشترین تقعر مخروط افکنه مربوط به مخروط شماره ۲۳ و کمترین میزان تقعر مربوط به مخروط شماره ۲۰ است.

جدول ۱- ویژگی‌های مورفومتری و خوشه‌بندی مخروط افکنه‌ها

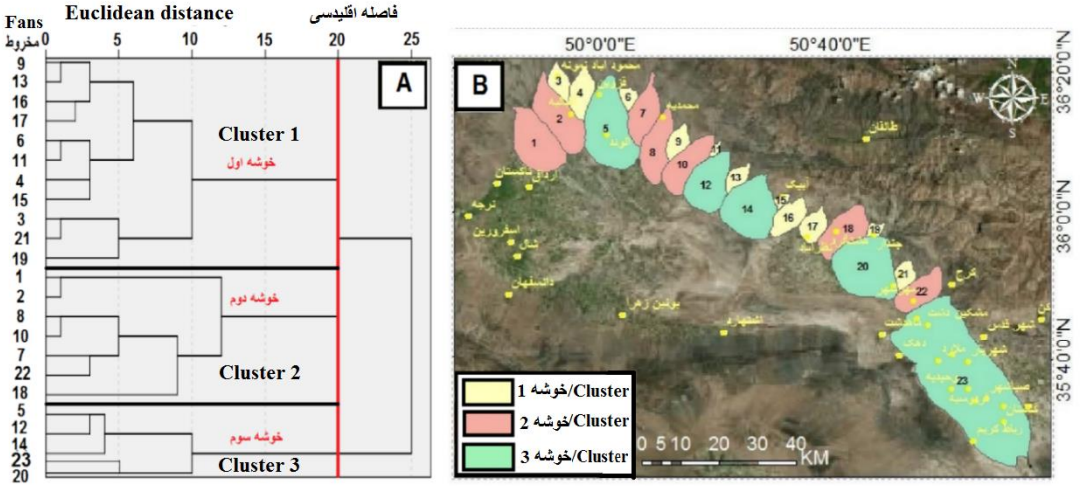
Table 1- Morphometric characteristics and clustering of alluvial Fans

ردیف Num.	اسم رودخانه Name of the river	خوشه cluster	شیب slope(degree)	حجم Volume	شعاع radius(M)	زاویه جاروب Acute Angle(degree)	طول قاعده Length of Base(M)	اختلاف ارتفاع Height difference(M)	ارتفاع قاعده Height of the Base(M)	ارتفاع رأس Head height(M)	طول Length(M)	مساحت Area(k.m^2)
1	چهرود Chehrud-	2	3	0.13	4316	27.0	9275	89	1226	1315	19614	156.06
2	میانه Meyaneh-	2	3.5	0.23	4533	22.9	11981	167	1224	1391	23259	141.9
3	نمونه Nmoneh-	1	4.2	0.28	3561	42.5	7993	178	1286	1464	11789	37.02
4	اروس آباد Arosabad-	1	4.5	0.08	2746.5	24.8	10645	151	1252	1403	14300	61.41
5	قزوین Qazvin-	3	4.9	0.75	6374.5	33.7	16472	187	1204	1391	22790	225.9
6	عشرکار Ashrkar-	1	6	0.02	1387	36.7	5509	108	1280	1388	6613	19.83
7	هفت‌چشمه Haft cheshmeh-	2	5.8	0.31	3773.5	23.4	13903	318	1225	1543	19518	87.98
8	محمدیه Muhamma diyah-	2	5.4	0.04	3154.5	7.0	10978	212	1182	1394	20428	105.2
9	آب مدام Abmadam-	1	6.3	0.06	2033.5	30.0	8260	164	1208	1372	10795	35.93
10	کبیر-Kabir	2	6	0.16	3350	22.7	7971	222	1170	1392	18311	99.09
11	فالیزان Falizan-	1	5.3	0.01	897.5	26.0	5513	145	1266	1411	5630	6.83
12	بهجت‌آباد Behjatabad -	3	6	0.6	4968	37.8	11916	223	1149	1372	16891	132.91
13	جزمه Jazmeh-	1	5.9	0.11	2462	29.2	8671	219	1186	1405	10472	27.9
14	زیاران Zeyaran-	3	5.2	1.79	7049.5	52.3	17682	237	1144	1381	16723	171.84
15	آبیک Abyek-	1	4.4	0.03	1439	37.2	4509	150	1195	1345	5499	10.24
16	چمبور Champur-	1	4.5	0.14	2654.5	32.6	12370	212	1153	1365	12909	58.29
17	هیو-Heev	1	4.9	0.27	3047	39.2	7720	251	1190	1441	10391	45.52
18	هشتگرد Hashtgerd-	2	5.1	0.23	2733.5	21.6	9146	480	1208	1688	16023	101
19	چندار Chandar-	1	4.6	0.09	1737.5	46.5	5988	216	1378	1594	6519	12.76
20	کردان Kordan-	3	4.1	3.44	9078.5	68.8	23009	209	1245	1454	17481	215.54

21	کهریز Kahriz-	1	4.5	0.15	2.3	2276.5	47.2	8982	206	1243	1449	8955	30.34
22	چهاردانگ- Chahar Dangeh	2	4.3	0.15	5.1	2713	22.1	6659	308	1246	1554	15443	82.22
23	کرج Karaj-	3	3.9	1.18	5.3	7295.5	20.3	24620	377	992	1369	47081	762.06

۳-۲- طبقه‌بندی ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها

مخروط افکنه‌ها از لحاظ خصوصیات مورفومتری به سه خوشه طبقاتی اصلی قابل‌تفسیم می‌باشند (شکل ۵). از میان خوشه‌های مورفومتری تفکیک شده ۱۱ مخروط فکنه در خوشه اول، ۷ مخروط افکنه در خوشه دوم و ۵ مخروط افکنه در خوشه سوم واقع‌شده است.



شکل ۵- طبقه‌بندی خوشه‌ای ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها (شکل A: نمودار درختی خوشه‌بندی مورفومتری مخروط افکنه‌ها، شکل B: پراکندگی مخروط افکنه‌ها بر اساس تفکیک خوشه‌ای)

Fig.5. Cluster classification of alluvial fan morphometric features (Figure A: Tree diagram of morphometric clustering of alluvial fans, Figure B: Distribution of alluvial fans based on cluster separation)

خوشه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب با ۸۱، ۸۵ و ۹۴ درصد اثرگذاری پارامترهای مورفومتریک مخروط افکنه ای از یک دیگر تفکیک شده‌اند در واقع عامل تفکیک مخروط افکنه‌ها از یکدیگر پارامترهای مورفومتری آن‌ها می‌باشد و هر خوشه با تجانس خصوصیات از یکدیگر جدا شده است. حال با توجه به موارد بیان شده مهم‌ترین عامل در هر خوشه موردبررسی قرار گرفت. خوشه اول عموماً شامل مخروط افکنه‌های کوچک و مخروط افکنه‌هایی میانی بوده و پراکندگی این مخروط افکنه‌ها در تمام منطقه از شرق تا غرب منطقه مطالعاتی دیده می‌شود. لازم به توضیح است که مخروط افکنه‌های موجود در نواحی خشک و نیمه‌خشک برخلاف دارای مخروط افکنه‌های میانی کوچک‌تری هستند که در بین مخروط افکنه‌های

بزرگ‌تر قرار گرفته و علت این موضوع را می‌توان وجود حوضه‌های آبریز فرعی و کوچک‌تر در بین دو حوضه آبریز بزرگ رودخانه‌های فصلی، سیلابی و اقلیم منطقه دانست. به‌طورکلی میانگین پارامترهای مورفومتری در خوشه اول نسبت به خوشه دوم و سوم کوچک‌تر است به‌طور مثال در خوشه اول پارامترهای مساحت، شعاع و طول قاعده به ترتیب با میانگین ۳۱ کیلومترمربع، ۲۲۰۳ و ۹۴۴۲ متر دارای کمترین اندازه نسبت به خوشه دوم و سوم است همچنین طول مخروط افکنه‌ها با میزان ۹۴۴۲ متر کمترین میانگین را در میان دو خوشه دیگر دارد (جدول، ۲). با بررسی آزمون عاملی خوشه اول مشخص گردید که مؤلفه اول خوشه اول با ۲۹ درصد توجیه‌پذیری دارای بیشترین نمره در عامل‌های ارتفاع رأس مخروط و ارتفاع قاعده مخروط افکنه می‌باشد (جدول ۴). همچنین مؤلفه دوم خوشه اول با ۲۸ درصد توجیه‌پذیری در تفکیک خوشه‌ها، دارای بیشترین نمره در عامل‌های مساحت، شعاع و طول قاعده است. مؤلفه سوم خوشه اول نیز با ۲۴ درصد دارای بیشترین نمره در عامل طول مخروط افکنه است.

مخروط افکنه‌های موجود در خوشه دوم نیز دارای پراکندگی در کل منطقه است اما در بخش غربی منطقه (محدوده شمال دشت قزوین) تجمع بیشتری دارند. همان‌طور که در جدول ۳ نمایش داده‌شده، مؤلفه اول خوشه دوم با توجیه‌پذیری ۴۱ درصد عامل اصلی تفکیک این خوشه می‌باشد و عامل مساحت، طول، شعاع و اختلاف ارتفاع رأس از قاعده بیشترین نمره عاملی در این مؤلفه را دارند. لازم به توضیح است که پارامتر میانگین ارتفاع رأس و تقعر به ترتیب برابر با میانگین ۱۴۶۸ متر و ۴/۶ دارای بیشترین اندازه نسبت به دو خوشه اول و سوم است. لازم به توضیح است که میانگین زاویه جاروب در مخروط‌های خوشه دوم کمترین درجه را نسبت به زاویه جاروب مخروط‌ها افکنه‌های خوشه‌های دیگر دارد.

جدول ۲–میانگین، پیشینه و کمینه خصوصیات مورفومتری مخروط افکنه‌ها در هر خوشه

Table 2- Average, maximum and minimum morphometric characteristics of alluvial cones in each cluster

مخروط مورفومتری افکنه Morphometry of alluvial fan	خوشه اول-Cluster one			خوشه دوم-Cluster two			خوشه سوم-Cluster three		
	بیشینه Maximum	میانگین Mean	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Mean	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Mean	کمینه Minimum
مساحت Area(Km^2)	61.41	31.4	6.8	156	110.4	82.2	762	301.6	132.9
طول Length (m)	14300	9442	5499	23259	18942	15443	47081	24193	16723
ارتفاع رأس Head height(m)	1594	1421	1345	1688	1468	1315	1454	1393	1369
ارتفاع قاعده Height of the Base(m)	1368	1239	1153	1264	1211	1170	1245	1147	992
اختلاف ارتفاع Height	251	181.8	108	480	256.5	89	377	24.6	187

difference(m) طول قاعده Length of Base(m)	12370	7832	4509	13903	9987	6659	24620	18739	11916
زاویه جاروب Acute Angle (degree)	47.2	35.6	24.8	27	20.9	7	68.8	42.5	20.3
شعاع Radius(M)	3561	2203	897.5	4533	3510	2713	9078	69.53	4968
تقعر Concavity	41	3.08	2.1	5.2	4.6	3.9	5.3	3.02	1.5
حجم -Volume (KM^3)	0.28	0.11	0.01	0.31	0.17	0.04	3.44	1.5	0.06
شیب slope (degree)	6.3	5	4.2	6	4.7	3	6	4.8	3.9

جدول ۳–نتایج آزمون عاملی مخروط افکنه‌ها برحسب تفکیک خوشه‌ای

Table 3-Results of the alluvial fan factor test according to Clustering

خوشه اول Cluster one			خوشه دوم cluster two		خوشه سوم Cluster three			مخروط افکنه مورفومتری Morphometry of alluvial fan	
مؤلفه ۳ Factor3	مؤلفه ۲ Factor2	مؤلفه ۱ Factor 1	مؤلفه ۲ Factor2	مؤلفه ۱ Factor1	مؤلفه ۳ Factor 3	مؤلفه ۲ Factor 2	مؤلفه ۱ Factor 1		
0.25	0.96	0.002	0.38	0.78	0.06	0.92	-.025	بار عاملی factor score	مساحت Area(Km^2)
0.13	0.98	0.37	-0.17	-0.78	0.91	0.12	0.19	بار عاملی factor score	طول Length (m)
0.79	-0.53	-0.01	0.17	0.96	0.1	-0.01	0.87	بار عاملی factor score	ارتفاع رأس Head height(m)
0.18	-0.93	0.82	0.82	0.06	0.33	-0.28	0.79	بار عاملی factor score	ارتفاع قاعده Height of the Base(m)
0.18	0.93	-0.02	0.005	0.98	0.66	0.39	0.22	بار عاملی factor score	اختلاف ارتفاع Height difference(m)
0.85	0.51	0.93	-0.11	-0.1	0.12	0.85	-0.28	بار عاملی factor score	طول قاعده Length of Base(m)
0.55	-0.79	0.12	0.83	0.01	0.49	-0.12	0.77	بار عاملی factor score	زاویه جاروب Acute Angle(degree)
0.99	-0.02	0.53	0.34	-0.74	0.44	0.81	0.12	بار عاملی factor score	شعاع Radius(m)
-0.25	0.94	-0.77	-.022	0.53	-0.61	0.11	-.072	بار عاملی factor score	تقعر Concavity
0.9	-0.35	0.69	0.47	0.46	0.65	0.59	0.32	بار عاملی factor score	حجم Volume(KM^3)
-0.84	-0.48	0.2	-0.71	0.57	0.06	-0.52	0.57	بار عاملی factor score	شیب slope (degree)
39	55	22	22	41	34	28	29	درصد واریانس–Percentage of variance	
	94		85			81		درصد کل تجمعی–Cumulative percentage	

*رنگ قرمز به معنای معناداری در حد ۹۵ درصد و بیشتر است

به غیر از پارامترهای ذکر شده اکثر پارامترهای مورفومتری در خوشه دوم دارای اندازه متوسط می‌باشد. درواقع میانگین پارامترهای این خوشه از خوشه اول بزرگ‌تر بوده و از خوشه سوم کوچک‌تر می‌باشد.
خوشه سوم که شامل ۵ مخروط افکنه بزرگ بوده اکثراً بر روی رودخانه‌های اصلی و مشهور منطقه دیده می‌شود (شکل ۵). در خوشه سوم بارزترین مؤلفه‌ای که سبب تفکیک این خوشه از سایرین شده مؤلفه دوم با توجیه‌پذیری ۵۵ درصد است. بیشترین نمره عاملی در این مؤلفه مربوط به عامل‌های مساحت، طول، ارتفاع قاعده، اختلاف ارتفاع و تقعر است. اکثر مخروط افکنه‌های موجود در این خوشه نسبت به دو خوشه دیگر دارای بیشترین میانگین و ابعاد می‌باشند به‌طور مثال مؤلفه مساحت با میانگین ۳۰۱ کیلومترمربع و طول مخروط با میانگین ۲۴۱۹۳ متر و همچنین حجم با میانگین ۱/۵ کیلومتر مکعب بیشترین اندازه و ابعاد را نسبت به دو خوشه دیگر دارند. ارتفاع قاعده مخروط افکنه‌های خوشه سوم با میانگین ۱۱۴۶ متر کمترین ارتفاع را در میان سایر خوشه‌ها دارد.

۳-۳-آب زیرزمینی

با توجه به جدول ۴ میزان دبی آب چاه در محدوده مطالعاتی تهران مربوط به سازمان منابع آب ایران (۱۴۰۰) از شرقی‌ترین مخروط افکنه (رودخانه کرج) به سمت غربی‌ترین مخروط افکنه (رودخانه چهرود) در حال افزایش است. همان‌طور که در نمودار شکل ۶ قابل‌تشخیص است، مخروط افکنه‌های کوچک و بزرگ (میان مخروط‌ها و مخروط افکنه‌های کامل) تقریباً از بعد از رودخانه زیاران (در نزدیکی شهر آبیک استان قزوین) دچار تغییر در میزان دبی آب چاه قابل‌برداشت از چاه‌ها می‌شوند.

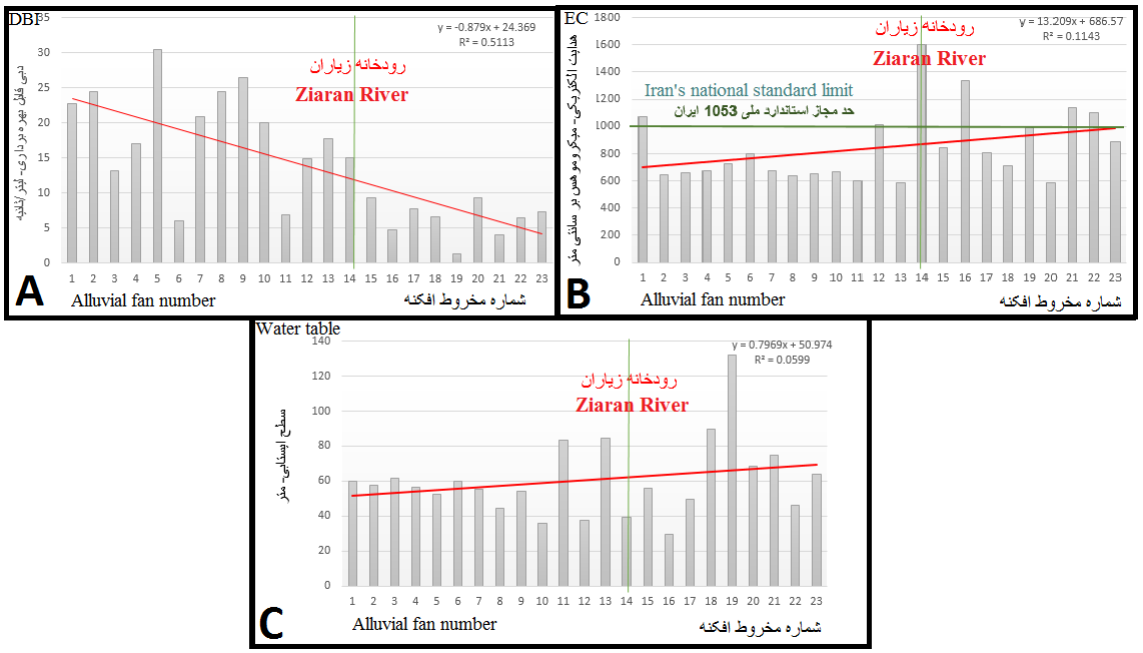
جدول ۴-وضعیت پارامترهای آب زیرزمینی در مخروط افکنه‌های منطقه موردمطالعه

Table 4- Status of Groundwater parameters in alluvial fan of the Case studies

هدایت الکتریکی EC- µ mho/cm	دبی DBI l/s	عمق سطح ایستابی depth of the water table	شماره مخروط Number of alluvial Fans	هدایت الکتریکی EC- µ mho/cm	دبی DBI l/s	عمق سطح ایستابی depth of the water table	شماره مخروط Number of alluvial Fans
588	17.8	84.5	13	1074	22.7	60	1
1606	15	39.2	14	643	24.5	57.3	2
846	9.4	55.6	15	659	13.2	61.8	3
1336	4.8	29.3	16	678	17.1	56.5	4
805	7.8	49.7	17	727	30.5	52.5	5
711	6.7	89.9	18	800	6.1	59.6	6
988	1.3	132.3	19	673	20.9	55.4	7
590	9.4	68.3	20	641	24.5	44.2	8
1139	4	74.6	21	653	26.5	54.2	9
1101	6.5	46.3	22	668	20.1	35.7	10
892	7.3	63.8	23	602	6.9	83.3	11
				1017	14.9	37.4	12

همچنین چاه‌های موجود در مخروط افکنه‌های شرقی (شرق رودخانه زیاران) دارای میانگین دبی آب چاه ۷.۲ لیتر بر ثانیه بوده و این میزان با اختلاف تقریباً دو برابری در مخروط‌های غربی (غرب رودخانه زیاران) دارای میانگین دبی ۱۹ لیتر بر ثانیه است.

عمق سطح ایستابی می‌تواند تحت تأثیر خصوصیات مورفومتری مخروط افکنه‌ها و به‌طورکلی مورفومتری دشت باشد؛ زیرا عمق سطح ایستابی به عواملی نظیر نوع و ضخامت رسوب، مورفوتکتونیک منطقه و ساختار رودخانه‌ها وابسته است که ارتباط مستقیمی با مورفومتری مخروط افکنه‌ها دارد. با توجه به جدول ۴ و نمودار ۶ مشاهده می‌شود که میانگین عمق سطح ایستابی تا سطح زمین در غرب منطقه (غرب رودخانه زیاران) برابر با ۵۵/۸ متر بوده که نسبت به میانگین عمق سطح ایستابی نواحی شرقی رودخانه زیاران (۶۷/۷ متر) دارای میانگین کمتری است. در واقع تشکیل پلایا و حوضچه‌های انتهایی در خط پایان دشت غربی سبب بالا آمدن سطح ایستابی در این منطقه گردیده است. پارامتر هدایت الکتریکی به‌عنوان یک شاخص مهم در تشخیص وضعیت کلی آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه به غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در آب زیرزمینی وابسته است و با افزایش غلظت آن‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۶- روند تغییرات مکانی پارامترهای آب زیرزمینی در مخروط افکنه‌ها

A: دبی آب چاه، B: هدایت الکتریکی، C: عمق سطح ایستابی

Fig.6. Spatial trends of Groundwater parameters in alluvial fans

A: Well waterdischarge, B: Electrical Conductivity, C: Water table depth

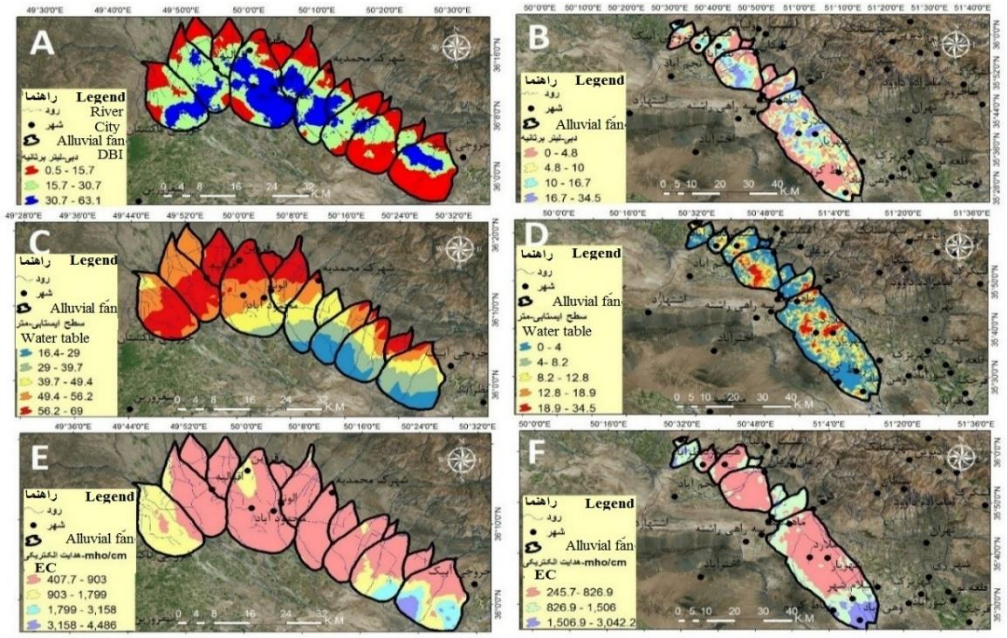
با توجه به روند تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی مشخص گردید تغییرات میزان هدایت الکتریکی با یک شیب ملایم در قبل و بعد از رودخانه زیاران باهم متفاوت بوده، به صورتی که با حرکت از غرب به سمت شرق منطقه میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. در تبیین این موضوع می‌توان گفت که علاوه بر تأثیرگذاری عوامل انسانی و طبیعی (نظیر وجود سازندهای تبخیری گچی و نمکی) بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی نواحی شرقی منطقه، وضعیت کمیت آب زیرزمینی و همچنین نزدیکی سطح ایستابی به سطح زمین نیز بر تغییرات مکانی هدایت الکتریکی تأثیرگذار است. درواقع با کاهش کمیت و فقر آبدهی چاه میزان غلظت املاح موجود در آب افزایش‌یافته و با کاهش عمق سطح ایستابی تا سطح زمین نیز نقش فرایندهای موئینگی[1] و کاهش خود پالایی خاک (به دلیل کاهش ستبرای و ضخامت خاک) بیشتر می‌گردد، درنتیجه سبب شوری آب و افزایش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی می‌شود؛ بنابراین به‌منظور تائید این موضوع مشخص گردید که میزان آبدهی چاه‌ها و عمق سطح ایستابی در چاه‌های شرقی ۷/۲ لیتر بر ثانیه و ۵۵ متر بوده درصورتی‌که این میزان در چاه‌های غربی به ۱۸/۲ لیتر بر ثانیه و ۶۷ متر افزایش داشته است. لازم به توضیح است که افزایش میزان هدایت الکتریکی در آب چاه‌های موجود در مخروط افکنه‌ها منطقه سبب شده تا در برخی مناطق بالاتر از حد استاند ملی ۱۰۵۳ قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است مخروط افکنه شماره ۱۴(زیاران) با میزان ۱۶۰۶ میکروموهس بر سانتی‌متر به دلیل هم‌جواری با حوضچه‌های نمکی و انتهایی دشت دارای بیشترین میزان هدایت الکتریکی است. همچنین از دلایل اصلی بالا بودن هدایت الکتریکی در مخروط افکنه‌های شماره ۱،۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۹، ۲۱ و ۲۲ (مخروط افکنه رودخانه‌های چهرود، بهجت‌آباد، زیاران، چمپور، چندار، کهریز و چهاردانگه) می‌توان به تأثیر عوامل طبیعی و نقش عوامل آنتروپوژنیک به دلیل تمرکز سکونت‌گاه‌های انسانی و افزایش زمین‌های کشاورزی اشاره نمود. درواقع وجود فاضلاب‌های متعدد و همچنین استفاده از کودها و آبیاری‌های متعدد زمین‌های کشاورزی می‌تواند سبب شوری آب و همچنین افزایش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در این منطقه شود.

۳-۴-ارتباط بین ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه و آب زیرزمینی

پیش از تعیین میزان تأثیرپذیری مخروط افکنه‌های موجود در خوشه‌های تفکیکی، بر پارامترهای آب زیرزمینی، ابتدا وضعیت مورفومتری لند فرم‌های مخروط افکنه ای به‌عنوان یک لند فرم مجزا از سایر مورفومتری لند فرم‌های موجود در منطقه مورد آنالیز قرار گرفت. بر این اساس و با توجه به جدول ۵ به‌منظور تعیین ارتباط بین تغییرات پارامترهای مورفومتری تمامی مخروط افکنه‌ها با تغییرات پتانسیل آب زیرزمینی منطقه، از آزمون همبستگی استفاده شد. به‌طورکلی میزان دبی چاه‌های موجود در مخروط افکنه‌ها تا

[1] Capillarity

حدود بسیار زیادی نشان‌دهنده پتانسیل پایدار یا ناپایدار آب زیرزمینی جهت بهره‌برداری از این منابع است. نتایج آزمون همبستگی میزان دبی آب چاه با مورفومتری مخروط افکنه‌ها نشان داد پارامترهای مساحت، طول، طول قاعده و شعاع مخروط افکنه با دبی آب چاه همبستگی مثبت در حد ۹۵٪ دارد و با افزایش پارامترهای ذکرشده میزان دبی آب قابل‌برداشت از چاه‌ها افزایش می‌یابد. درواقع بزرگی مخروط افکنه‌ها ازنظر طول و شعاع و همچنین بادبزنی بودن آن‌ها به دلیل آنکه نشان‌دهنده تکامل یک مخروط افکنه بوده و بیانگر وجود شبکه‌های انشعاب قدیمی و جدید بسیار و همچنین توالی رسوب منظم است، می‌تواند ازجمله دلیل افزایش آبدهی در این مخروط افکنه‌ها محسوب شود. همچنین پارامترهای ارتفاع رأس، ارتفاع قاعده و زاویه جاروب به‌عنوان یک عامل مهم در مدت و میزان نفوذپذیری آب در خاک دارای همبستگی منفی و قوی در حد ۹۹٪ با میزان دبی آب چاه بوده که نشانگر آن است که با کاهش میزان این پارامترها، میزان دبی آب چاه افزایش می‌یابد.



شکل ۷- پهنه‌بندی تغییرات پارامترهای آب زیرزمینی در مخروط افکنه‌های دشت‌های جنوبی البرز مرکزی
A: پهنه‌بندی تغییرات دبی آب چاه در نواحی غربی B: پهنه‌بندی تغییرات دبی آب چاه در نواحی شرقی، C: پهنه‌بندی تغییرات سطح ایستابی در نواحی غربی، D: پهنه‌بندی تغییرات سطح ایستابی در نواحی شرقی، E: پهنه‌بندی هدایت الکتریکی در نواحی غربی، F: پهنه‌بندی هدایت الکتریکی در نواحی شرقی)

Fig.7. Zoning of groundwater parameter changes in the alluvial fan morphometric features A: Zoning of well water discharge changes in the western areasB,: Zoning of well water discharge changes in the eastern areas, C: Zoning of water table changes in the western areas, D: Zoning of water table changes in the eastern areas, E: Zoning of electrical conductivity in the western areas, F: Zoning of electrical conductivity in the eastern areas)

به‌طورکلی و با توجه به توصیفات بیان‌شده می‌توان این‌گونه استنباط نمود که میزان آبدهی چاه‌ها در مخروط افکنه‌های بزرگ و کم ارتفاع با دهانه ورودی (زاویه جاروب) کوچک‌تر و بادبزنی شکل و گرد بیشتر از سایر مخروط افکنه‌ها است. همان‌طور که در شکل ۷ آمده این مدل از مخروط افکنه‌ها در نواحی غربی منطقه مطالعاتی دارای پراکندگی بیشتری می‌باشند به‌طور مثال مخروط افکنه شماره ۵ که در محدوده شهر قزوین قرارگرفته ازجمله مخروط افکنه‌های ی است که به دلیل نوع مورفومتری خود نظیر مساحت (۲۲۶ کیلومتر مربع) و حجم زیاد (۰/۷۵ کیلومتر مکعب) و اختلاف ارتفاع نسبتاً مناسب (۱۸۷ متر) دارای بیشترین میزان آبدهی (۳۰ لیتر بر ثانیه) است. با توجه به جدول ۵ و برحسب آزمون همبستگی، تأثیر ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها بر میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی به دست آمد و مشخص گردید که پارامتر مورفومتری حجم و زاویه جاروب کل مخروط افکنه‌های محدوده مطالعاتی با میزان هدایت الکتریکی منطقه همبستگی مثبت در حد ۹۹٪ دارد. درواقع با افزایش میزان حجم و زاویه جاروب مخروط‌ها، میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی نیز افزایش می‌یابد؛ اما نکته قابل‌توجه این است که میزان تقعر دارای رابطه منفی و نسبتاً قوی با هدایت الکتریکی بوده و با کاهش تقعر در یک مخروط میزان هدایت الکتریکی در آن افزایش می‌یابد.

جدول ۵-آزمون همبستگی میان پارامترهای مورفومتری مخروط افکنه‌ها و پارامترهای آب زیرزمینی

Table 5-Correlation test between alluvial fans morphometric parameters and Groundwater parameters

مخروط افکنه مورفومتری Morphometry of alluvial fan		میانگین کمینه سطح ایستابی minimum	میانگین بیشینه سطح ایستابی maximum	عمق سطح ایستابی depth of the water table	دبی DBI l/s	هدایت الکتریکی EC- µ mho/cm
مساحت Area (KM^2)	ضریب همبستگی Correlation	-0.45	-0.058	-0.41	0.62	0.22
	میزان معنا دارای Sig-	0.020	0.40	0.03	0.001	0.16
طول Length(m)	ضریب همبستگی Correlation	-0.37	-0.23	-0.5	0.66	0.1
	میزان معنا دارای Sig-	0.04	0.15	0.01	0.001	0.33
ارتفاع رأس Head height(m)	ضریب همبستگی Correlation	0.25	0.42	0.56	-0.42	-0.1
	میزان معنا دارای Sig-	0.13	0.028	0.004	0.027	0.32
ارتفاع قاعده Height of the Base(m)	ضریب همبستگی Correlation	0.85	0.06	0.74	-0.26	-0.22
	میزان معنا دارای Sig-	0.001>	0.38	0.001>	0.051	0.16
اختلاف ارتفاع Height difference(m)	ضریب همبستگی Correlation	-0.28	0.41	0.12	-0.22	0.034
	میزان معنا دارای Sig-	0.10	0.029	0.3	0.16	0.44
طول قاعده Length of Base(m)	ضریب همبستگی Correlation	-0.34	0.03	-0.42	0.52	0.33
	میزان معنا دارای Sig-	0.06	0.43	0.028	0.008	0.073
زاویه جاروب Acute Angle(degree)	ضریب همبستگی Correlation	0.15	0.2	0.19	-0.42	0.55

	Sig- میزان معنا دارای	0.25	0.19	0.2	0.027	0.005
شعاع Radius (m)	ضریب همبستگی Correlation	-0.43	-0.014	-0.04	0.54	0.35
	Sig- میزان معنا دارای	0.026	0.42	0.024	0.005	0.059
تقعر Concavity	ضریب همبستگی Correlation	-0.26	-0.074	-0.18	0.27	-0.36
	Sig- میزان معنا دارای	0.12	0.37	0.2	0.11	0.05
حجم Volume (KM^3)	ضریب همبستگی Correlation	-0.3	0.16	-0.29	0.18	0.57
	Sig- میزان معنا دارای	-.093	0.023	0.095	0.21	0.003
شیب Slope (degree)	ضریب همبستگی Correlation	0.027	0.17	-0.098	0.092	-0.25
	Sig- میزان معنا دارای	0.45	0.32	0.33	0.34	0.13

رنگ قرمز به معنای معناداری در حد ۹۵ درصد و بیشتر است

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۷ مشخص است میزان هدایت الکتریکی در جنوب مخروط افکنه زیاران (مخروط شماره ۱۴) با میزان ۱۰۶ دارای بیشترین میزان هدایت الکتریکی در میان سایر مخروط افکنه‌ها بوده که میزان زاویه جاروب و حجم آن بیشتر از سایرین بوده و میزان تقعر کمتر دارد. لازم به توضیح است که میانگین کل هدایت الکتریکی در محدوده مطالعاتی ۸۴۵ میکرو موهس بر سانتی‌متر بوده که اگرچه پایین‌تر از استاندارد ملی بوده و مطلوب است اما در محدوده حساس قرار دارد. به‌طورکلی شکل مورفومتری مخروط افکنه‌ها برحسب میزان ارتفاع و ناهمواری و همچنین ساختار تراکمی و نوع تمرکز در انشعاب آبراهه‌ها تا حدود زیادی در پیش‌بینی وضعیت کیفیت آبخوان منطقه مؤثر است. میانگین عمق سطح ایستابی با شعاع، طول و مساحت مخروط افکنه‌ها رابطه منفی و قوی در حد ۹۹٪ دارد که نشان‌دهنده آن است که با افزایش شعاع، طول و مساحت مخروط افکنه‌ها، عمق سطح ایستابی تا سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. همچنین ارتفاع رأس، ارتفاع قاعده و طول قاعده دارای رابطه مثبت در حد ۹۹٪ با عمق سطح ایستابی است. در حقیقت با افزایش شیب و وسعت قاعده مخروط افکنه‌ها عمق سطح ایستابی تا سطح زمین کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است در نواحی غربی محدوده مطالعاتی به دلیل وجود رسوبات گسترده و مخروط افکنه‌های قدیمی فراوان، عمق سطح ایستابی تا سطح زمین بسیار زیاد است و در مناطق مرکزی (مخروط افکنه‌های ۱۴ تا ۹) به دلیل نزدیکی مخروط‌ها به چاله انتهایی دشت عمق سطح ایستابی تا سطح زمین کمتر است.

۳-۵- نقش ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه بر پارامترهای آب زیرزمینی هر یک از خوشه‌ها

با توجه به تأثیرپذیری آب زیرزمینی منطقه از خصوصیات مورفومتری کل مخروط افکنه‌ها (به‌عنوان یک لند فرم واحد)، می‌توان برحسب تفکیک خوشه‌ای مخروط افکنه‌ها وضعیت آب زیرزمینی در هر خوشه را نیز پهنه‌بندی نمود؛ بنابراین در این بخش میزان همبستگی هر یک از خوشه‌های ژئومورفیک با میانگین عمق سطح ایستابی، دبی آب چاه و میزان هدایت الکتریکی محاسبه شد. نتایج نشان داد که خصوصیات

مورفومتری در مخروط افکنه‌ها عامل مهمی جهت شناسایی دبی مناسب آب چاه می‌باشند. بر این اساس به‌منظور تعیین نقش ویژگی‌های مورفومتری بر آب‌های زیر زمینی، میزان معناداری هر یک از خوشه‌ها با میانگین عمق سطح ایستابی، دبی آب چاه و میزان هدایت الکتریکی سنجیده شد (جدول ۶)، نتایج نشان داد که دبی چاه‌ها دارای اختلاف معنادار در حد ۹۵ درصد با تغییرات ویژگی‌های مورفومتری در هر خوشه است. کمترین میزان دبی آب چاه‌های مربوط به مخروط افکنه‌های موجود در خوشه اول بوده (۱۰/۴ لیتر بر ثانیه) که با توجه به خصوصیات مورفومتری بیان شده می‌توان گفت شیب زیاد و همچنین مساحت و طول کم این مخروط‌ها یکی از عوامل آبدهی پایین این خوشه می‌باشد. همچنین بیشترین میزان دبی آب چاه در مخروط افکنه‌های خوشه دوم با میزان ۱۸ لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود که از نظر مساحت، طول قاعده، طول، حجم و شعاع دارای میانگین متوسط نسبت به خوشه اول و سوم است (جدول ۶). لازم به ذکر است که پارامترهای هدایت الکتریکی و عمق سطح ایستابی به دلیل وجود فرض صفر و عدم اختلاف محسوس در میانگین خوشه‌ها نسبت به هم دارای معناداری نمی‌باشند.

جدول ۶- آزمون معناداری وضعیت تغییرات آب زیرزمینی برحسب طبقه‌بندی خوشه‌ای مخروط افکنه

Table 6- Significance test of groundwater changes according to classification of alluvial fan

پارامترهای پتانسیل آب زیرزمینی Groundwater potential parameters	خوشه Cluster	F	معنی دارای Sig	میانگین mean	کمینه Minimum	بیشینه Maximum
کمینه عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی- متر Minimum water table depth(m)	1	2.74	0.088	45	14.7	87.4
	2			36	17.7	50.3
	3			25	16.4	34
بیشینه سطح ایستابی آب زیرزمینی-متر maximum water table depth(m)	1	1.39	0.27	66	48.2	111
	2			70	56.9	104
	3			85	61.3	128.5
میانگین عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی mean water table depth(m)	1	0.41	0.66	59	39.2	105.4
	2			54	36.8	68.5
	3			51	37.1	68.6
انحراف معیار تغییرات سطح ایستابی standard deviation of the changes in the water table	1	0.16	0.84	5.6	2.2	12.7
	2			6.3	2.3	10.3
	3			5.7	3.85	7.19
دبی آب چاه- لیتر / ثانیه DBI(L/S)	1	3.48	0.05	10	1.3	26.5
	2			18	6.5	34.5
	3			15	7.3	30.5
هدایت الکتریکی-میکروموهس/ سانتی‌متر EC (µ mho/cm)	1	0.65	0.52	826	588	1336
	2			787	641	1101
	3			966	590	1606

رنگ قرمز به معنای معناداری در حد ۹۵ درصد و بیشتر است

به‌منظور سنجش میزان اثرگذاری پارامترهای مورفومتری بر پارامترهای آب زیرزمینی در ابعاد کوچک‌تر و محلی، همبستگی پارامترها به‌صورت مجزا در هر یک از مخروط افکنه‌ها موردبررسی و آنالیز قرار گرفت (جدول ۷ و ۸) بر این اساس نتایج حاصله از تحلیل آماری ۱۱ مخروط افکنه موجود در خوشه اول نشان داد که تغییرات پارامتر شیب با تغییرات دبی دارای همبستگی قوی و منفی در بین مخروط افکنه‌های خوشه اول

است. درواقع با کاهش نسبی شیب میزان دبی آب چاه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین طول قاعده مخروط‌های خوشه اول با تغییرات هدایت الکتریکی دارای همبستگی مثبت و قوی است. مخروط افکنه‌های ی که در خوشه اول طول قاعده وسیع‌تری دارند به‌تبع افزایش دبی، دارای افزایش هدایت الکتریکی نیز هستند که البته این افزایش نسبی بوده و ازنظر کیفیت در حد مطلوب (پایین‌تر از حد استاندارد ملی ۱۰۵۳) قرار دارد. همچنین بیشترین میزان عمق سطح ایستابی از سطح زمین مربوط به خوشه اول است اما ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که تغییرات سطح ایستابی و عمق آن در سه خوشه تفکیکی به‌صورت معنادار نبوده و اعداد نزدیک به هم می‌باشند و دارای یک الگوی تغییری منظم نسبت به هم نیستند؛ بنابراین می‌توان گفت شرایط محیطی غالب و حاکم در کل مخروط‌های محدوده مطالعاتی تقریباً یکسان است و آنچه بر تغییرات پتانسیل آب زیرزمینی در این مناطق اثرگذار است ویژگی داخلی در سطح هر مخروط است که در بخش‌های دیگر به آن پرداخته می‌شود.

جدول ۷–الگوی همبستگی مورفومتری با پارامترهای آب زیرزمینی

(رنگ زرد همبستگی مستقیم (D)، رنگ آبی همبستگی معکوس (R)، رنگ سفید همبستگی ضعیف)

Table 7- Morphometric correlation pattern with groundwater parameters

(yellow color direct correlation (D), blue color reverse correlation (R), white color weak correlation

Cluster three-خوشه سوم				Cluster two-خوشه دوم				Cluster one-خوشه اول				مخروط مورفومتری افکنه Morphometry of alluvial fan
عمق ایستابی Depth	تغییرات ایستابی Changes	دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	عمق ایستابی Depth	تغییرات ایستابی Changes	دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	عمق ایستابی Depth	تغییرات ایستابی Changes	دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	
–	R	–	–	–	D	–	–	–	–	–	–	مساحت Area(m)
–	R	–	–	R	–	–	–	–	–	–	–	طول Length (m)
–	–	–	–	D	–	–	–	D	D	–	–	ارتفاع رأس Head height(m)
–	–	–	–	D		–	–	D	D	–	–	ارتفاع قاعده ((m Height of the Base
–	R	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	اختلاف ارتفاع ((m Height difference
D	R	–	–	–	–	–	–	–	–	–	D	طول قاعده Length of Base(m)
–	–	–	–	–	–	–	–	R	–	–	–	زاویه جاروب Acute Angle degree
D	–	–	–	–	D	–	–	–	–	–	–	شعاع Radius(m)
–	–	–	–	–	–	–	–	D	–	–	–	تقعر Concavity
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	حجم Volume (KM^3)
R	R	–	–	–	R	–	–	–	–	R	–	شیب slope (degree)

نتایج همبستگی تغییرات سطح ایستابی با عوامل مورفومتریک خوشه اول در نواحی خشک و نیمه‌خشک غرب منطقه موردمطالعه بیانگر این است که مساحت، شعاع طول و ارتفاع رأس مخروط افکنه دارای همبستگی مثبت و قوی در حد ۹۵٪ با میانگین عمق سطح ایستابی آب است.؛ یعنی هرچقدر پارامترهای مورفومتری فوق دارای میانگین بیشتری باشد میزان عمق سطح ایستابی تاسطح زمین نیز نسبت به مخروط افکنه‌های کوچک‌تر (خوشه اول) بیشتر خواهد بود که این امر می‌تواند به دلایلی ازجمله بیشتر شدن مصرف سرانه آب زیرزمینی در مخروط افکنه‌های بزرگ‌تر با جمعیت‌های بیشتر باشد. همچنین شیب مخروط افکنه‌های خوشه دوم نیز با میانگین ۴.۷ دارای همبستگی منفی و قوی با تغییرات سطح ایستابی بوده. علت این موضوع می‌تواند فعال‌تر بودن و تأثیرگذاری جریانات هیدرولیکی زیرسطحی و زهکشی بر پایداری تغییرات در سراسر مخروط افکنه

باشد، همچنین با توجه به اینکه مخروط افکنه‌های موجود در خوشه دوم دارای ویژگی‌های مورفومتری متمایزی از یکدیگر نبوده میزان تغییرات هدایت الکتریکی و دبی قابل‌برداشت از چاه‌های موجود در مخروط افکنه‌های این خوشه نیز دارای همبستگی قوی با یکدیگر نیستند. این به معنا نزدیک بودن خصوصیات مورفومتری مورفومتری مخروط افکنه‌های خوشه دوم به یکدیگر است

خوشه سوم شامل ۵ مخروط افکنه بوده و مخروط افکنه‌های موجود در این خوشه تقریباً به‌صورت تکامل‌یافته و شکلی بادبزنی دارند همبستگی تغییرات سطح ایستابی با عوامل مورفومتریک خوشه سوم بیانگر این است که طول قاعده، شعاع، مخروط افکنه دارای همبستگی مثبت و قوی در حد ۹۵٪ با میانگین عمق سطح ایستاب آب زیرزمینی است. همچنین مساحت، طول، اختلاف ارتفاع و شیب مخروط دارای همبستگی منفی و قوی در حد ۹۵٪ بوده است. با توجه به اینکه مخروط‌های موجود در خوشه سوم دارای ویژگی‌های ظاهری متمایزی از یکدیگر نبوده میزان تغییرات هدایت الکتریکی و دبی قابل‌برداشت از چاه‌های موجود در مخروط افکنه‌های این خوشه نیز دارای همبستگی قوی با یکدیگر نیستند. این به معنا نزدیک بودن خصوصیات مورفومتری مخروط افکنه‌های خوشه سوم به یکدیگر است.

جدول ۸ – آزمون همبستگی پارامترهایب زیرزمینی با ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها برحسب خوشه‌های تفکیک‌شده

Table 8 - Correlation test of Groundwater parameters with morphometric characteristics of alluvial fans in terms of separated clusters

مورفومتری مخروط افکنه Morphometry of alluvial fan		Cluster one-خوشه اول				Cluster two-خوشه دوم				Cluster three-خوشه سوم			
		دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	عمق ایستابی depth	تغییرات ایستابی Changes	دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	عمق ایستابی depth	تغییرات ایستابی Changes	دبی چاه DBI	هدایت الکتریکی EC	عمق ایستابی depth	تغییرات ایستابی Changes
مساحت Area	همبستگی Correlation	.081	.040	-.407	-.084	.590	.127	-.054	.859	-.44	-.184	.551	-.880
	معناداری Sig	.402	.450	.107	.403	.109	.405	.455	.007	.225	.383	.168	.060
طول Length	همبستگی Correlation	.143	.312	-.318	-.100	.873	-.62	-.56	.021	-.33	-.195	.490	-.805
	معناداری Sig	.329	.162	.170	.385	.012	.095	.093	.482	.290	.377	.201	.098
ارتفاع رأس Head height	همبستگی Correlation	-.384	-.04	.877	.670	-.68	.078	.667	-.254	-.14	-.536	.604	.150
	معناداری Sig	.109	.446	0.001	.012	.067	.442	.051	.291	.407	.176	.140	.425
ارتفاع قاعده Height	همبستگی Correlation	-.305	-.10	.827	.462	-.49	.635	.813	.142	.438	-.271	-.03	.753
	معناداری Sig	.167	.378	.001	.076	.159	.088	.013	.381	.230	.330	.481	.124
اختلاف ارتفاع Height differen	همبستگی Correlation	-.211	.018	.176	.388	-.58	-.13	.515	-.293	-.62	.096	.319	-.910
	معناداری Sig	.256	.478	.302	.119	.110	.403	.118	.262	.128	.439	.301	.045
طول قاعده Length Base	همبستگی Correlation	.185	.351	-.280	-.111	.659	-.63	-.12	.338	-.55	-.313	.862	-.931
	معناداری Sig	.282	.132	.202	.372	.077	.088	.393	.229	.166	.304	.030	.034
زاویه جاروب Acute	همبستگی Correlation	-.418	.483	.540	.112	-.21	.431	.414	.393	-.16	-.004	.103	.349
	معناداری Sig	.088	.05	.043	.371	.342	.196	.178	.192	.394	.498	.435	.326
شعاع Radius	همبستگی Correlation	.207	.032	-.205	-.061	.684	-.17	-.19	.717	-.43	-.310	.782	-.361
	معناداری Sig	.260	.461	.273	.429	.067	.371	.340	.035	.235	.306	.059	.319
تقعر Concavi ty	همبستگی Correlation	.205	-.29	-.484	-.095	-.59	.172	.132	-.452	-.08	-.114	.193	-.606
	معناداری Sig	.261	.172	.066	.390	.107	.372	.389	.155	.444	.428	.378	.197
حجم Volume	همبستگی Correlation	-.096	.069	-.096	-.018	.009	-.23	.400	.259	-.48	-.213	.570	-.122
	معناداری Sig	.383	.416	.390	.479	.493	.326	.187	.287	.206	.365	.158	.439
شیب slope	همبستگی Correlation	.477	-.45	-.161	.225	-.00	-.58	-.43	-.621	.395	.465	-.93	.818
	معناداری Sig	.05	.068	.318	.253	.494	.111	.165	.068	.255	.215	.011	.091

رنگ قرمز به معنای معناداری در حد ۹۵ درصد و بیشتر است

۴-نتیجه‌گیری

آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از شاخصه‌های مهم در توسعه محیط به شمار می‌آید و برنامه ریزان سرزمین توجه زیادی به شناسایی وضعیت کمی و کیفی این منابع دارند. به‌منظور مدیریت این منابع نیاز به شناسایی عوامل مؤثر بر آن بوده که در سال‌های اخیر توجه به لند فرم‌ها به‌عنوان یک عامل مؤثر بر نفوذپذیری و تغییرات آب‌های زیرزمینی از ارزش ویژه‌تری برخوردار گردیده است. یکی از لند فرم‌های مهم ژئومورفولوژی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مخروط افکنه‌ها می‌باشند که برحسب ساختار خود، محیط بسیار مناسبی را برای ذخیره‌سازی آب زیرزمینی فراهم می‌آورد؛ بنابراین در این ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه در دشت‌های جنوبی البرز مرکزی (کرج تا تاکستان) موردبررسی قرار گرفت و میزان تأثیرگذاری این ویژگی‌ها بر دبی قابل‌برداشت از چاه، میزان هدایت الکتریکی، تغییرات و عمق سطح ایستابی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش میانگین مساحت، طول مخروط طول قاعده و شعاع مخروط افکنه میزان دبی قابل‌برداشت آب زیرزمینی نیز افزایش‌یافته و با کاهش مقادیر پارامترهای مورفومتری ارتفاع رأس، زاویه جاروب، ارتفاع قاعده میزان دبی افزایش می‌یابد. یافته‌ها نشان داد در مخروط افکنه‌های ی که ارتفاع رأس و قاعده بیشتر از سایر مخروط افکنه‌ها است سطح ایستابی نیز به دلیل افزایش رسوب‌گذاری و ضخامت رسوب پایین‌تر از سطح زمین است. همچنین مشخص گردید که عمق سطح ایستابی با افزایش مساحت، طول، طول قاعده و شعاع مخروط افکنه‌ها به سطح زمین نزدیک‌تر می‌شود. با بررسی خوشه‌های مورفومتری تفکیک‌شده مشخص گردید که بیشترین میزان دبی آب چاه‌ها مربوط به خوشه دوم است. این خوشه ازنظر مکانی در کل منطقه پراکندگی دارد؛ اما در غرب محدوده مطالعاتی دارای تراکم بیشتری است. مخروط افکنه‌های این خوشه نسبت به مخروط افکنه‌های موجود در خوشه اول و سوم ازنظر مساحت، اختلاف ارتفاع، شعاع، طول قاعده و طول مخروط دارای ابعاد متوسط است و زاویه جاروب در این مخروط‌ها کمترین میانگین را نسبت به خوشه اول و سوم دارد. همچنین بیشترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به مخروط افکنه‌های موجود در خوشه سوم و کمترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به خوشه دوم بوده که آبدهی مناسبی نیز دارد.

به‌منظور تعیین نقش پارامترهای مورفومتری در داخل هر خوشه، میزان همبستگی پارامترهای مورفومتری با پارامترهای آب زیرزمینی مخروط افکنه‌ها سنجیده شد. نتایج نشان داد در مخروط افکنه‌های موجود در خوشه اول (که دارای کمترین میزان آبدهی نسبت به دو خوشه دیگر) با افزایش میزان شیب، میزان دبی چاه افزایش می‌یابد. به‌طورکلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد خصوصیات ظاهری مخروط افکنه‌ها و

تفاوت در ویژگی‌های مورفومتری آن‌ها می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمین مورداستفاده قرار گیرد درواقع نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مطالعه بر روی لند فرم‌های ژئومورفیک پیش از انجام طرح‌های اجرایی می‌تواند سبب کاهش خطا در تعیین مکان مناسب جهت تغذیه آبخوان یا حفر چاه آب زیرزمینی شود. همچنین ازنظر کاربردی نیز استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی برخلاف روش‌های مرسوم شناسایی منابع آب زیرزمینی نظیر ژئوالکتریک ازنظر زمانی و مالی به‌صرفه بوده و دارای پوشش مکانی وسیع‌تر و بدون نیاز به عملیات میدانی یا صحرایی است.

اکثر تحقیقات انجام‌شده درزمینه‌ی پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی به فرم و شاخص‌های مورفومتری مخروط افکنه به‌عنوان یک شاهد مجزا نگاه نمی‌کند بلکه این لند فرم را به‌عنوان یک عامل اثرگذار یا وزنی در کنار سایر عوامل در نظر گرفته یا تنها یک شاخص از آن را موردبررسی قرار می‌دهند؛ به‌عنوان‌مثال داس در پژوهش خود نقش پارامترهای ژئومورفیک نظیر مخروط افکنه‌ها، دشت سیلابی و ... را به‌عنوان یک عامل در کنار هشت پارامتر محیطی دیگر در تأثیرگذاری بر پتانسیل آب زیرزمین موردبررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که استفاده از شاخص‌های جغرافیایی در کنار مدل‌های سلسله مراتبی تا ۷۵ درصد دقت در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد (Das, 2019). همچنین حمدانی و بالی تأثیر پارامتر ارتفاع نزدیک‌ترین زهکش را به‌عنوان یک شاخص در شناسایی پتانسیل آب زیرزمینی موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک به‌عنوان یک متغیر مستقل در پتانسیل‌یابی و تشخیص بهتر منابع آب زیرزمینی از دقت مناسبی برخوردار است (Hamdani & Baali, 2019)؛ بنابراین می‌توان گفت اگرچه تاکنون در مطالعات متعدد تأثیر لندفرم های ژئومورفیک و به‌خصوص مخروط افکنه‌ها بر آب‌های زیرزمینی مورد تأکید قرارگرفته است، ولی مطالعه جامع و دقیقی در رابطه با نقش شاخص‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها بر آب‌های زیرزمینی و طبقه‌بندی مخروط افکنه‌ها انجام نگرفته است. بااین‌حال تحقیق حاضر با رویکرد نوین و مطالعات آماری قوی توانست الگوی جدید در حوزه نقش ویژگی‌های مخروط افکنه‌ها در تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی ارائه دهد و رهیافت کارآمد و مؤثری را در راستای شناسایی پتانسیل سفره‌های آب زیرزمینی ایجاد نماید.

References

Adabi khosh, S. J. (2019). *Exploring underground structures and aquifers through the penetrating gaze of remote sensing*. Narvan Danesh Publications. [In Persian]

Afshari, A., Ghohroudi Tali, M., Sadough, S. H., & Ehteshami Moin Abadi, M. (2019). Application of Morphotectonic Indices in Landslide Hazard Evaluation of Lorestan Railway. *Environmental Management Hazards*, *6*(1), 51-66. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jhsci.2019.272472.425

Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. D., & Garg, P. K. (2013). Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science*, *122*, 887-898. https://doi.org/10.1007/s12040-013-0309-8

Alaei Taleghani, M., Shafiei, N., & Rajabi, M. (2018). The Effect of Geomorphologic Factors on Feeding Underground Water Resources in Kermanshah Meyandareh Plain. *Hydrogeomorphology*, *4*(13), 21-41. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1396.4.13.2.7

Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Merabtene, T., Siddique, M., Khalil, M. A., Idris, A., & Almulla, E. (2019). Potential groundwater zone mapping based on geo-hydrological considerations and multi-criteria spatial analysis: North UAE. *Catena*, *173*, 511-524. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.037

Asadi, M., & Abd Manafi, N. (2022). *The worsening crisis of groundwater resources and the need to manage consumption*. Islamic Parliament Research Center Of IRAN. [In Persian] https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1750973

Blair, T. C., & McPherson, J. G. (2009). Processes and Forms of Alluvial Fans. In Parsons, A. J., Abrahams, A. D. (eds), *Geomorphology of Desert Environments*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9_14

Das, S. (2019). Comparison among influencing factor, frequency ratio, and analytical hierarchy process techniques for groundwater potential zonation in Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Groundwater for Sustainable Development*, *8*, 617-629. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.03.003

Ghahraman, K., Zanganeh Asadi, M. A., & Akbari, E. (2022). Quantitative Comparison of Morphometric Indices and Alluvial Fan Toes in Arid Regions with Emphasis on Central Iran. *Physical Geography Research*, 54(2), 243-256. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.339882.1007683

Ghahroudi Tali, M., Khodamoradi, F., & Ali Nouri, K. (2023). Effects of groundwater decrease on the of land subsidence in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Management Hazards*, *10*(1), 57-70. [In Persian] https://jhsci.ut.ac.ir/article_92866.html?

Hamdani, N., & Baali, A. (2019). Height Above Nearest Drainage (HAND) model coupled with lineament mapping for delineating groundwater potential areas (GPA). *Groundwater for Sustainable Development*, *9*, 100256. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100256

Hatefi Ardakani, A., & Ekhtesasi, M. (2016). Groundwater potentiality through Analytic Hierarchy Process (AHP) using remote sensing and Geographic Information System (GIS). *Geopersia*, *6*(1), 75-88. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jgeope.2016.57823

Hekmatnia, H., & Mousavi, M. (2006). *Model application in Geography with emphasis on Urban and Regional Planning*. Yazd: Elme Novin press. [In Persian]

Iran Meteorological Organization. (2023). Statistical report of synoptic stations. [In Persian] https://data.irimo.ir/

Khalili Naftchali, A., & Khashai, A. (2016). *Familiarization with water finding methods*. Paper presented of the Second National Congress of Drainage Irrigation of Iran, Isfahan University of Technology. [In Persian] https://civilica.com/doc/555089/

Khamis Abadi, S., Manshori, M., Sayadi, M., & Salari, M. (2012). Valuation potential of water quality in occurrence of sedimentation and corrosion in drinking water facilities in Goybolagh village, Malard city. *Journal of Environment Geology*, *6*(21), 83-102. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_524825.html

Mehr News Agency. (2022). *Report: Water is the most important crisis facing the Qazvin plain*. [Web log comment]. Retrieved 2022, Oct. 10 from https://www.mehrnews.com/news/5604171 [In Persian]

Nayebzadeh, F., Madadi, A., & Azizi, G. (2018). Quaternary Geo-morphological Evidence of Qazvin and Eshtehard Plains. *Quaternary Journal of Iran*, *3*(4), 331-346. [In Persian] https://doi.org/10.22034/irqua.2018.701919

Rajabi Eslami, A. (2018). *Variation of Groundwater Quality and Quantity under Lsnd Use and Formation(A case study: Malard Counyt)*. Master's Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran. [In Persian]

Rajabi Eslami, A., Ghahroudi Tali, M., & Salehipour Milani, A. (2024). The Influence of Geomorphic Parameters of Alluvial fan on Groundwater variation (case study: east and center of Gilan province). *Quantitative Geomorphological Research*, *12*(4), 108-127. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_187626.html

Ravindran, K. V., & Jeyaram, A. (1997). Groundwater prospects of Shahbad tehsil, Baran district, Eastern Rajasthan: a remote sensing approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *25*, 239-246. https://doi.org/10.1007/BF03019365

Sedghi, M. M., & Samani, N. (2015). *Analysis of hydraulic behavior of alluvial fan aquifers*. Paper presented of the First Iranian National Congress of Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]

Shariat Panah, S. T., & Ranjbari, R. (2005). *Self-study of SPSS basics*. Ghazal Javan Publications. [In Persian]

Wadi, D., Wu, W., Malik, I., Fuad, A., & Thaw, M. M. (2022). Assessment and feasibility of the potential artificial groundwater recharge in semi-arid crystalline rocks context, Biteira district, Sudan. *Scientific African*, *17*, e01298. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01298

Yari, M., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2019). Investigation of the Effect of to Land Use Changes on Flood Hydrograph and Fluctuations of Groundwater Level in Part of Ghareh Souh Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *8*(3), 41-58. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.80976

Zektser, L. S., & Everett, L. G. (2004). *Groundwater resources of the world and their use*. UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000134433

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.159-196 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88777.1498 Open access

Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrood sub-basins

Maryam Zare[a], Mahmood Azari[b*], Mohsen Rezaei Arefi [c]

[a] *MSc Student in Watershed Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
[b] *Associate Professor in Watershed Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
[c] *Assistant Professor in Geomorphology, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran.*

Received: 2 July 2024 ***Revised: 25 August 2024*** ***Accepted: 29 August 2024***

Extended Abstract

Introduction

Flooding is one of the most destructive environmental phenomena, causing significant human and socioeconomic losses worldwide every year. Over the past two decades, the frequency of floods worldwide has increased by more than 40%. Between 1995 and 2015, approximately 109 million people were affected by floods annually, with damages amounting to 58 billion Euros (75 billion USD) annually (Khosravi et al., 2019). . In Iran, floods are the most dangerous natural phenomenon, causing significant human and financial losses in various parts of the country annually. Historically, floods have been recognized as the most frequent, deadly, and costly natural hazard (Hejazi, Andariani, Almaspour & Mokhtari Asl, 2015).

Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods have been implemented in diverse areas of water management, including evaluating flood management options, optimizing resource allocation, and assessing flood risk potential. Compared to models based on physical watershed characteristics, MCDM methods require less detailed information and generally provide high prediction accuracy (Dou et al., 2015). Therefore, this study aims to assess the flood risk of the Kashafrood River sub-basins using morphometric indices and various MCDM methods.

Material and Methods

The study area is located between 9°E longitude and 35°38´ to 37°N latitude, covering an area of 15,650 square kilometers. This applied research integrates data analysis,

* . Corresponding author: Mahmood Azari E-mail: m.azari@um.ac.ir Tel:+989155085732

How to cite this Article: zare, M. , Azari, M. , & rezaei arefi, M. (2024). Comparison of different multi-criteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),159-196

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

geographic information systems (GIS), morphometric parameters, and multi-criteria decision analysis techniques. Data analysis was conducted using ArcGIS and Excel software.
Morphometric data were extracted and analyzed to enable pairwise comparisons for hierarchical and network analysis methods, calculating the relative importance and validity of parameters.
The TOPSIS method, introduced by Yun in 1980 and further developed by Yun and Wang in 1981, is widely used in multi-indicator decision-making. The VIKOR method, first introduced by Aperivik in 1979, focuses on selecting and ranking alternatives based on conflicting criteria (Mardani, Zavadskas, Govindan, Amat Senin & Jusoh, 2016). The ELECTRE method, developed by Bernard Roy in the 1960s, uses dominance relationships to compare alternatives.
Validation of the models was performed using percentage change analysis and recorded flood points in the region.

Results and Discussion

The criteria for this research were the morphometric characteristics of the 20 studied sub-basins, extracted using a Digital Elevation Model (DEM). These characteristics were categorized into three groups: linear, surface, and relief parameters.
Linear parameters included watercourse length and branching ratio. Basins with longer watercourses typically produce higher runoff and faster peak flow during rainstorms compared to basins with shorter watercourses (Batt, 2019). Surface parameters included basin area (A), basin length (Lb), basin perimeter (P), shape factor (Ff), drainage density (Dd), roundness ratio (Rc), elongation ratio (Re), texture ratio (Tr), waterway density (Fs), shape index (Bs), and holding constant (C). Relief parameters included basin elevation (Bh), elevation ratio (Rr), and elevation number (Rn). Basin elevation (Bh) indicates slope, waterway gradient, and runoff discharge.
The prominence value of the studied sub-basins ranged from 2247 to 1049 meters, with the highest prominence observed in sub-basins K04, K09, and K13, and the lowest in sub-basins K05, K12, K14, and K17. Among the criteria, basin area (weight: 0.188) was the most significant, while basin prominence (weight: 0.008) was the least significant. The compatibility ratio of the parameters was 0.05, indicating valid comparisons since the value is below the threshold of 0.1.
The percentage change analysis revealed that the ANP method exhibited the lowest variability (25%), while the AHP and TOPSIS methods showed the highest variability. A comparison of observed flood points with model results indicated that the ANP method had the highest correlation with flood points, followed by the AHP method, while the ELECTRE method exhibited the lowest correlation.

Conclusion

To prepare a flood zoning map for the studied sub-basins, multi-criteria decision-making (MCDM) methods such as AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, and ELECTRE were employed. Morphometric criteria were utilized to evaluate the performance of these methods.

The sub-basins were classified into five flood risk classes by each method. According to the AHP method, 53.6% of the area was classified as high and very high flood risk. The ANP method classified 50% of the area as high and very high flood risk. The TOPSIS method classified 47.6% of the area as high and very high flood risk. The VIKOR method identified 61.13% of the area as high and very high flood risk, while the ELECTRE method classified 50.75% of the area in this category.
Validation using flood points showed that the ANP method had the highest accuracy. The percentage change analysis also confirmed that the ANP method exhibited the lowest variability.
These findings suggest that morphometric indices and MCDM methods are effective tools for assessing flood risk in watersheds. However, flood risk mapping is an iterative process requiring periodic updates due to changes in land use, weather patterns, and other factors influencing flood dynamics. Regular reassessment and updating of flood risk maps are essential for accurate and effective flood management.

Keywords: Flood Risk Assessment, Morphometric Analysis, Multi-Criteria Analysis, Kashafrood Watershed, Khorasan Razavi, Watershed Management and Prioritization.

How to cite this Article: zare, M. , Azari, M. , & rezaei arefi, M. (2024). Comparison of different multi-criteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),159-196



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۱۹۶-۱۵۹ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88777.1498 دسترسی آزاد

مقایسه روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره در اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز کشف‌رود

مریم زارع - دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمود آذری[1]- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محسن رضائی عارفی- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۴/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۴ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۶/۸

چکیده

سیل یکی از رایج‌ترین خطرات طبیعی است که هم زندگی و هم دارایی‌های مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات آب و هوایی اخیر باعث افزایش فراوانی و شدت سیل شده است. در چنین شرایطی شناسایی مناطق بالقوه خطر سیل برای کاهش خسارات ناشی از سیل بسیار مهم است. ازاین‌رو، این مطالعه با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به دنبال شناسایی مناطق آسیب‌پذیر سیلاب در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز کشف رود است. بدین منظور ۱۶ شاخص مورفومتری از DEM منطقه استخراج شد و سیل‌خیزی زیرحوضه‌های مختلف با استفاده از ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE تعیین گردید و در پنج طبقه سیل‌خیزی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم طبقه‌بندی شد. نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از همبستگی اسپیرمن و بررسی درصد تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت مشخص گردید روش ANP در تهیه نقشه سیل‌خیزی حوضه دارای دقت بیشتری است و اختلاف معنی‌داری بین روش AHP،ANP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. در بررسی درصد تغییرات نیز مشخص شد کمترین درصد تغییرات مربوط به روش ANP است. بر اساس نتایج این روش ۲۴/۳ درصد

[1]. نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۰۸۵۷۳۲

Email: m.azari@um.ac.ir

حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و ۲۵/۷ درصد در طبقه زیاد قرار دارند و درمجموع بیش از ۵۰ درصد حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی خطر سیل ، تحلیل ریخت‌سنجی ، تحلیل چندمعیاره ، حوضه آبخیز کشف‌رود، خراسان رضوی، مدیریت و اولویت‌بندی حوضه آبخیز.

۱- مقدمه

یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی، سیل است که هرساله خسارات انسانی و خسارات اقتصادی اجتماعی قابل‌توجهی را در سراسر جهان به همراه دارد. طی دو دهه گذشته، فراوانی سیل در سراسر جهان بیش از ۴۰ درصد افزایش یافته است. بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵، نزدیک به ۱۰۹ میلیون نفر در سراسر جهان تحت تأثیر سیل قرار گرفته‌اند که خسارت آن به ۵۸ میلیارد یورو (۷۵ میلیارد دلار آمریکا) در سال می‌رسد (Khosravi et al., 2019). سیل به‌عنوان مخاطره‌آمیزترین پدیده طبیعی در ایران همه‌ساله خسارات جانی و مالی زیادی در نقاط مختلف کشور به بار می‌آورد. این مخاطره در طول تاریخ، رایج‌ترین، مرگبارترین و پرهزینه‌ترین خطر در میان مخاطرات طبیعی قلمداد شده است (Hejazi, Andariani, Almaspour & Mokhtari Asl, 2015). در ۶۰ سال اخیر بیش از ۳۷۰۰ مخاطره سیل در ایران گزارش شده است. به‌گونه‌ای که در دهه ۱۳۳۰ تعداد ۲۰۱ مورد سیل به وقوع پیوسته اما در دهه ۱۳۶۰ تعداد ۴۰۲ مورد سیل اتفاق افتاده است (Sharifi, 2002). وسعت نواحی سیل‌خیز ایران حدود ۹۱ میلیون هکتار برآورد شده است و ۵۵ درصد از مساحت حوضه‌های آبخیز کشور در تولید رواناب مستقیم و تند تأثیر داشته‌اند که ۴۲ میلیون هکتار آن دارای شدت سیل‌خیزی متوسط تا خیلی زیاد است (Parvaresh, Mahdavi, Malekian, Esmaeilipoor & Holisaz, 2018).

یکی از اقدامات مهم در راستای کنترل سیلاب، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی است تا در صورت اجرای عملیات حفاظتی، نواحی دارای اولویت‌های سیل‌خیزی بیشتر را شناسایی و اهمیت بیشتری به این نواحی داده و عملیات حفاظت آب در این مناطق متمرکز گردند (Razavizadeh & Shahedi, 2015). برای تعیین سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها از روش‌های بسیاری استفاده شده است. استفاده از روش‌های آماری برای بررسی همبستگی ویژگی‌های سیل با برخی ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های‌آبخیز یکی از این رویکردهاست. مدل‌های

هیدرولوژیکی از دیگر روش‌هایی است که توسط پژوهشگران برای مطالعه سیل و سیل‌خیزی در حوضه‌های‌آبخیز استفاده شده‌اند (Rahimpour, Rezaei Moghaddam, Hejazi & Valizadeh Kamran, 2023). این مدل‌ها به علت نیاز به داده‌های مکانی، هواشناسی و هیدرومتری برای واسنجی و اعتبارسنجی با مشکلاتی روبرو هستند. در سال‌های اخیر، سنجش‌ازدور و GIS به‌طور گسترده برای تهیه نقشه خطر سیل و آسیب‌پذیری مورداستفاده قرار گرفته است (Aher, Adinarayana & Gorantiwar, 2014). ازآنجاکه وقوع و شدت سیل تحت تأثیر عوامل مختلفی است، تخمین ریسک سیل مبتنی بر چند معیاره، نسبت به تخمین ریسک سیل مبتنی بر تک معیار نتایج قابل‌اعتمادتری را به دنبال خواهد داشت. ازاین‌رو استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره،[1] همچون فرآیند تحلیل شبکه (Zzaman, Nowreen, Billah & Islam, 2021)، شبکه عصبی مصنوعی (Ahmed, Hoque, Howlader & Pradhan, 2022)، درخت تصمیم (Tehrany, Pradhan & Jebur, 2013)، ماشین بردار پشتیبان (Ganjirad & Delavar, 2023)، کاربرد فراوانی در مطالعات سیل داشته است.

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در ترکیب با تحلیل مورفومتریک به‌طور گسترده به‌منظور اولویت‌بندی و ارزیابی حساسیت حوضه‌های‌آبخیز به سیلاب استفاده شده است (Akay & Baduna Koçyiğit, 2020). برخی از روش‌های MCDM که در مدیریت آب به کار گرفته شده‌اند، عبارتند از تکنیک ترتیب اولویت براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) (Aouragh & Essahlaoui, 2018)، فرآیند تحلیل شبکه (ANP) (De Brito, Evers & Almoradie, 2018)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Chaulagain et al., 2023)، ELECTRE (Teimouri & Alvandi, 2022) و روش ویکور (VIKOR)(Khosravi et al., 2019).

در ارتباط با موضوع پژوهش رحمان و همکاران (Rahaman, Ajeez, Aruchamy & Jegankumar, 2015) با استفاده از ویژگی‌های مورفومتریک و فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در حوضه آبخیز کالار پرداختند و زیرحوضه‌های آبخیز به پنج پهنه با اولویت بسیار کم، کم، متوسط، بالا و بسیار بالا تقسیم شدند. در این تحقیق نتیجه گرفتند که تکنیک AHP فازی یک

[1] Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

رویکرد عملی برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق حساس است. اوراق و اساحلاوی (Aouragh & Essahlaoui, 2018) به تحلیل مورفومتریک مبتنی بر رویکرد TOPSIS جهت اولویت‌بندی حوضه‌های آبخیز در اومارربیا در مراکش پرداختند. هدف آن‌ها از این پژوهش رتبه‌بندی حوضه از لحاظ حساسیت به سیل-خیزی و فرسایش بود. در این پژوهش ابتدا ۹ پارامتر موفومتریک با استفاده از DEM استخراج شد و با استفاده از روش TOPSIS وزن نسبی پارامترها مشخص شد. نتایج نشان داد که زیرحوضه‌های ۲ و ۶ با ضرایب ۰/۶۸۳۸ و ۰/۶۷۸۸ بیشترین حساسیت را از منظر سیل و فرسایش دارند. آکای و بادونا (Akay & Baduna Koçyiğit, 2020) در پژوهشی با عنوان اولویت‌بندی پتانسیل سیل ناگهانی زیرحوضه‌ها در یک حوضه در ترکیه با استفاده از روش‌های سنتی و تصمیم‌گیری چند معیاره به این نتیجه رسیدند که روش AHP به‌خوبی می‌تواند زیرحوضه‌های با پتانسیل سیلابی بالاتر را پیش‌بینی کند. همچنین روش اتخاذ شده برای تعیین وزن معیارهای به‌دست‌آمده از روش ANP قابلیت پیش‌بینی این روش‌ها به‌ویژه VIKOR را بهبود می‌بخشد. امسبی و ماکونیو (Msabi & Makonyo, 2021) در پژوهشی با عنوان بررسی حساسیت به سیل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره در منطقه دودوما در تانزانیا مرکزی اقدام به تهیه نقشه حساسیت به سیل منطقه بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) کردند. نتایج به دست آمده با نقشه سیل‌های تاریخی رخ داده در منطقه اعتبارسنجی گردید که دلالت بر دقت ۸۷/۲۴ درصد مدل داشت. چائولاگین و همکاران (Chaulagain et al., 2023) با استفاده از روش‌های تصمیم-گیری چند معیاره ازجمله فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب خطی وزن‌دار در سیستم اطلاعات جغرافیایی، اقدام به تهیه نقشه حساسیت سیل در کلان‌شهر کاتماندو نمودند. آن‌ها از شش معیار خطر سیل شامل، شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، بارندگی، کاربری زمین و پوشش و فاصله از رودخانه برای تهیه نقشه حساسیت به سیل استفاده نمودند. در این میان، فاصله از رودخانه مهم‌ترین معیار و پس از آن بارندگی و کاربری اراضی و پوشش اراضی بود. نتایج نشان داد که بخش زیادی از منطقه (۵۶٪) در پهنه پتانسیل سیلابی متوسط و ۳۲٪ در پهنه با پتانسیل سیلاب زیاد و ۱۱٪ در پهنه با پتانسیل سیلاب کم قرار دارند. قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzade, Azarakhshi, Mosaedi & Rostami Khalaj, 2017) کارآیی تحلیل سلسله مراتبی در تشخیص نواحی مستعد مخاطره سیلاب شهری در بخش مرکزی شهر تربت‌حیدریه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که

بیشترین وسعت منطقه مربوط به منطقه کم‌خطر (۱۲۶/۸ هکتار) و کمترین وسعت مربوط به طبقه خیلی پرخطر ۲۸/۴ هکتار است. پرورش و همکاران (Parvaresh et al., 2018) در پژوهشی با عنوان اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سیل‌خیزی به کمک مدل الکتره نوع ۳ و ضریب جریان سیلابی در زیرحوضه‌های آبخیز سرخون بندرعباس به این نتایج دست یافتند که مدل الکتره می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای تعیین پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های دارای اولویت معرفی شود. عرب عامری و همکاران (Arab Ameri, Pour Ghasemi, Rezaei & Sohrabi, 2019) اولویت‌بندی مورفومتریک حوضه‌های آبخیز به‌منظور مدیریت بهینه آب‌وخاک را با ۱۳ پارامتر مورفومتریک شکلی، خطی و توپوگرافیک و مدل ترکیبی تاپسیس-رگرسیون خطی چند متغیره انجام دادند و به این نتیجه رسیدند زیرحوضه‌های ۴، ۶ و ۹ به ترتیب با کمترین فاصله از ایده آل مثبت و بیشترین فاصله از ایده آل منفی و با کسب بیشترین امتیاز در رتبه‌های اول تا سوم قرار گیرند. رحیم‌پور و همکاران (Rahimpour et al., 2023) در پژوهشی با عنوان تحلیل خصوصیات هیدروژئومورفولوژیک حوضه آبخیز الند چای با هدف اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه‌های۳، ۱، ۴ و ۲ از حساسیت سیل‌خیزی بالایی برخوردار می‌باشند. در مقابل زیرحوضه ۱۳ و زیرحوضه ۶ ، به ترتیب کمترین وزن را از نظر ۲۲ عامل موردبررسی داشته و در نتیجه در طبقه خیلی کم از نظر حساسیت سیل‌خیزی قرار می‌گیرد. تیموری و الوند (Teimouri & Alvandi, 2022) به مقایسه مدل‌های VIKOR، ELECTRE، SAW و TOPSIS به‌منظور بررسی اولویت فرسایش‌پذیری و سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز بنکوه استان تهران پرداختند. در این مطالعه از ۱۱ پارامتر مورفومتریک استفاده شد و با استفاده از روش AHP وزن هریک از شاخص‌ها محاسبه شد و بعد از انجام تحلیل‌ها با استفاده از مدل‌های فوق نتیجه گرفتند که روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، یک رویکرد عملی و مناسب برای تصمیم‌گیری بهتر برای تعین سیل‌خیزی هستند. حسین زاده و همکاران (Hosseinzadeh, Salehi Milani & Rezaian Zarandini, 2023) حساسیت زیرحوضه‌های حوضه نکا را نسبت به سیل‌خیزی تعیین کردند. در این پژوهش به‌منظور تهیه نقشه حساسیت زیرحوضه‌ها نسبت به سیل‌خیزی حوضه از ۱۱ لایه اطلاعاتی استفاده شد و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن لایه‌ها تعیین گردید سپس با استفاده از روش ترکیبی خطی وزنی در نرم‌افزار ARC GIS مبادرت به تهیه نقشه سیل‌خیزی در پنج طبقه کردند.

تاکنون روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره معرفی شده است که بر اساس پیشینه پژوهش در حوزه‌های مختلف مدیریت آب ازجمله مدیریت سیل و سیل‌خیزی هم استفاده شده است بااین‌وجود کارایی هر یک از این روش‌ها تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است ازاین‌رو هدف این پژوهش مقایسه ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE در تعیین سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کشف رود در استان خراسان رضوی است. زیرحوضه‌های بالادست حوضه آبخیز کشف رود به دلیل تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی ناشی از رشد جمعیت پتانسیل بالایی برای بروز سیلاب و مخاطرات ناشی از آن دارند. به‌طوری‌که از سال ۱۳۳۵ تا ۱۹۹۶ نزدیک به ۹۸ سیلاب در این حوضه به وقوع پیوسته است.

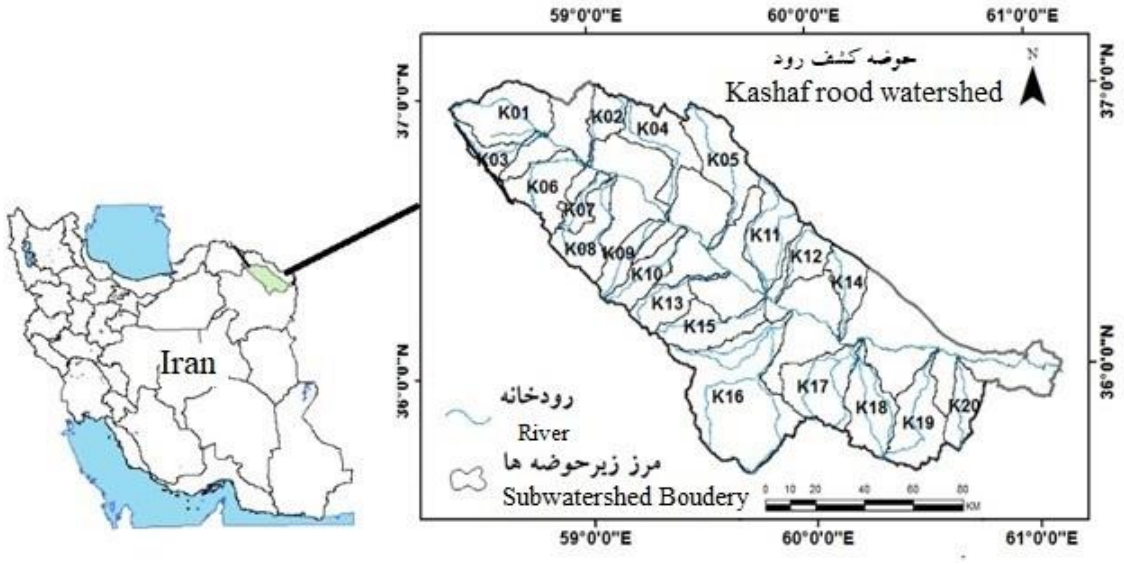
۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه موردمطالعه

حوضه‌آبخیز کشف‌رود به مساحت ۱۵۶۵۰ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی ' ۲۲ °۵۷ تا'۹ °۶۱ طول شرقی و '۳۸ °۳۵ تا °۳۷ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه از شمال به ارتفاعات هزارمسجد-کپه داغ، از جنوب به ارتفاعات بینالود، از غرب به ارتفاعات کوه‌های خواجه علی، پشته‌پر و شاه‌جهان و از شرق به رودخانه هریرود منتهی می‌شود. رودخانه‌ای که این حوضه را زهکشی می‌کند کشف‌رود نام دارد. رودخانه کشف رود پس از عبور از دشت مشهد در محلی به نام پل خاتون در مرز کشور ترکمنستان به هریرود می‌پیوندد و رودخانه تجن را تشکیل می‌دهد (Dehghan, Hosseinpour Moghadam, Lashkaripour & Ghafouri, 2012). توپوگرافی منطقه رابطه مستقیم با ساختار زمین‌شناسی دارد. مورفولوژی کلی منطقه را کوه‌های بینالود در جنوب و کوه‌های هزارمسجد در شمال حوضه شکل داده که منطقه‌ای جوان محسوب می‌شود. میانگین بارندگی سالانه حوضه ۲۶۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. از نظر پوشش گیاهی منطقه دارای پوشش گیاهی فقیر مرتعی و درختان جنگلی پراکنده شامل درختان ارس در نواحی مرتفع است.

۲-۲-روش پژوهش

در این پژوهش ۱۶ شاخص مورفومتری در سه گروه پارامترهای خطی، سطحی و برجستگی شامل مساحت حوضه، محیط حوضه، طول آبراهه، طول حوضه، عامل شکل، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، نسبت گردی، نسبت کشیدگی، نسبت بافت، فراوانی آبراهه، شاخص شکل، شاخص نگهداشت آبراهه، برجستگی حوضه، نسبت برجستگی و عدد برجستگی با استفاده از ArcGIS 10.5 از DEM منطقه استخراج شد (جدول ۱). برای استخراج پارامترهای مورفومتری از DEM ۳۰ متر منطقه استفاده شد. پس از تهیه لایه مربوط به هر یک از شاخص‌ها در محیط GIS، وزن هر یک از لایه‌ها نیز از طریق روش AHP محاسبه گردید. در ادامه با استفاده از روش‌های AHP، ANP، TOPSIS، VIKOR و ELECTRE نقشه پهنه‌بندی سیل‌خیزی هر یک از زیرحوضه‌ها تهیه شد.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوزه آبخیز کشف‌رود

Fig.1. Location map of KashafRood watershed

۲-۳-وزن دهی معیارها و تلفیق داده‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

پس از تهیه نقشه‌های مورفومتری برای استفاده در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، لازم است وزن هر عامل محاسبه گردد. برای این منظور جدول مقایسه زوجی پارامترها تهیه شد و برای تعیین ارجحیت هر معیار در اختیار اساتید دانشگاه‌ها و کارشناسان آبخیزداری قرار گرفت. در مرحله بعد با استفاده از ۵ روش تصمیم-گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE نتایج ترکیب شد و نقشه‌های اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها تهیه شد.

جدول ۱ - شاخص‌های مورفومتری منتخب در حوضه موردمطالعه

Table 1- Selected morphometric indices in the study area

منبع Refrence	رابطه Equation	علامت اختصار Acronym	مؤلفه Parameter
		پارامترهای خطی (Linear Parameters)	
-	-	Lu	طول آبراهه (Stream length)
Schumm, 1956	Rb = Nu / Nu + 1*	R_b	نسبت انشعاب (Bifurcation ratio)
		پارامترهای سطحی (Areal Parameters)	
-	-	A	مساحت حوضه (Basin area)
Horton, 1945	-	L_b	طول حوضه (Basin length)
-	-	P	محیط حوضه (Basin perimeter)
Horton, 1945	Ff = A/Lb2	F_f	فاکتور شکل (Form factor)
Horton, 1945	DD=∑LU/A	D_d	تراکم زهکشی (Drainage density)
Horton, 1945	$4\times3.14\ A/P^2$	R_c	نسبت گردی (Circularity ratio)
Horton, 1945	$1.128\sqrt{A} / Lb$	R_e	نسبت کشیدگی (Elongation ratio)
Horton, 1945	T= Dd × Fs	T_r	نسبت بافت (Texture ratio)
Horton, 1945	Fs = ΣNu / A	F_s	فراوانی آبراهه (Stream frequency)
Horton, 1945	$B_s = L_b^2/A$	B_s	شاخص شکل (Shape index)
Schumm, 1956	C= 1/Dd	C	ثابت نگه داشت آبراهه (Constant of channel maintenance)
		پارامترهای برجستگی (Relief Characteristics)	
Schumm, 1956	R = H- h*	Bh	برجستگی حوضه (Basin relief)
Schumm, 1956	Rr = Bh/Lb	R_r	نسبت برجستگی (Relief ratio)
Schumm, 1956	Rn = Dd× H/1000	R_n	عدد برجستگی (Ruggedness number)

*Nu: تعداد آبراهه هر رتبه، H: ارتفاع حداکثر حوضه، h: ارتفاع حداقل حوضه

۲-۳-۱- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP):

در این روش برای استخراج اولویت‌های نسبی در مقیاس‌های مطلق از مقایسه‌های زوجی گسسته و پیوسته در ساختارهای سلسله مراتبی چندسطحی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های مربوط به روش AHP از نرم‌افزار Expert Choice استفاده گردید. بعد از تعیین ارجحیت معیارها با استفاده از نظرات خبرگان، برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها نسبت سازگاری مقایسات محاسبه گردید. سازگاری قضاوت ذهنی را می‌توان با تخمین نسبت سازگاری که مقایسه بین شاخص ثبات و شاخص سازگاری تصادفی است، بررسی کرد. برای تعیین نسبت سازگاری از رابطه (۱) استفاده شد.

$$CR = CI/RI \qquad (۱)$$

در این رابطه CR نسبت سازگاری،CI شاخص سازگاری و RI شاخص سازگاری تصادفی است. شاخص سازگاری، معیاری است برای سنجش سازگاری که با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$CI = (\lambda_{max}-n)/(n-1) \qquad (۲)$$

در این رابطه λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه به دست آمده از ماتریس است و n اندازه ماتریس مقایسه است. نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ بود دلالت بر صحت مقایسات دارد. بعد از انجام مقایسات زوجی و مشخص نمودن شاخص سازگاری امتیاز هر یک از شاخص‌ها مشخص و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS10.5 هر لایه در وزن مربوطه ضرب شد. سپس لایه‌ها ادغام شد و نقشه سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها تهیه گردید.

۲ -۳-۲ روش ANP

این روش بر اساس نتایج حاصل از محاسبات وزنی– نسبی به وجود آمده که در مشخص نمودن و اختصاص دادن منابع بر این مورداستفاده قرار می‌گیرد. روش تحلیل شبکه با استفاده از شبکه‌ای از معیارها، گزینه‌ها و گروه‌های درون خوشه‌ها، عملیات مدل‌سازی مسائل را انجام می‌دهد. در این روش تمام عناصر موجود در شبکه قادر می‌باشند به هر طریقی با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و شبکه قادر است بازخوردها و وابستگی بین و درون خوشه‌ها را با هم ترکیب کند. روش تحلیل شبکه قادر است به‌عنوان یک کنترل سلسله مراتبی ایجاد

شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های روش ANP از نرم‌افزار Super Decisions استفاده گردید. مراحل روش ANP به شرح ذیل است:

مرحله اول: تعیین ساختار شبکه‌ای مسئله تصمیم‌گیری: در این مرحله هدف اصلی ارائه تعریفی روشن از مسئله و تبدیل آن به یک ساختار شبکه‌ای مرتبط است. درخت سلسله مراتبی شامل هدف، شاخص‌ها و گزینه‌ها است که به هرکدام از اجزای درخت سلسله‌مراتب، خوشه گفته می‌شود و هرکدام از این خوشه‌ها از عناصری تشکیل شده‌اند. در واقع یک شبکه تصمیم‌گیری از مجموعه‌ای از خوشه‌ها، عناصر و ارتباطات میان آن‌ها تشکیل می‌شود.

مرحله دوم: مقایسه زوجی معیارها: این مرحله همانند روش AHP بوده و در این پژوهش همانند روش AHP عمل گردید و معیارها با یکدیگر مقایسه گردید.

مرحله سوم: محاسبه وزن نهایی: برای محاسبه وزن شاخص‌ها از دو روش استفاده می‌شود. روش گام‌به‌گام و روش سوپرماتریس در روش گام‌به‌گام با توجه به اینکه وزن شاخص‌ها در دو ماتریس جداگانه شامل ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به هدف (W_{21}) و ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به شاخص‌های دیگر (W_{22}) محاسبه می‌شود، جهت تعیین وزن شاخص‌ها باید این دو ماتریس را ترکیب کرد.

روش دوم روش سوپر ماتریس است. یک سوپرماتریس در حقیقت یک ماتریس جزءبندی شده است که در آن هر بخش از ماتریس، رابطه بین دو سطح تصمیم‌گیری را در کل مسئله تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. رابطه (۳) سوپرماتریس استاندار ارائه شده توسط ساعتی و وارگاس (Saaty & Vargas, 2006) را نشان می‌دهد. در این سوپر ماتریس C بیانگر خوشه‌ها و e عناصر درون گروه‌ها است. بردارهای W درون ماتریس نیز بردارهای وزنی حاصل از مقایسات زوجی عناصر خوشه‌ها با یکدیگر است. تمام روابط و تعاملات بین عناصر سطوح تصمیم‌گیری به‌وسیله مقایسات زوجی در روش سوپرماتریس ارزشیابی می‌شود (Mir Ghafouri, Asadian Ardakani & Azizi, 2013).

$$W=\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & . & . & . & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & . & . & . & W_{12N} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ W_{N1} & W_{N2} & . & . & . & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

مرحله چهارم: تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی: بعد از محاسبه وزن هر شاخص لایه مربوطه تهیه و با تلفیق لایه‌ها نقشه نهایی سیل‌خیزی برای تمام حوضه‌ها تهیه گردید.

۲-۳-۳- روش تاپسیس (TOPSIS)

این روش یکی از پرکاربردترین مدل‌های جبرانی تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که در سال ۱۹۸۰ توسط یون ارائه گردید و سپس توسط یون و وانگ[1] در سال ۱۹۸۱ برای یک مسئله چند شاخصه با n شاخص و m گزینه توسعه داده شد. نکته متمایز این روش نسبت به سایر روش‌ها، ایجاد جواب‌های ایده‌آل به دو صورت ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی در فضای اقلیدسی است. مراحل انجام تاپسیس در این پژوهش به‌صورت زیر است که در نرم‌افزار Super Decisions انجام شد:

مرحله اول: محاسبه ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده با رابطه (۴)

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt[2]{\sum_{i=1}^{xij} x_{ij}^2}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) Xij: نشان‌دهنده ارزش گزینه i ام با توجه با شاخص j ام است.

مرحله دوم: محاسبه ماتریس نرمال شده موزون با رابطه (۵)

$$v_{ij} = w_j \times n_{ij} \quad (۵)$$

که در رابطه (۵) w_j وزن هر معیار و n_{ij} ماتریس نرمال شده عناصر است.

مرحله سوم: تعیین مجموعه جواب ایده‌آل مثبت (A^+) و مجموعه جواب ایده‌آل منفی (A^-) شاخص‌ها

[1] Yoon and wang

$$A^{+}=\{(maxr_{ij} \mid j \in C_b), (minr_{ji} \mid i \in C_c) \mid i = 1,2,\dots,m\} = (v_1^{+}, v_2^{+}, \dots v_m^{+}) \quad (۶)$$

$$A^{-}=\{(maxr_{ij} \mid j \in C_b), (minr_{ji} \mid i \in C_c) \mid i = 1,2,\dots,m\} = (v_1^{-}, v_2^{-}, \dots v_m^{-}) \quad (۷)$$

در رابطه‌های (۶) و (۷) C_b و C_c به ترتیب بیانگر مجموعه شاخص‌های مثبت و منفی می‌باشند. $v_1^{+}, v_2^{+}, \dots v_m^{+}$ مقادیر داده‌های استاندارد شده است.

مرحله چهارم: محاسبه فاصله گزینه‌ها از مقادیر راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (S^{+}_i) و منفی (S^{-}_i)، در این مرحله با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) فاصله هر شاخص از ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه گردید.

$$S^{+}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_i^{+} - v_{ij})^2} \qquad j = 1,2, \dots ,m \quad (۸)$$

$$S^{-}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_i^{-} - v_{ij})^2} \qquad j = 1,2, \dots ,m \quad (۹)$$

در رابطه (۸) و (۹) v_i^{+} و v_i^{-} به ترتیب ارزش حداکثر و ارزش حداقل در هر یک از نقشه‌های استاندارد شده است.

مرحله پنجم: محاسبه ضریب نزدیکی نسبی گزینه‌ها به مقدار ایده‌آل، در این مرحله با استفاده از رابطه (۱۰) ضریب نزدیکی گزینه‌ها به مقدار ایده‌آل محاسبه گردید.

$$C_i = \frac{s_i^{+}}{s_i^{+}+s_i^{-}} \qquad i = 1,2, \dots ,m \quad (۱۰)$$

۲ -۳-۴- روش ویکور (VIKOR)

این روش را نخستین بار اپریکویک در سال ۱۹۷۹ معرفی کرد که بر انتخاب و رتبه‌بندی گزینه‌های جایگزین از معیارهای متضاد تأکید داشت (Mardani, Zavadskas, Govindan, Amat Senin & Jusoh, 2016). این روش، رتبه‌بندی چند معیاره را بر اساس معیار خاص نزدیک به راه‌حل ایده‌آل انجام می‌دهد (Opricovic & Tzeng, 2007). در این روش پس از تشکیل ماتریس تصمیم و نرمال‌سازی مراحل زیر انجام می‌شود:

مرحله اول: تعیین بهترین نقطه ایده‌آل مثبت (f^{+}_{i}) و منفی معیارها (f^{-}_{i}): که ایده آل مثبت برای معیارهای مثبت برابر با بزرگ‌ترین مقدار ستون معیار و ایده‌آل منفی کوچک‌ترین مقدار ستون معیار است و برای معیارهای منفی عکس این حالت است.

مرحله دوم: محاسبه مقادیر S_j (سودمندی) و R_j (تأسف).: مقدار سودمندی (S) بیانگر فاصله نسبی گزینه i ام از نقطه ایده‌آل و مقدار تأسف (R) بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری از نقطه ایده‌آل است. برای این منظور از رابطه (۱۱) و رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} Wi \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \quad (۱۱)$$

$$R_j = \max\left[W_i \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-}\right] \quad (۱۲)$$

مرحله سوم: تعیین شاخص ویکور (Q): مقدار شاخص ویکور از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$Q = V \frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} + (1 - V) \frac{R_j - R^+}{R^- - R^+} \quad (۱۳)$$

V در این رابطه وزنی است که معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روش ویکور بهترین گزینه، گزینه‌ای است که کمترین مقدار Q را دارا باشد.

۲-۳-۵ - روش الکتره (ELECTRE)

این روش برای اولین بار توسط برنارد روی[1] در اواسط سال ۱۹۶۰ ارائه شد که در آن گزینه‌ها بر اساس مفهوم روابط برتری با یکدیگر مقایسه می‌شوند. روش الکتره ازجمله تکنیک‌های مشهور در تئوری تصمیم‌گیری هستند که با هدف انتخاب، طبقه‌بندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها معرفی شده‌اند (Zare & Zamzam, 2022). برای انجام این روش مراحل زیر طی شده است:

مرحله اول: بی مقیاس سازی ماتریس تشکیل شده، که در این مطالعه از روش نرم اقلیدسی استفاده گردید (رابطه ۱۴).

[1] Bernard Roy

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_1^m x_{ij}^2}} \quad (۱۴)$$

مرحله دوم: تعیین وزن معیارها: در این مرحله با توجه به ضرایب اهمیت معیارها در تصمیم‌گیری، بردار ضریب اهمیت معیارها تعیین گردید. برای تعیین وزن هر یک از معیارها در این پژوهش از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد.

$$V_{ij} = W_j * N_{ij} \qquad j=1,2,\ldots,n \; ; \; i=1,2,\ldots,m \quad (۱۵)$$

مرحله سوم: تشکیل ماتریس هماهنگ و ناهماهنگ: در این مرحله تمام معیارهای موردمطالعه در هر زیرحوضه با زیرحوضه‌های دیگر مقایسه شد و ماتریس هماهنگ و ناهماهنگ با استفاده از روابط (۱۶ و ۱۷) محاسبه گردید.

$$\text{ماتریس هماهنگ} = \begin{bmatrix} j \mid V_{kj} \geq V_{1j} \mid \in J^+ \\ j \mid V_{kj} < V_{1j} \mid \in J^- \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

$$\text{ماتریس ناهماهنگ} = \begin{bmatrix} j \mid V_{kj} < V_{1j} \mid \in J^+ \\ j \mid V_{kj} \geq V_{1j} \mid \in J^- \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

مرحله چهارم: تشکیل ماتریس هماهنگ مؤثر (F) و ناهماهنگ مؤثر (G): برای ایجاد ماتریس هماهنگ مؤثر ابتدا یک مقدار آستانه تعیین گردید، در مرحله بعد هر عنصر ماتریس I که بزرگ‌تر یا مساوی این مقدار آستانه بود در ماتریس F مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر تعلق گرفت. یک روش عمومی برای تعیین مقدار آستانه استفاده از میانگین مقادیر ماتریس است که از روابط (۱۸ و ۱۹) حاصل می‌شود.

$$\bar{I} = \sum_{k=1}^m \sum_{1=1}^m \frac{I_{k1}}{m(m-1)} \quad (۱۸)$$

$$F_{k1} = \begin{cases} 0 & I_{k1} < \bar{I} \\ 1 & I_{k1} \geq \bar{I} \end{cases} \quad (۱۹)$$

برای ایجاد ماتریس ناهماهنگ مؤثر (G) بر خلاف ماتریس مؤثر هماهنگ هر عنصری که از مقدار آستانه (NI) بیشتر بود صفر و هر عنصری که مقدار آن کمتر یا مساوی آستانه بود مقدار یک گرفت.

$$\overline{NI} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{1=1}^{m} \frac{\overline{NI}_{k1}}{m(m-1)} \quad (۲۰)$$

$$G_{k1} = \begin{cases} 0 & N\,I_{k1} < \overline{NI} \\ 1 & NI_{k1} \geq \overline{NI} \end{cases} \quad (۲۱)$$

مرحله پنجم: تشکیل ماتریس جامع مؤثر (H)، در این مرحله ماتریس هماهنگ مؤثر در ماتریس ناهماهنگ مؤثر ضرب شد و حاصل آن ماتریس جدیدی به نام ماتریس هماهنگ مؤثر است (رابطه ۲۲).

$$H_{kI} = F_{kI} \times G_{k}I \quad (۲۲)$$

ماتریس جامع مؤثر نشان‌دهنده ترتیب ارجحیت‌های نسبی از گزینه‌ها است و این ماتریس برای رتبه‌بندی و گروه‌بندی حوضه‌های آبخیز مورداستفاده قرار گرفت.

۲-۴-اعتبارسنجی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی مدل‌ها از روش بررسی درصد تغییرات و نقاط مشاهده‌ای یا همان نقاط سیل‌خیز ثبت شده در منطقه استفاده گردید. برای بررسی درصد تغییرات، نتایج حاصل از طبقه‌بندی زیرحوضه‌ها در روش‌های موردمطالعه دو به دو مقایسه شده و تعداد زیرحوضه‌هایی که در هر دو روش در طبقه یکسان قرار می‌گیرند محاسبه می‌گردد و بر اساس آن درصد تغییرات روش‌ها ارزیابی می‌شود. هر روش که کمترین درصد تغییرات را داشته باشد نتایج حاصل از آن معتبرتر خواهد بود (Sharifi kia, Shayan, Yamani & Arab Ameri, 2018). برای محاسبه درصد تغییرات از رابطه (۲۳) استفاده شد.

$$\Delta P = \frac{N - N_{Constant}}{N} \times 100 \quad (۲۳)$$

در این رابطه ΔP درصد تغییرات در مقایسه دو روش، $N_{Constant}$ تعداد زیرحوضه‌هایی است که در مقایسه دو روش دارای رتبه ثابتی هستند و N تعداد کل زیرحوضه‌های موردمطالعه است. برای مقایسه با نقاط سیل‌خیز، از سیلاب‌های ثبت شده در حوضه که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه گردیده، استفاده شد. بدین منظور از روش همبستگی اسپیرمن که یک روش بررسی همبستگی رتبه‌ای است، استفاده گردید. بر این اساس زیرحوضه‌ها رتبه‌بندی شده و با نتایج روش‌های AHP، ANP، TOPSIS،

VIKOR و ELECTRE مقایسه و همبستگی آن‌ها با روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در نرم‌افزار SPSS محاسبه گردید.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-نتایج محاسبه پارامترهای مورفومتریک حوضه

معیارهای موردنیاز در این پژوهش، خصوصیات مورفومتری حوضه‌ها بوده است برای ۲۰ زیرحوضه موردمطالعه که در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات مورفومتری زیرحوضه‌های موردمطالعه

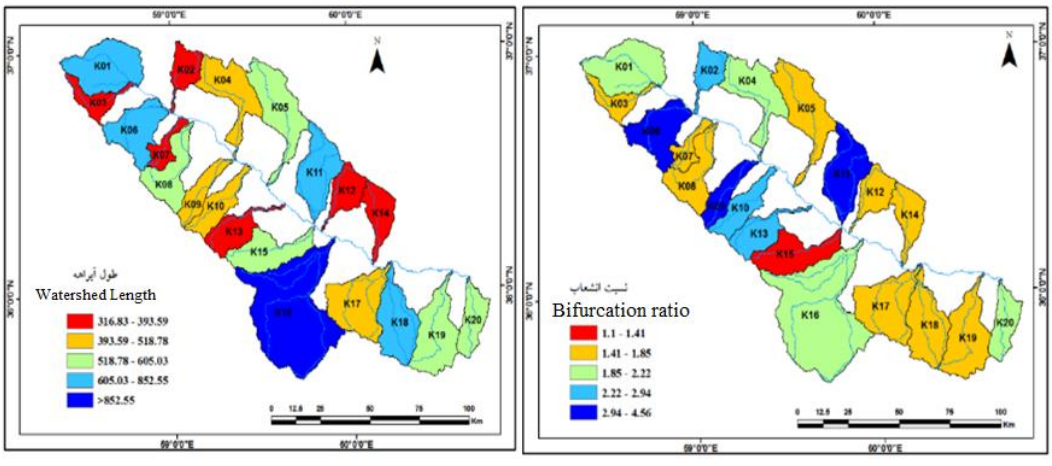
Table 2- Morphometric characteristics of the studied sub-basins

R_n	R_r	Bh	C	B_s	F_s	T_r	R_e	R_c	D_d	F_f	P	L_b	A	R_b	Lu	زیرحوضه Subbbasin
0.47	23.3	1317	0.85	4.45	0.96	1.23	0.53	0.31	1.18	0.22	171.4	56.5	716.7	2.02	852.6	K01
0.44	35.5	1716	0.79	9.01	1.95	0.65	0.38	0.18	1.26	0.11	139.4	48.3	258.9	2.94	325.2	K02
0.64	21.9	1258	0.63	14.35	2.32	0.68	0.3	0.12	1.58	0.07	157.1	57.4	229.5	1.69	363.5	K03
0.29	27.2	2060	1.1	10.01	0.95	0.95	0.36	0.13	0.9	0.01	237.2	75.8	573.9	1.99	518.8	K04
0.29	14.0	1196	1.18	10.76	0.8	1.06	0.34	0.16	0.85	0.09	233.9	85.5	679.4	1.74	577.5	K05
0.46	31.7	1750	0.75	5.7	1.62	0.82	0.47	0.2	1.33	0.08	184.5	55.3	536.2	4.56	715.2	K06
0.72	30.6	1385	0.56	11.69	3.48	0.51	0.33	0.14	1.8	0.09	123.6	45.3	175.6	1.82	316.8	K07
0.39	30.7	2019	0.82	9.1	1.34	0.91	0.37	0.18	1.22	0.11	182.2	65.7	474.3	1.8	577.1	K08
0.54	44.9	2247	0.54	9.01	3.18	0.58	0.38	0.21	1.86	0.11	130.9	50	277.4	4.53	515.0	K09
0.45	40.3	2231	0.68	9.1	2.05	0.72	0.37	0.18	1.47	0.11	153.3	55.3	335.9	2.67	492.0	K10
0.53	22.6	1538	0.78	8.02	1.62	0.79	0.4	0.26	1.28	0.12	167.3	68.1	577.9	3.96	737.5	K11
0.69	23.8	1049	0.75	6.54	1.56	0.85	0.44	0.22	1.33	0.15	131.1	44	295.8	1.84	393.6	K12
0.35	37.2	2127	0.94	9.26	1.36	0.78	0.37	0.15	1.06	0.11	171.5	57.2	353.3	2.76	373.5	K13
0.59	23.0	1170	0.86	7.97	1.52	0.76	0.4	0.22	1.16	0.13	136.5	50.9	325.1	1.74	377.1	K14
0.45	29.0	1766	0.83	7.36	1.24	0.97	0.42	0.28	1.2	0.14	180	61	505.6	1.41	605.0	K15

0.7	18.9	1732	0.55	4.65	2.56	0.71	0.52	0.21	1.83	0.22	328.3	91.5	180.1	1.99	329.8	K16
0.55	21.9	1259	0.89	4.82	0.82	1.37	0.51	0.27	1.12	0.21	178.8	57.4	683.4	1.85	766.7	K17
0.35	23.7	1408	1.04	6.08	0.89	1.08	0.46	0.24	0.96	0.16	176.1	59.7	586.4	1.63	561.7	K18
0.45	18.4	1392	1.09	8.73	0.8	1.15	0.38	0.22	0.92	0.11	191.3	75.5	652.8	2.223	599.0	K19
0.76	21.9	1066	0.77	7.25	1.51	0.86	0.42	0.25	1.3	0.14	128.4	48.6	325.6	1.81	424.0	K20

۳-۱-۱-پارامترهای خطی

پارامترهای خطی منتخب در این پژوهش شامل طول آبراهه و نسبت انشعاب است. ازآنجاکه طول آبراهه با تعداد آبراهه رابطه مستقیمی دارد حوضه‌هایی که آبراهه طولانی‌تری دارند معمولاً در هنگام وقوع طوفان‌های بارانی نسبت به حوضه‌های با طول آبراهه کم، باعث رواناب زیاد و جریان اوج سریع می‌شوند (Bhat, 2019). نتایج نشان داد بیشترین طول آبراهه به دست آمده مربوط به زیرحوضه‌های K16 برابر با ۳۲۹۵/۸۳ کیلومتر و زیرحوضه K01 برابر با ۸۵۲/۵۵ کیلومتر و کمترین طول به دست آمده مربوط به زیرحوضه K07 برابر با ۳۱۶/۸۳ کیلومتر است. در مورد نسبت انشعاب نیز باید گفت که مقدار بالای نسبت انشعاب در زیرحوضه نشان می‌دهد که پتانسیل تولید رواناب در آن بالا است و پتانسیل بالایی برای تولید سیلاب ناگهانی در طی باران‌های سیل‌آسا را دارد. بیشترین میزان نسبت انشعاب نیز مربوط به زیرحوضه K06 برابر با ۴/۵۶ و کمترین آن مربوط به زیرحوضه K15 برابر با ۱/۴۱ است.



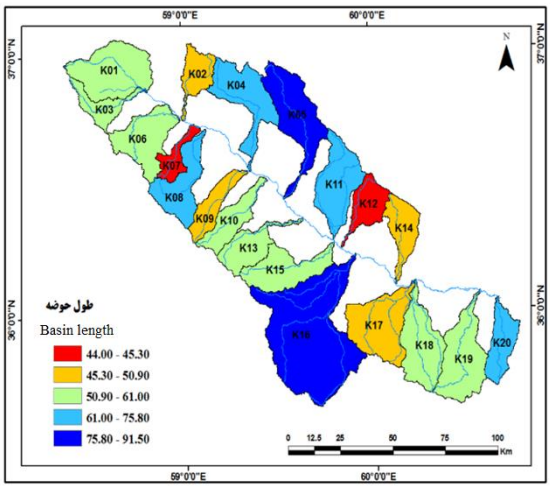
شکل ۲- فاکتورهای خطی حوضه‌های موردمطالعه

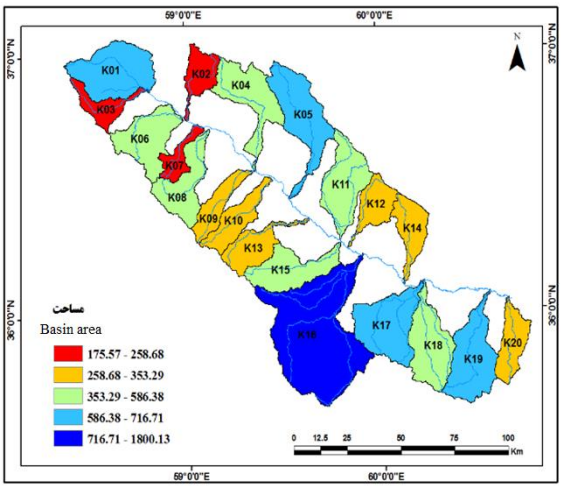
Fig.2. Linear factors of the studied basins

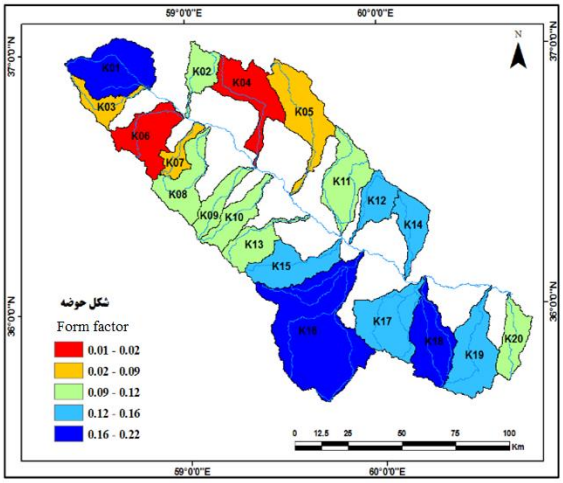
۳-۱-۲-پارامترهای سطحی

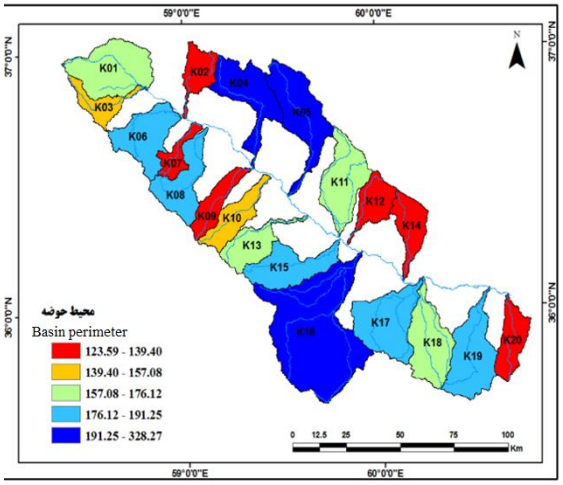
از میان پارامترهای سطحی موردمطالعه، عامل مساحت از فاکتورهای بسیار مهم در سیل‌خیزی یک حوضه آبخیز است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط هورتون (Horton, 1945) حوضه‌های با مساحت بیش از ۱۰۰ کیلومترمربع در طبقه حوضه‌های بزرگ قرار می‌گیرند. مساحت زیرحوضه‌ها از ۱۷۵/۶ کیلومترمربع در زیرحوضه K07 تا ۳۲۹۵/۸۳ کیلومترمربع در زیر حوضه K16، متغیر است در نتیجه تمامی زیرحوضه‌های مطالعاتی در طبقه حوضه‌های بزرگ قرار دارند. پارامتر طول حوضه تعیین‌کننده زمان حرکت رواناب به‌ویژه سیلاب در داخل حوضه است؛ بدین معنی که در زیرحوضه‌های با طول بیشتر رواناب زمان بیشتری را برای رسیدن به خروجی حوضه طی می‌نماید. همچنین حوضه‌های با طول بیشتر پتانسیل بیشتری برای تغذیه آب‌های زیرزمینی دارند. مقدار این پارامتر در زیرحوضه‌های موردمطالعه از ۴۸/۶ کیلومتر در زیرحوضه K20 تا ۹۱/۵ کیلومتر در زیرحوضه K16 متغیر است. فاکتور محیط حوضه (P) در ارتباط مستقیم با مساحت حوضه و طول حوضه است. این فاکتور به همراه مساحت و طول حوضه از پارامترهای اساسی اثرگذار بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه می‌باشند. در بین زیرحوضه‌های موردمطالعه بیشترین محیط مربوط به زیرحوضه K16 با مقدار ۳۲۸/۳ کیلومتر است. کمترین مقدار نیز مربوط به زیرحوضه K14 برابر با ۱۳۶/۵ کیلومتر است. فاکتور شکل (Ff) پارامتری است که می‌توان برای پیش‌بینی شدت‌جریان زیرحوضه‌ها از آن استفاده نمود. به این صورت که زیرحوضه‌های دارای مقادیر بالای فاکتور شکل دارای دبی زیاد در مدت‌زمان کوتاه می‌باشند و در زیرحوضه‌های با مقادیر کم برعکس این قضیه صدق می‌کند. توزیع فاکتور شکل در زیرحوضه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های K01 و K16 با مقدار ۰/۲۲ بیشترین مقدار فاکتور شکل را دارا می‌باشند. تراکم بالای زهکشی (D) یک شاخص مهم برای حجم بالای رواناب و پیک‌های سریع سیل است (Horton, 1945). تراکم زهکشی بالا اغلب با خاک‌های نفوذناپذیر، پوشش گیاهی کم و زمین‌های کوهستانی همراه است. بیشترین مقدار پارامتر تراکم زهکشی در زیرحوضه‌های موردمطالعه، مربوط به زیرحوضه K09 با مقدار ۱/۸۶ و K16 با ۱/۸۳ است، نسبت گردی متأثر از سایر ویژگی‌های حوضه مانند تراکم زهکشی، ناهمواری زمین، برجستگی حوضه، شیب حوضه و پوشش گیاهی حوضه است. مقدار این فاکتور بین صفرتا ۱ قرار دارد. هر چه به یک نزدیک‌تر باشد شکل حوضه دایره‌ای و دارای پتانسیل سیل‌خیزی

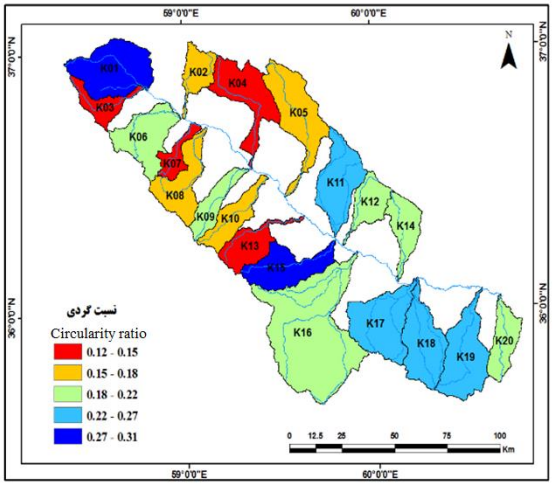
بیشتری خواهد بود (Bisht, Chaudhry, Sharma & Soni, 2018). زیرحوضه K01 با مقدار ۰/۳۱ بیشترین مقدار نسبت گردی را دارا بوده و زیرحوضه K03 با مقدار ۰/۱۳ کمترین مقدار را دارد. نسبت کشیدگی پارامتر مهمی برای تحلیل شکل حوضه‌آبخیز است. مقدار این فاکتور نحوه شکل‌گیری سیلاب، درجه فرسایش و رسوب‌دهی حوضه را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار نسبت کشیدگی برابر با ۰/۵۳ مربوط به زیرحوضه K01 و کمترین آن برابر با ۰/۳ مربوط به زیرحوضه K03 است. شاخص نسبت بافت (T) رابطه مستقیمی با ناهمواری، پوشش گیاهی و وضعیت خاک منطقه دارد (Smith,1950). مقدار بالای نسبت بافت نشان‌دهنده سیل‌خیزتر بودن زیرحوضه است. بیشترین مقدار پارامتر نسبت بافت (T) ۱/۳۷ مربوط به زیرحوضه K17 بود و کمترین آن برابر با ۰/۵۱ مربوط به زیرحوضه K07 است. مناطق با شیب‌های تند و ظرفیت نفوذ کم که معمولاً با فراوانی آبراهه بالا همراه است، جریان سطحی و پتانسیل سیل بیشتر را تسهیل می‌کند. مقدار فراوانی آبراهه از ۰/۸ برای زیرحوضه‌های K05 و K19 به‌عنوان کمترین مقدار تا ۳/۴۸ به‌عنوان بیشترین مقدار برای زیرحوضه K07 متغیر است. شاخص شکل حوضه (Bs) فاکتوری مؤثر در دبی سیلاب زیرحوضه‌ها است. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد نشان‌دهنده دبی اوج سیلاب کمتر خواهد بود. بیشترین مقدار این پارامتر شاخص شکل (Bs) مربوط به زیرحوضه K03 برابر با ۱۴/۳۵ است و کمترین مقدار آن مربوط به زیرحوضه K01 برابر با ۴/۴۵ است. ثابت نگه داشت حوضه (C) نه‌تنها به نوع سنگ و نفوذپذیری، شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و برجستگی بستگی دارد، بلکه همچنین وابسته به مدت‌زمان فرسایش و اقلیم دیرینه حوضه است (Chandrashekar, Lokesh, Sameena & Ranganna, 2015). مقدار کم این شاخص نشان می‌دهد حوضه دارای خاک‌های با مقاومت کم، پوشش گیاهی ضعیف و ناهموار است و اعداد بالا این شاخص نشان‌دهنده وجود خاک‌های مقاوم با پوشش گیاهی مناسب و زمین‌های هموار است. ثابت نگهداشت زیرحوضه بین ۰/۵۴ تا ۱/۱۸ متغیر است که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه K05 و کمترین آن ۰/۵۴ مربوط به زیرحوضه K09 است.

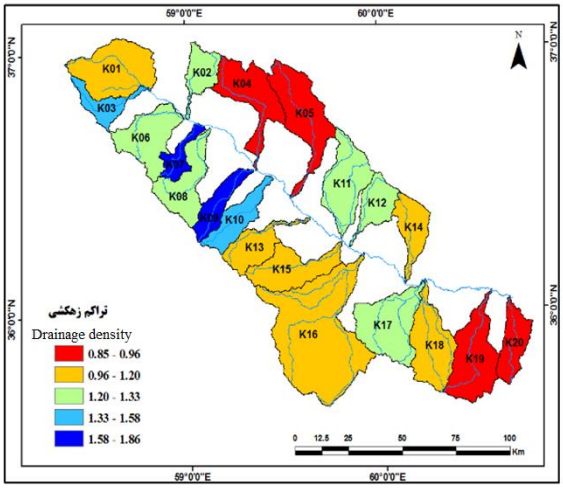

طول حوضه
Basin length
44.00 - 45.30
45.30 - 50.90
50.90 - 61.00
61.00 - 75.80
75.80 - 91.50

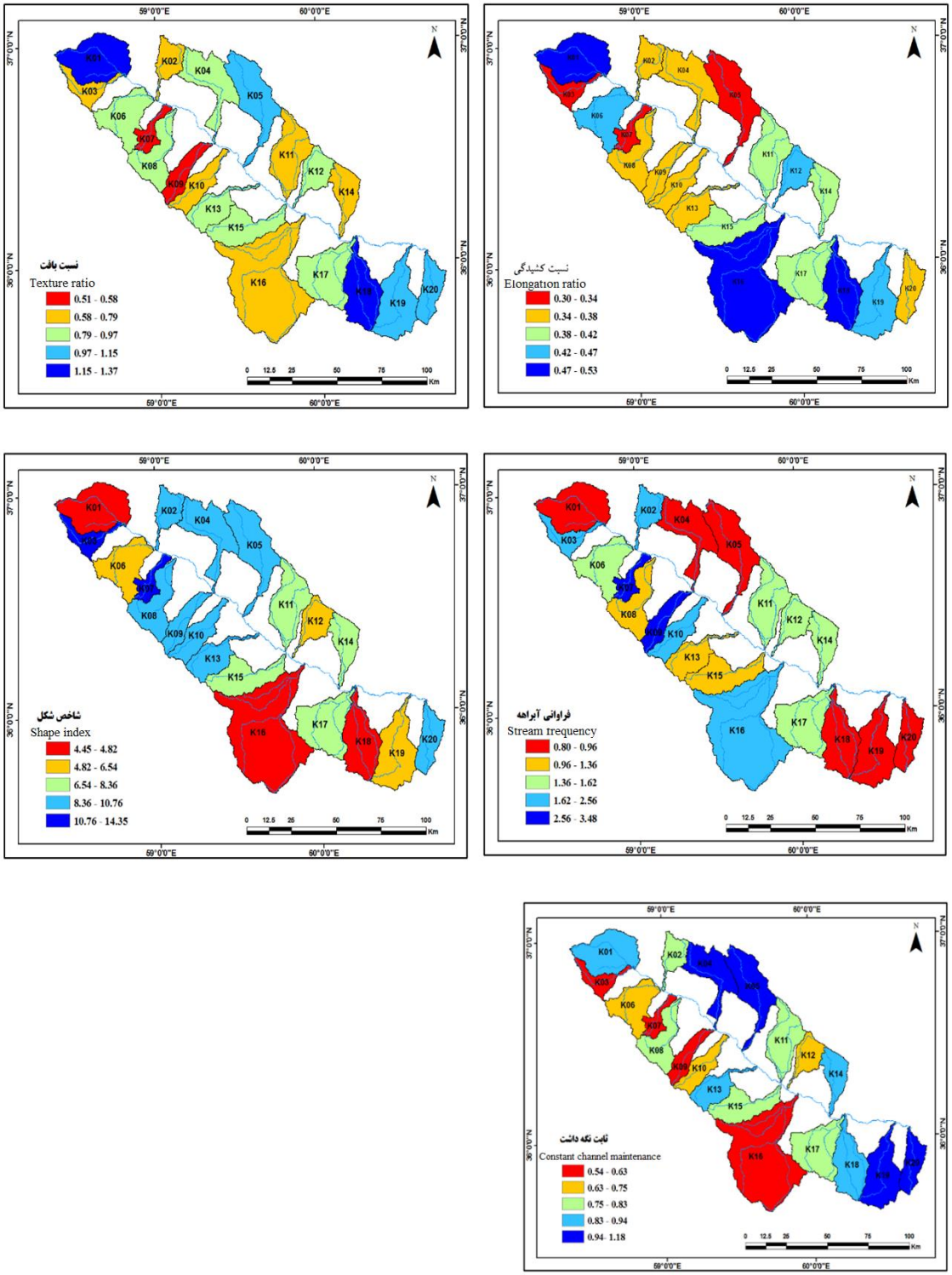

مساحت
Basin area
175.57 - 258.68
258.68 - 353.29
353.29 - 586.38
586.38 - 716.71
716.71 - 1800.13


شکل حوضه
Form factor
0.01 - 0.02
0.02 - 0.09
0.09 - 0.12
0.12 - 0.16
0.16 - 0.22


محیط حوضه
Basin perimeter
123.59 - 139.40
139.40 - 157.08
157.08 - 176.12
176.12 - 191.25
191.25 - 328.27


نسبت گردی
Circularity ratio
0.12 - 0.15
0.15 - 0.18
0.18 - 0.22
0.22 - 0.27
0.27 - 0.31


تراکم زهکشی
Drainage density
0.85 - 0.96
0.96 - 1.20
1.20 - 1.33
1.33 - 1.58
1.58 - 1.86

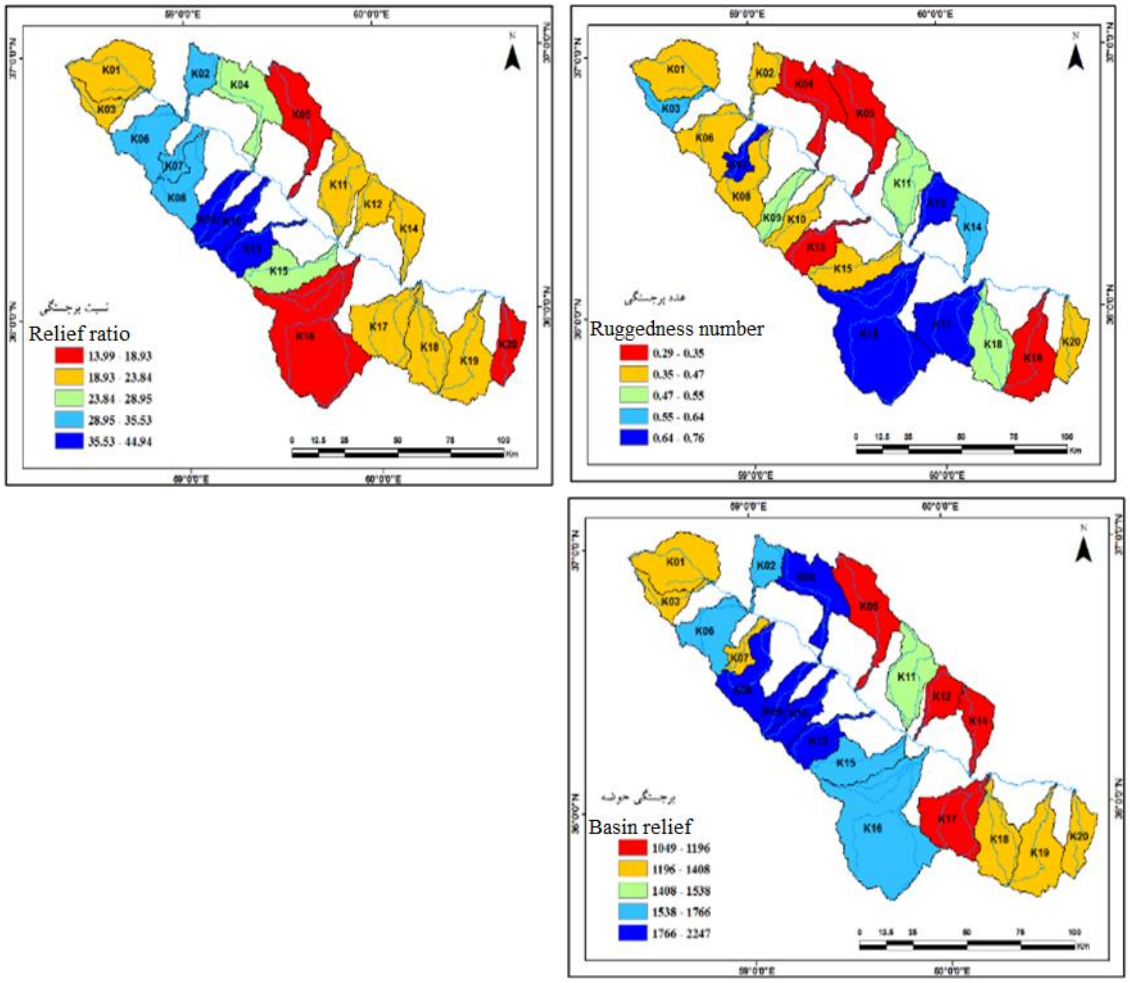


شکل ۳- پارامترهای سطحی زیرحوضه‌های موردمطالعه

Fig.3. Aerial parameters of the studied subbasins

۳-۱-۳ - پارامترهای برجستگی

پارامترهای برجستگی منتخب در این پژوهش شامل، برجستگی حوضه (Bh)، نسبت برجستگی (Rr) و عدد برجستگی (Rn) است. برجستگی حوضه (Bh)، شاخصی است که شیب، شیب آبراهه و همچنین تخلیه رواناب در حوضه را نشان می‌دهد. مقدار برجستگی زیرحوضه‌های موردمطالعه از ۲۲۴۷ تا ۱۰۴۹ متغیر است که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه‌های K04، K09، K13، و کمترین آن مربوط به زیرحوضه‌های K05، K12، K14 و K17 است. زیرحوضه‌های با مقدار برجستگی بالا توانایی تولید سیلاب بیشتری نسبت به زیرحوضه‌های با مقدار برجستگی کم را دارا می‌باشند. پارامتر نسبت برجستگی (Rr) شاخصی جهت ارزیابی شدت سیل‌خیزی و فرسایش در یک حوضه استفاده نمود. مقادیر بالای این پارامتر نشان‌دهنده وجود مناطق ناهموار دارای شیب زیاد، سرعت جریان بالا و سیل‌خیز است. این شاخص همچنین امکان مقایسه زیرحوضه‌ها از لحاظ برجستگی و ناهمواری را بدون توجه به تفاوت در مقیاس توپوگرافی را می‌دهد. مقدار این شاخص از ۴۴/۹۴ در زیرحوضه K09 تا ۱۳/۹۹ برای زیرحوضه K05 متغیر است. بالا بودن مقدار عدد برجستگی حوضه (Rn)، در زیرحوضه نشان‌دهنده شیب زیاد بوده که می‌تواند منجر به سیلاب‌های ناگهانی گردد. مقدار شاخص عدد برجستگی از ۰/۲۹ که کمترین میزان آن است تا ۰/۷۶ که بیشترین میزان آن است متغیر بوده که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه K20 و کمترین آن نیز مربوط به زیرحوضه‌های K04 و K05 است.



شکل ۴- پارامترهای برجستگی زیرحوضه‌های موردمطالعه

Fig.4. Relief parameters of the studied subbasins

۳-۴- مقایسه نتایج روش‌های مختلف تحلیل چند معیاره

قبل از انجام تحلیل‌ها با روش‌های مختلف وزن هر یک از پارامترها تعیین گردید. در جدول ۳، وزن هریک از پارامترها که به‌وسیله روش AHP تعیین گردیده ارائه شده است. بر این اساس معیار مساحت با وزن ۰/۱۸۸ دارای بیشترین وزن و معیار برجستگی حوضه با وزن ۰/۰۰۸ کم‌اهمیت‌ترین معیار بوده است. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات پژوهشگرانی مانند چورلی و همکاران (Chorley, Malm & Pogorzelski, 1957) و السعدی و همکاران (Al-Saady, Al-Suhail, Al-Tawash & Othman, 2016) که عقیده دارند شاخص مساحت یک

شاخص اساسی و تعیین‌کننده در سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز هستند و تحقیقات افرادی مانند کریستوفر و همکاران (Christopher, Idowu & Olugbenga, 2010) و بیشت و همکاران (Bisht et al., 2018) که آبراهه را شاخصی اساسی در واکنش‌های هیدرولوژیکی آبخیز می‌دانند همخوانی دارد. همچنین نتایج تحلیل شاخص‌های مورفولوژیک نشان می‌دهد این شاخص‌ها اهمیت زیادی در مطالعات سیل‌خیزی و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه‌های آبخیز دارند که این امر در مطالعات افرادی مانند: الم و همکاران (Alam, Ahmed & Sammonds, 2021)، همدان (Hamdan, 2020) و مقیمی و همکاران (Moghimi, Mousavi Harami, Moatamed & Ahmadi, 2010) تأکید شده و این محققان بیان کرده‌اند که شاخص‌های مورفومتری دارای اهمیت اساسی در وقوع سیلاب در حوضه‌های آبخیز هستند.

جدول ۳- وزن هر یک از پارامترها بر اساس روش **AHP**

Table 3- The weight of each parameter based on the AHP method

ردیف Row	علامت اختصاری پارامتر Acronym	پارامتر Parameter	وزن weight
1	Lu	طول آبراهه Stream length	0.097
2	R_b	نسبت انشعاب Bifurcation ratio	0.029
3	A	مساحت Area	0.188
4	L_b	طول حوضه Basin length	0.076
5	P	محیط حوضه Basin perimeter	0.058
6	F_f	فاکتور شکل Form factor	0.124
7	D_d	تراکم زهکشی Drainage density	0.034
8	R_c	نسبت گردی Circularity ratio	0.090
9	R_e	نسبت کشیدگی Elongation ratio	0.052
10	T_r	نسبت بافت Texture ratio	0.020
11	F_s	فراوانی آبراهه Stream frequency	0.034
12	B_s	شاخص شکل Shape index	0.154
13	C	ثابت نگه داشت Constant of channel maintenance	0.017
14	Bh	برجستگی حوضه Basin relief	0.012
15	R_r	نسبت برجستگی Relief ratio	0.008
16	R_n	عدد برجستگی Ruggedness number	0.010

نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) نشان می‌دهد که از بین شاخص‌های موردمطالعه شاخص مساحت بیشترین وزن را در سیل‌خیزی حوضه دارد و شاخص نسبت برجستگی کمترین وزن را دارا می‌باشد. پس از تعیین امتیاز هر شاخص و تهیه لایه‌های شاخص‌ها با ضرب هر لایه در وزن آن و تلفیق لایه‌ها نقشه پهنه‌بندی حوضه‌ها به دست آمد و درنهایت حوضه‌ها در ۵ طبقه طبقه‌بندی گردید (جدول ۴). نتایج نشان داد که دو حوضه K01 و K16 که در طبقه خیلی زیاد قرار دارند، ۲۴/۳ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود و پنج زیرحوضه K05، K06، K11، K18 و K19 که در طبقه زیاد قرار دارند، ۲۹/۳ درصد مساحت حوضه را در بر می‌گیرند؛ بنابراین ۵۳/۶ درصد حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۴- امتیاز AHP با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 4- AHP score with different priority classes

شماره طبقه Class number	امتیاز اولویت Priority score	طبقه اولویت Priority class	نام حوضه Subbasin	درصد مساحت Area percent
1	124.93 – 93.68	خیلی کم	K02,K03,K07,K12	9.2
2	151.37 – 124.93	کم	K09,K13,K14,K20	12.4
3	206.65 – 151.37	متوسط	K04,K08,K10,K15,K17	24.8
4	247.51 – 206.65	زیاد	K05.K06,K11,K18,K19	29.3
5	706.60 – 247.51	خیلی زیاد	K01,K16	24.3

بر اساس نتایج تلفیق لایه‌ها در روش تحلیل شبکه (ANP) نیز حوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شدند (جدول ۵). بر اساس تحلیل‌های این روش دو حوضه K01 و K16 در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد قرار دارند که حدود ۲۴/۳ درصد مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند و پنج زیرحوضه K05، K06، K11، K18، K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار گرفته که ۲۵/۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. به‌طور کلی ۵۰ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۵- امتیاز ANP با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 5- ANP score with different priority classes

شماره طبقه Class number	امتیاز اولویت Priority score	طبقه اولویت Priority class	نام حوضه Subbasin	درصد مساحت Area percent
1	124.03 – 150.91	خیلی کم	K03,K07,K12,K14	9.9
2	150.91 – 186.73	کم	K02,K17, K20	12.3
3	186.73 – 206.47	متوسط	K05,K09,K10,K13,K18,K19	27.8
4	206.47 – 229.76	زیاد	K04.K06,K11,K08,K15	25.7
5	229.76 – 580.99	خیلی زیاد	K01,K16	24.3

بررسی نتایج روش تاپسیس شرایط متفاوتی با دو مدل AHP و ANP دارد. در این روش نیز زیرحوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند (جدول ۶). بر این اساس تنها یک زیرحوضه یعنی زیرحوضه K16 در طبقه خیلی‌زیاد قرار گرفته که ۱۷/۴ درصد مساحت حوضه را دربر می‌گیرد. پنج زیرحوضه K01، K05، K15، K18 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار دارند که حدود ۳۰/۲ درصد از مساحت حوضه را در بر می‌گیرند بر اساس این روش، کمتر از ۵۰ درصد حوضه در شرایط سیلاب خیلی زیاد و زیاد قرار دارد.

جدول ۶- امتیاز TOPSIS با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 6- TOPSIS score with different priority classes

شماره طبقه Class number	امتیاز اولویت Priority score	طبقه اولویت Priority class	نام حوضه Subbasin	درصد مساحت Area percent
1	0.239 – 0.2580	خیلی کم	K02,K03,K06,	9.1
2	0.258001 – 0.2930	کم	K09,K10,K12,K13	12.2
3	0.293001 –0.33200	متوسط	K04,K07,K08,K11,K14,K17,K20	30.3
4	0.332001 – 0.43300	زیاد	K01,K05,K15,K18,K19	30.3
5	0.433001 – 0.80100	خیلی زیاد	K16	18.4

براساس نتایج روش ویکور (جدول ۷) نیز حوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی طبقه‌بندی شدند. در این روش چهار زیرحوضه K05، K11، K16 و K20 در طبقه خیلی زیاد قرار گرفتند و پنج زیر حوضه K04، K06،

K15، K18 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار گرفتند. بر این اساس ۳۶/۱ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و ۲۵/۰۳ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار می‌گیرد؛ بنابراین حدود ۶۲ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۷- امتیاز ویکور با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 7- Vikor score with different priority classes

درصد مساحت Area percent	نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
9.64	K02,K03,K07,K10	خیلی کم	0.852 – 0.983	1
17.74	K09,K12,K13,K14,K17	کم	0.623 – 0.852	2
11.49	K01,K08	متوسط	0.578 – 0.623	3
25.03	K04.K06,K15,K18,K19	زیاد	0.448 – 0.578	4
36.1	K05,K11,K16,K20	خیلی زیاد	0.258 – 0.448	5

نتایج روش الکتره نشان می‌دهد (جدول ۸) که سه زیرحوضه K15، K16 و K18 طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و چهار زیرحوضه K01، K05، K11 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار دارند. بر این اساس ۲۸/۵۵ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و حدود ۲۲/۱۹ درصد از محدوده در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار دارند.

جدول ۸- امتیاز الکتره با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 8- Electere score with different priority classes

نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
18.12	K02,K03,K06,K07,K113,K14	خیلی کم	1
14.43	K09,K10,K12, K17	کم	2
16.71	K04,K08,K20	متوسط	3
22.19	K01.K05,K11,K19	زیاد	4
28.55	K15,K16,K18	خیلی زیاد	5

۳-۵ - اعتبار سنجی روش‌ها

نتایج حاصل از بررسی درصد تغییرات در جدول (۹) نشان می‌دهد کمترین تغییرات مربوط به روش ANP است که برابر با ۲۵ درصد می‌باشد و بیشترین درصد تغییرات مربوط به روش AHP است.

جدول ۹- درصد تغییرات رتبه زیرحوضه‌ها در روش‌های مختلف

Table 9- The percentage of changes in the rank of sub-basins in different methods

میانگین درصد تغییرات Mean of percentage change	ELECTRE	VIKOR	TOPSIS	ANP	AHP	روش Method
41	50	55	55	45	0	AHP
25	30	35	15	0	45	ANP
37	65	50	0	15	55	TOPSIS
37	45	0	50	35	55	VIKOR
38	0	45	65	30	50	ELECTRE

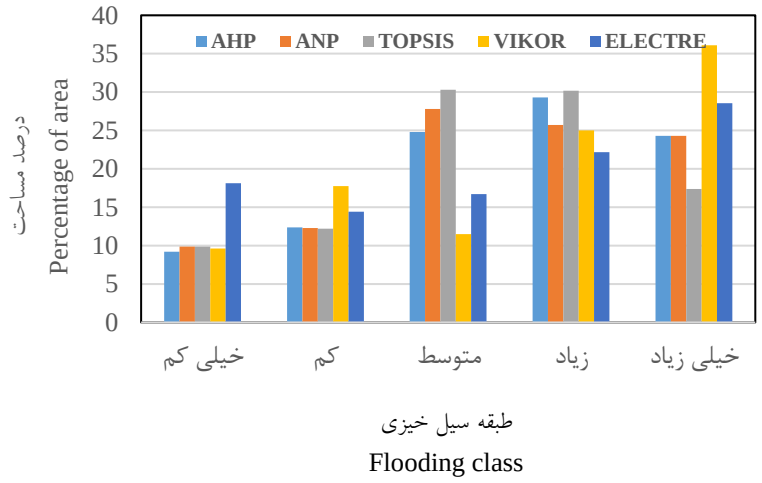
نتایج مقایسه نقاط وقوع سیلاب با نتایج مدل‌ها، نشان می‌دهد که روش ANP دارای بیشترین همبستگی با نقاط مشاهداتی در زیرحوضه‌ها دارد (۰/۸۳۸) و پس از آن روش AHP (۰/۶۷۱) بیشترین همبستگی را دارد و روش ELECTRE دارای کمترین همبستگی است (۰/۱۸۲)(جدول ۱۰). بر این اساس اخلاف معنی‌داری بین روش ANP، AHP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌هایی مانند ANP در بین سایر روش‌های مورداستفاده برای تحلیل وضعیت سیل‌خیزی حوضه با استفاده از شاخص‌های مورفومتری دارای نتایج بهتری است. این امر با نتایج د بریتو و همکاران (De Brito et al., 2018) که از تکنیک‌های چند معیاره برای نقشه‌برداری و ارزیابی خطر سیل در برزیل استفاده کردند هم‌خوانی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که ANP به دلیل وابستگی بین معیارها، قدرت پیش‌بینی بالاتری نسبت به AHP و روش‌های دیگر دارد.

جدول ۱۰- نتایج همبستگی بین نقاط سیل ثبت شده و نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

Table 10- Correlation results between recorded flood points and the results of multi-criteria decision making methods

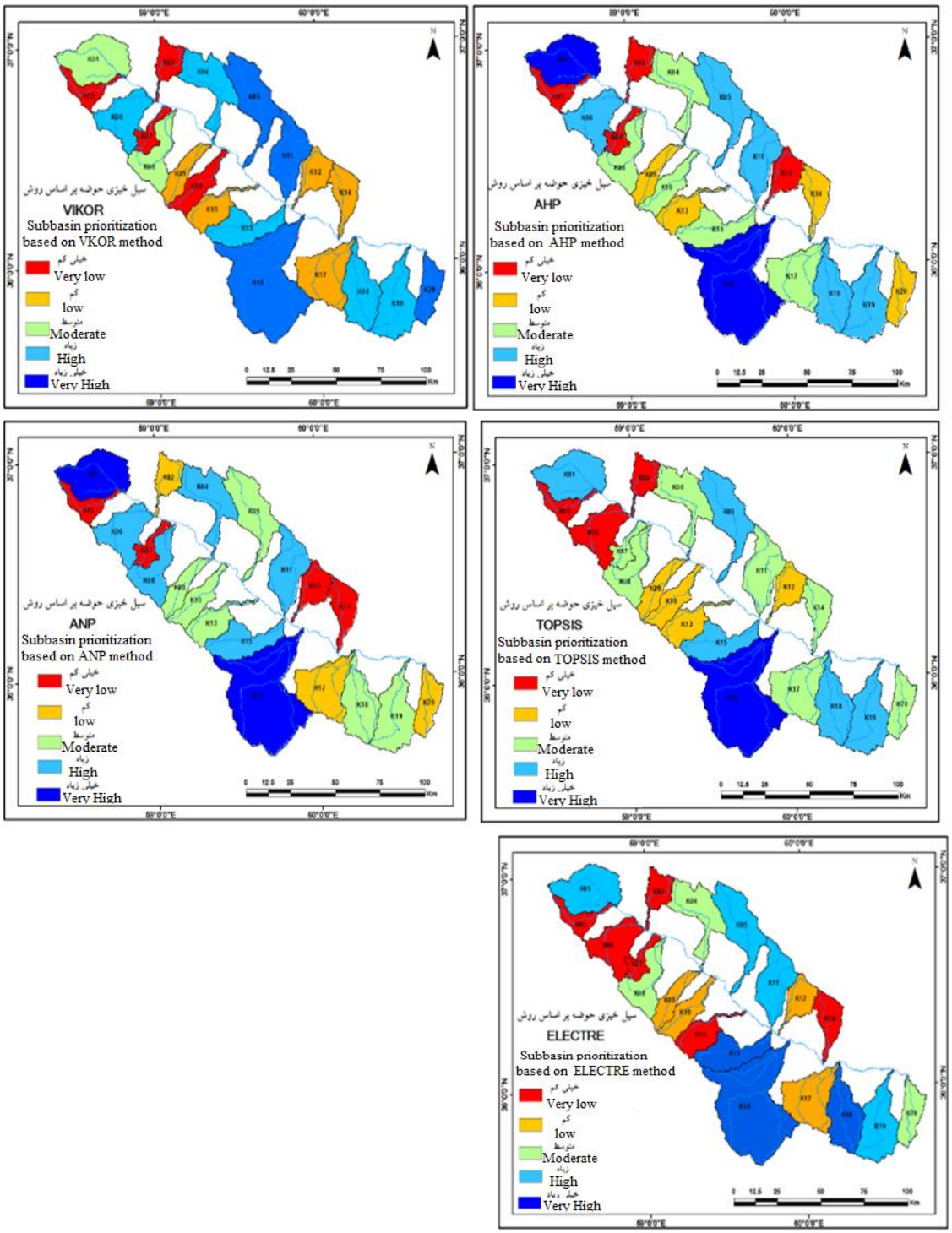
ELECTRE	VIKOR	TOPSIS	AHP	ANP		
0.182	0.569**	0.303	0.671**.	838**	همبستگی اسپیرمن Speirman correlation	سیل‌های ثبت شده Recorded floods
0.443	0.009	0.194	0.001	0.000	سطح معناداری Significant level	
20	20	20	20	20	تعداد Number of data	

.**معنی‌دار در سطح ۱ درصد .*معنی‌دار در سطح ۵ درصد



شکل ۵- درصد مساحت طبقه‌های سیل‌خیزی در هر یک از روش‌های موردمطالعه

Fig.5. The percentage of the flood class area in each of the studied methods



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

Fig.6. Zoning map of sub-basins based on each of the multi-criteria decision making methods

۴-نتیجه‌گیری

ازآنجایی‌که نمی‌توان از مخاطرات طبیعی پیچیده ناشی از سیل به‌طور کامل پیش‌گیری کرد، مهم‌ترین اقداماتی که می‌توان اعمال کرد، اقدامات کاهش اثرات مخرب آن است. تهیه نقشه سیل‌خیزی مرحله‌ای کلیدی در مدل‌سازی سیل و ارزیابی ریسک آن است. با تهیه نقشه حساسیت به سیل، می‌توان مناطق مستعد سیل را شناسایی کرد و از اقدامات ساختاری و غیر سازه‌ای (بیولوژیکی) مناسب برای کاهش خسارات ناشی از سیل استفاده کرد. ازاین‌رو هدف این پژوهش مقایسه ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE در تعیین سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های‌آبخیز کشف رود در استان خراسان رضوی با استفاده از پارامترهای مورفومتریک بود و درنهایت نتایج مدل‌ها با نقاط سیلاب‌های مشاهداتی در حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت با استفاده از شاخص درصد تغییرات و نقاط سیل ثبت شده در منطقه، روش‌های استفاده شده برای طبقه‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. نتایج اعتبار سنجی نشان داد روش تحلیل شبکه (ANP) در بررسی نقاط سیل‌خیز و نتایج روش‌ها، بیشترین همبستگی را با نتایج سایر روش‌ها دارد و اختلاف معنی‌داری بین روش ANP، AHP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. در بررسی درصد تغییرات نیز مشخص گردید که کمترین درصد تغییرات مربوط به روش تحلیل شبکه (ANP) است.

نقشه‌های سیل‌خیزی به دست آمده در این پژوهش بر مبنای تعداد محدودی پارامتر مورفومتریک انجام شده است که می‌تواند روی نتایج تحقیق تأثیرگذار باشد؛ ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی تعداد بیشتری از پارامترهای مورفومتریک استفاده شود. همچنین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با انتخاب طیف گسترده‌ای از روش‌ها و روابط همراه است که این انتخاب می‌تواند در نتایج نهایی تأثیرگذار باشد؛ بنابراین بهتر است محققان به این موضوع نیز بپردازند و درنهایت پیشنهاد می‌شود سایر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز در تحقیقات بعدی موردتوجه قرار گیرد.

References

Aher, P. D., Adinarayana, J., & Gorantiwar, S. D. (2014). Quantification of morphometric characterization and prioritization for management planning in semi-arid tropics of India: a remote sensing and GIS approach. *Journal of Hydrology*, *511*, 850-860. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.028

Ahmed, N., Hoque, M. A. A., Howlader, N., & Pradhan, B. (2022). Flood risk assessment: role of mitigation capacity in spatial flood risk mapping. *Geocarto International*, *37*(25), 8394-8416. https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2002422

Akay, H., & Baduna Koçyiğit, M. (2020). Flash flood potential prioritization of sub-basins in an ungauged basin in Turkey using traditional multi-criteria decision-making methods. *Soft Computing*, *24*, 14251-14263. https://doi.org/10.1007/s00500-020-04792-0

Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, *575*, 295-307. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047

Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, *75*, 1243. https://doi.org/10.1007/s12665-016-6038-y

Aouragh, M. H., & Essahlaoui, A. (2018). A TOPSIS approach-based morphometric analysis for sub-watersheds prioritization of high Oum Er-Rbia basin, Morocco. *Spatial Information Research*, *26*, 187-202. https://doi.org/10.1007/s41324-018-0169-z

Arab Ameri, A., Pour Ghasemi, H. R., Rezaei, K., & Sohrabi, M. (2019). Morphometric prioritization of watersheds for optimal water and soil resources management. Iranian Jouranl of Watershed Management Science, 13(45),87-96. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.45.11.5

Bhat, M. S., Alam, A., Ahmad, S., Farooq, H., & Ahmad, B. (2019). Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. *Environmental Earth Sciences*, *78*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8046-1

Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., & Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *12*, 35-47. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.001

Chandrashekar, H., Lokesh, K. V., Sameena, M., & Ranganna, G. (2015). GIS–based morphometric analysis of two reservoir catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. *Aquatic Procedia*, *4*, 1345-1353. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.175

Chaulagain, D., Rimal, P. R., Ngando, S. N., Nsafon, B. E. K., Suh, D., & Huh, J. S. (2023). Flood susceptibility mapping of Kathmandu metropolitan city using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators*, *154*, 110653. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110653

Chorley, R. J., Malm, D. E. G., & Pogorzelski, H. A. (1957). A New Standard for Estimating Drainage Basin Shape. *American Journal Science*, *255*, 138-141. https://doi.org/10.2475/ajs.255.2.138

Christopher, O., Idowu, A., & Olugbenga, A. (2010). Hydrological analysis of Onitsha North East drainage Basin using geoinformatic techniques. *World Applied Sciences Journal*, *11*(10), 1297-1302.

De Brito, M. M., Evers, M., & Almoradie, A. D. S. (2018). Participatory flood vulnerability assessment: a multi-criteria approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(1), 373-390. https://doi.org/10.5194/hess-22-373-2018

Dehghan, P., Hosseinpour Moghadam, M., Lashkaripour, G., & Ghafouri, M. (2012). *Investigating the geomorphological forms of the Kashf River watershed in northeastern Iran.* Paper presented of the 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment papers, Ferdowsi University of Mashhad, 1659-1666. [In Persian] https://civilica.com/doc/233175

Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., Yunus, A. P., Song, X., Xu, Y., & Zhu, Z. (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. *Natural Hazards*, *78*, 1749-1776. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1799-2

Ganjirad, M., & Delavar, M. R. (2023). Flood risk mapping using random forest and support vector machine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *10*, 201-208. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-201-2023

Ghorbanzade, M., Azarakhshi, M., Mosaedi, A., & Rostami Khalaj, M. (2017). Evaluation of the efficiency of Analytic Hierarchy Process (AHP) to specify the areas with urban flood risk potential, case study: the central part of Torbat Heydarieh. *Physical Geography Research*, *49*(4), 645-656. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.231371.1007037

Hamdan, A. M. (2020). Hydro-morphometric analysis using geospatial technology: A case study of Wadi Gabgaba and Wadi Allaqi watersheds, southern Egypt-northern Sudan. *Journal of Asian Scientific Research*, *10*(3), 190. https://doi.org/10.18488/journal.2.2020.103.190.212

Hejazi, A., Andariani, S., Almaspour, F., & Mokhtari Asl, A. (2015). Using Multi Criteria Decision Making and Remote Sensing Techniques in GIS Environment for Flood Susceptible Zones Assessment in Lighvan Chai Catchment. *Hydrogeomorphology*, *2*(3), 61-80. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.3.4.5

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, *56*(3), 275-370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

Hosseinzadeh, M. M., Salehi Milani, A. R., & Rezaian Zarandini, F. (2023). Zoning of the sensitivity of the sub-basins of Nekarood basin to flooding, Neka-Mazandaran. *Hydrogeomorphology*, *10*(34), 100-75. [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2023.52132.1646

Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., ... & Prakash, I. (2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. *Journal of Hydrology*, *573*, 311-323. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073

Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2016). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, *8*(1), 37. https://doi.org/10.3390/su8010037

Mir Ghafouri, H., Asadian Ardakani, F., & Azizi, F. (2013). *Multi-indicator decision making methods (along with the introduction of application software)*.Tehran: Academic Jihad Publications. [In Persian]

Moghimi, A., Mousavi Harami, S. R., Moatamed, A. & Ahmadi, H. (2010). The study of the effect of morph metric variables on maximum debi of flood in Chalus drainge basin using statistical methods and mathematical models. *Journal of Earth and Resources*, *2*(1), 65-80. [In Persian]

Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *21*, 100445. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, *178*(2), 514-529. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020

Parvaresh, E., Mahdavi, R., Malekian, A., Esmaeilipoor, Y., & Holisaz, A. (2018). Prioritizing of effective factors in flooding potential using Electre IIIMethod and Flood Flow Coefficient (Case study: Sarkhoon Subwatersheds of Bandarabbas). *Journal of Arid Biome*, *8*(1), 75-87. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008790.1397.8.1.7.4

Rahaman, S. A., Ajeez, S. A., Aruchamy, S., & Jegankumar, R. (2015). Prioritization of sub watershed based on morphometric characteristics using fuzzy analytical hierarchy process and geographical information system–A study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, *4*, 1322-1330. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.172

Rahimpour, T., Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, S., & Valizadeh Kamran, K. (2023). Analysis of hydrogeomorphic characteristics of sub-basins in terms of erosion sensitivity (Case study: Aland Chai basin, northwest of Iran). *Researches in Earth Sciences*, *14*(3), 112-131. [In Persian] https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103507

Razavizadeh, S., & Shahedi, K. (2015). Combination of AHP and TOPSIS methods to prioritize of flooding in Taleghan sub watersheds. *Natural Ecosystems of Iran*, *7*(4), 33-46. [In Persian] https://sanad.iau.ir/fa/Journal/nei/Article/983174

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process* (Vol. 282). Berlin, Germany: Springer Science+ Business Media, LLC. https://doi.org/10.1007/0-387-33987-6

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, *67*(5), 597-646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

Sharifi kia, M., Shayan, S., Yamani, M., & Arab Ameri, A. (2018). Classification of Necarod watershed sub-basins using multi-criteria decision-making models, TOPSIS, SAW and VIKOR. Ecohydrology, 5(1), 69-83. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ije.2017.231263.550

Sharifi, F. (2002). *Study of flood prevention, containment and control in Golestan Province with watershed management operations and restoration of forests and pastures*.Paper presented of

the first Seminar on mitigate and prevent flooding. [In Persian] https://civilica.com/doc/115846/

Smith, K. (1950). Standards for Grading Textures of Erosional Topography. *American Journal of Science*, *248*, 655-668. http://dx.doi.org/10.2475/ajs.248.9.655

Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, *504*, 69-79. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034

Teimouri, M., & Alvandi, E. (2022). Comparison of Models TOPSIS, SAW, ELECTRE and VIKOR in order to the prioritization of sedimentation and flood hazard of watersheds. *Journal of Environmental Science and Technology*, *24*(2), 79- 99. [In Persian] https://doi.org/10.30495/jest.2022.45404.4731

Zare, H., & Zamzam, F. (2022). *Multi-criteria decision making, methods and applications*. Yazd: Yazd University Press. [In Persian]

Zzaman, R. U., Nowreen, S., Billah, M., & Islam, A. S. (2021). Flood hazard mapping of Sangu River basin in Bangladesh using multi-criteria analysis of hydro-geomorphological factors. *Journal of Flood Risk Management*, *14*(3), e12715. https://doi.org/10.1111/jfr3.12715

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.197-221 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464 Open access

Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia

Pouya Allahverdipour [a], Mohammad Taghi Sattari[b*]

[a] *Ph.D Student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.*
[b] *Associate Professor in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.*

Received: 1 February 2024 ***Revised: 16 June 2024*** ***Accepted: 24 June 2024***

Extended Abstract

Introduction

Using wind and converting it into a source of energy has been practiced in many countries since ancient times. On the other hand, weather is the cause of many natural disasters and accidents, and no part of the planet is immune to atmospheric hazards. Strong and intense winds, known as storms, cause significant damage to human living environments every year. Approximately 90% of the world's natural disasters are related to climatic factors. After floods, which account for approximately 35% of these disasters, storms are responsible for about 30% of the damage caused by natural disasters. The level of risk and damage caused by strong winds and storms depends on their direction, intensity, and the geographical location of the region. Considering the importance of wind in terms of its risks and potential, the study of this phenomenon has drawn the attention of researchers worldwide. Due to its arid and semi-arid climate, Iran experiences the negative effects and consequences of wind more than its benefits. East Azarbaijan Province, located east of Lake Urmia**,** is one of the windy regions of the country. Due to its proximity to the salt bed formed by the drying up of Lake Urmia**,** the province faces significant environmental and health hazards. By studying the speed and direction of strong winds in this region, management plans can be developed, vulnerability thresholds for structures determined**,** and resistant designs implemented to reduce resulting damages. The purpose of this

* .Corresponding author: Mohammad Taghi Sattari Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir Tel:+9809144015802

How to cite this Article: Allahverdipour, P., & Sattari, M.T. (2024). Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 197-221.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

research is to investigate the speed and direction of maximum wind and its changes while identifying vulnerable and windy areas east of Lake Urmia.

Material and Methods

This research investigated the speed, changes, and direction of maximum wind at 16 synoptic stations located east of Lake Urmia during the period of 1394–1401. The non-parametric Mann-Kendall trend test and Sen's slope estimator were used to determine the trend of wind speed changes. Wind Rose diagrams were used **t**o analyze the prevailing wind direction. All calculations related to data preparation and tests for checking the trend of maximum wind speed were performed using XLSTAT software**,** and WRPLOT software was used to generate wind diagrams.

Results and Discussion

According to the results of the non-parametric Mann-Kendall test and Sen's slope estimator**,** among the 16 stations investigated in the east of Lake Urmia, significant increasing trends in maximum wind speed changes were observed only at Shabestar and Sahand stations, with Sen's slopes of +0.089 and +0.070, respectively**.** A significant decreasing trend was observed at Tabriz, Malekan, and Maragheh stations, with Sen's slopes of -0.058, -0.037, and -0.092, respectively**.** No trend in maximum wind speed changes was observed at Kalibar, Mianeh, Jolfa, Bostanabad, Bonab, and Sarab stations. Based on the Wind Rose diagrams**,** the prevailing wind direction at most stations is from the west and southwest**,** which could potentially increase respiratory diseases in the future due to salt storms originating from the dry bed of Lake Urmia affecting the eastern provinces. This pattern is likely related to the pressure gradient influenced by topography, the presence of Sahand mountain heights in the region, surface friction based on geographical characteristics, land use, and urban structures.

At specific stations, the prevailing wind direction was observed as follows: Bonab and Sarab from the west**;** Ahar, Charoimaq, Mianeh, Tabriz, and Varzeqan from the southwest; Bostanabad, Heris, Malekan, Marand, and Shabestar from the south; Jolfa and Kalibar from the northwest; Maragheh from the east; and Sahand from the west and southwest**.** The frequency of strong winds was high across all stations, with more than 50% of maximum winds exceeding 11.11 m/s.

Conclusion

The results of this research revealed that the maximum wind speed in the east of Lake Urmia was recorded at Varzeqan and Marand stations, while the lowest values were recorded at Kalibar and Jolfa stations. According to the Mann-Kendall trend test and Sen's slope estimator**,** changes in maximum wind speed at most synoptic stations showed either no trend or a decreasing trend**,** with significant increasing trends observed only at Shabestar and Sahand stations. Significant decreasing trends were observed at Tabriz, Malekan, and Maragheh stations. The prevailing wind direction at most stations was found to be from the west and southwest**.** These findings should be considered in structural design, including the orientation of buildings, power plants, and wind turbines**.**

Additionally, they are critical for agricultural planning, such as rain irrigation system design.

The high frequency of strong winds across all synoptic stations underscores the vulnerability of this area to strong winds and storms, highlighting the importance of structural resilience. However, from an energy perspective, the region holds significant potential for wind power generation. Given the necessity of reducing dependence on fossil fuels due to their negative environmental impacts, including climate change, decreased precipitation, rising temperatures, and reduced water resources, utilizing wind power as a clean energy source becomes essential.

One limitation of this research was its focus on the eastern part of Lake Urmia. A broader study encompassing the entire Lake Urmia basin in all directions would provide a more comprehensive understanding of wind speed and direction changes under conditions of Lake Urmia's drying and the expansion of the salt bed. This would enable more precise land-use planning and management strategies for the coming years.

Keywords: Wind Speed and Direction Analysis, Mann-Kendall and Sen's Slope Index, Atmospheric Hazards, Environmental Impacts, Urmia Lake, Wind Power Potential .

How to cite this Article: Allahverdipour, P., & Sattari, M.T. (2024). Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 197-221.


©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۲۲۱-۱۹۷

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464 دسترسی آزاد

بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

پویا اللهویردی پور - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدتقی ستاری[۱] - دانشیار مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۲/۱۲ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۲۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۴/۴

چکیده

با توجه به اهمیت باد از دیدگاه مخاطرات و پتانسیل‌های آن، بررسی این موضوع موردتوجه محققان کشورهای مختلف است. استان آذربایجان‌شرقی در شرق دریاچه ارومیه و یکی از مناطق بادخیز کشور قرار دارد و به علت هم‌جواری با بستر نمکی حاصل از خشک‌شدن دریاچه ارومیه، در معرض مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی است. در این تحقیق سرعت، روند تغییرات و جهت باد بیشینه ۱۶ ایستگاه همدیدی واقع در شرق دریاچه ارومیه در دوره ۱۴۰۱-۱۳۹۴ بررسی شد. برای تعیین روند تغییرات سرعت باد از آزمون ناپارامتری من- کندال و تخمین‌گر شیب سن و برای بررسی جهت باد از نمودار گلباد استفاده شد. مطابق نتایج، تغییرات سرعت باد بیشینه فقط در دو ایستگاه شبستر و سهند به ترتیب با شیب ۰/۰۸۹+ و ۰/۰۷۰+ روند افزایشی معنی‌دار و در ایستگاه‌های تبریز، ملکان و مراغه به ترتیب با شیب ۰/۰۵۸، ۰/۰۳۷- و ۰/۰۹۲- روند کاهشی معنی‌دار داشت و در ایستگاه‌های کلیبر، میانه، جلفا، بستان‌آباد، بناب و سراب بدون روند بود. مطابق نمودارهای گلباد، در اکثر ایستگاه‌ها جهت باد غالب از سمت غرب و جنوب‌غربی است که این موضوع می‌تواند در آینده موجب افزایش بیماری‌های تنفسی در اثر طوفان‌های نمکی برخاسته از بستر خشک دریاچه ارومیه در استان‌های شرقی آن شود. به‌طورکلی علت این امر می‌تواند مرتبط با گرادیان فشار با توجه به توپوگرافی و وجود ارتفاعات کوه سهند در منطقه، اصطکاک سطحی با توجه به مشخصات جغرافیایی، کاربری اراضی و وجود ساختمان‌ها در مناطق شهری و دیگر عوامل جغرافیایی مرتبط با این مسئله باشد. فراوانی بادهای شدید در همه ایستگاه‌ها زیاد بوده و بیش از ۵۰٪ از بادهای بیشینه در همه ایستگاه‌ها سرعتی بیش از ۱۱/۱۱ m/s دارند. اگرچه نتایج این تحقیق لزوم توجه به آسیب‌پذیری مناطق شرقی دریاچه ارومیه از نظر مخاطرات محیطی را نشان می‌دهد، ولی از دیدگاه انرژی، نشانگر پتانسیل مناسب این منطقه برای تولید انرژی بادی است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل سرعت و جهت باد، شاخص من-کندال و شیب سن، مخاطرات جوی، تاثیرات محیطی، دریاچه ارومیه، تانسیل انرژی باد.

[۱] نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۰۱۵۸۰۲

Email:mtsattar@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از باد و تبدیل آن به انرژی و منبع نیرو از گذشته‌های بسیار دور در بسیاری از کشورهای دنیا ازجمله ایران، مصر، چین و ایتالیا با اهداف مختلف مثل انتقال آب جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی و آسیاب انجام شده است. آمار مربوط به اوایل قرن حاکی از آن است که بیش از ۸۳ درصد از تولید انرژی از نیروی باد، فقط در پنج کشور شامل آلمان، آمریکا، دانمارک، هند و اسپانیا انجام می‌یابد. بسیاری از کشورهای دیگر نیز در حال حرکت به سمت استفاده از این انرژی می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ حدود ٪۸۰ از انرژی الکتریکی جهان در مقایسه با ٪۲۶/۲ فعلی از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود (Hafner, Tagliapietra & de Strasser, 2018). از طرف دیگر علت بسیاری از خطرات طبیعی و حوادث ناگوار، آب‌وهوا است. هیچ نقطه از کره زمین نسبت به مخاطرات جوی مصون نیست (Mofidi & Kamali, 2012). بادهای قوی و شدید که به‌عنوان طوفان شناخته می‌شوند، همه‌ساله خسارت‌های بسیار زیادی بر محیط زندگی انسان‌ها وارد می‌کنند. حدود ٪۹۰ از بلایای طبیعی در دنیا در ارتباط با عوامل اقلیمی است و بعد از سیل با حدود ٪۳۵، طوفان با حدود ٪۳۰ بیشترین میزان آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی را شامل می‌شود. میزان خطرات و آسیب‌های ناشی از بادهای شدید و طوفان‌ها به جهت وزش و شدت آن‌ها و همچنین موقعیت جغرافیایی منطقه بستگی دارد. به دلیل قرارگرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، آثار و پیامدهای ناگوار باد بسیار بیشتر از فواید آن است. یکی از عوامل تلفات شدید آب به‌خصوص در بخش کشاورزی، تبخیر – تعرق است که مسئله باد از مهم‌ترین تشدیدکننده‌های آن محسوب می‌شود. در شرایطی که سرعت باد روندی افزایشی داشته باشد، آسیب‌های آن بیشتر نیز خواهد شد (Raeispoor, Beykrezaei & Tavoosi, 2013).

در زمینه بررسی باد تحقیقات بسیاری توسط پژوهشگران در ایران و سراسر دنیا از دیدگاه‌های مختلف انجام یافته است. ینگ و همکاران (Ying, Yong & Zongci , 2013) به بررسی تندبادهای چین در دوره ۲۰۰۴-۱۹۵۶ پرداخته و نشان دادند که روند رخداد تندبادهای سالانه و فصلی در این کشور، به‌ویژه در فصل بهار کاهشی است. بیلر و همکاران (Bilir, Imir, Devrim & Albostan, 2015) با بررسی توزیع سرعت باد فصلی و سالانه در ترکیه با استفاده از داده‌های سرعت باد از ژوئن ۲۰۱۲ تا ژوئن ۲۰۱۳ نتیجه گرفتند که جهت باد غالب جنوب‌شرقی و بیشترین مقدار انرژی باد مربوط به فصل زمستان و کمترین مقدار آن مربوط به فصل پاییز است. همچنین این منطقه از قدرت باد قابل‌توجهی برخوردار بوده و استفاده از توربین‌های بادی در مقیاس کوچک را پیشنهاد دادند. کلینک (Klink, 2015) در تحقیقی در منطقه ساحلی کشور امریکا، روند بادهای با سرعت بیش از ۲ m/s و الگوی فصلی بادهای مذکور را شناسایی و طبقه‌بندی کرد. حنفی و ایران پور (Hanafi & Iranpour, 2017) با تحلیل سرعت باد ایران با استفاده از داده‌های جهت و سرعت باد

۱۴۵ ایستگاه همدیدی در یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۹۱) نشان دادند که بسیاری از نواحی ایران دارای پتانسیل مناسب استفاده از انرژی بادی برای تولید انرژی الکتریکی است. ایشان منطقه منجیل و زابل را به‌عنوان بهترین مناطق از این نظر معرفی کردند. دباغیان و همکاران (Dabbaghiyan, Fazelpour, Abnavi & Rosen, 2016) با بررسی انرژی باد در استان بوشهر با استفاده از داده‌های سرعت باد چهار منطقه بوشهر، عسلویه، بردخون و دلوار در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که منطقه بردخون نسبت به مناطق دیگر از پتانسیل بیشتری برای استفاده از انرژی بادی برخوردار است.عساکره و همکاران (Asakereh, Beyranvand & Doustkamian, 2019) با ارزیابی انرژی باد در ایستگاه همدیدی اردبیل در دوره ۱۳۸۷-۱۳۶۹، میانگین سرعت باد در این ایستگاه را برابر با ۷/۴ m/s و درصد وقوع باد آرام را برابر با ۴۳٪ تعیین کردند. همچنین باد غالب این ایستگاه از جهت شرق تعیین شد. آزورین مولینا و همکاران (Azorin-Molina et al., 2018) با بررسی روند تغییرات سرعت باد عربستان با استفاده از داده‌های ۱۹ ایستگاه همدیدی در دوره ۲۰۱۳-۱۹۷۸، کاهش معنی‌دار سرعت باد در مقیاس سالانه و فصل‌های زمستان و بهار را نتیجه گرفتند؛ اما در فصل تابستان و پاییز روند معنی‌داری وجود نداشت. قائدی (Ghaedi, 2019) با بررسی روند سرعت باد در ایران با استفاده از داده‌های ۹۶ ایستگاه همدیدی در دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۷-۱۹۸۸) و با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و برآوردگر شیب سن نتیجه گرفت که با وجود عدم مشاهده الگوی زمانی و مکانی مشخص در روند سرعت باد کل ایران، به‌طورکلی ۴۳٪ از ایستگاه‌های همدیدی ایران دارای روند مثبت در سرعت باد هستند. همچنین در ۹/۳٪ از کل پهنهٔ کشور سرعت باد دارای روند منفی است. محمود و همکاران (Mahmood, Resen & Khamees, 2020) با تحلیل سرعت باد در ایستگاه همدیدی السلمان در کشور عراق نشان دادند که حدود ۵۰٪ سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری، بیش از ۵ m/s بوده است. همچنین این منطقه دارای پتانسیل برای احداث توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق است. مولایی و لشکری (Molaei & Lashkari, 2020) با بررسی روند تغییرات سرعت باد در مرکز ایران با استفاده از داده‌های هفت ایستگاه همدیدی در دورهٔ ۲۰۱۷-۱۹۸۰ و آزمون ناپارامتری من- کندال نشان دادند که متوسط سرعت باد در این منطقه ۳/۱۹ m/s بوده و بیشترین روند افزایشی و کاهشی سرعت باد به ترتیب در ماه‌های مارس و دسامبر است. مزیدی و بهاءالدین بیگی (Mazidi & Bahaaddinbeygi, 2021) با هدف مطالعه روند دمای متوسط، بارش و سرعت باد مناطق شمالی و غربی استان کرمان، از روش رگرسیون کمترین مربعات و آزمون ناپارامتری من- کندال و داده‌های ایستگاه‌های همدیدی انار، زرند، سیرجان و شهر بابک در دوره ۲۰ساله (۲۰۱۹-۱۹۹۹) استفاده کردند. نتایج آزمون من- کندال نشان داد که سرعت باد در تمامی ایستگاه‌ها دارای روند مثبت است. مطابق نتایج روش رگرسیونی نیز سرعت باد در ایستگاه‌های انار، زرند، سیرجان و کرمان دارای روند مثبت و در ایستگاه شهر بابک بدون روند است. دنگ و همکاران (Deng, Azorin-Molina, Minola, Zhang & Chen

2021) در مطالعه‌ای نشان دادند که در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۰ سرعت باد سطحی در نیمکره شمالی و جنوبی کره زمین به ترتیب روند کاهشی و افزایشی (معنی‌دار سطح ۰/۱) داشته است؛ اما در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۰ در نیمکره شمالی این روند افزایشی شده و در نیمکره جنوبی تمایل به روند کاهشی داشته است. در تحقیقی لیباندا و پائس (Libanda & Paeth, 2023) در کشور زامبیا در قاره آفریقا، نشان دادند که باد غالب این کشور از سمت جنوب‌شرقی بوده و سرعت میانگین آن ۲/۸ m/s است. همچنین در بیشتر نقاط این کشور افزایش معنی‌داری در سرعت باد مشاهده می‌شود. ستاری و اللهویردی پور (Sattari & Allahverdipour, 2024) با استفاده از روش‌های هوشمند درختی شامل جنگل تصادفی[1] (RF)، درخت اضافی[2] (ET) و مدل M5، سرعت باد ماهانه ایستگاه‌های همدید شرق دریاچه ارومیه را پیش‌بینی و تحلیل کردند که مدل RF به‌عنوان بهترین مدل معرفی شد. راهجا و همکاران (Raheja, Wadalkar, Chaudhuri & Pandit, 2024) روند سرعت باد سطحی مناطق شمال کشور هند را در دوره ۴۰ ساله اخیر (۲۰۲۰-۱۹۸۱) بررسی کرده و نشان دادند که از سال ۱۹۸۱ سرعت باد سطحی در این مناطق کاهش یافته است.

استان آذربایجان‌شرقی به‌عنوان یکی از استان‌های شمال‌غربی ایران در یکی از مناطق بادخیز کشور و در شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته است. خشک‌شدن دریاچه ارومیه باعث به‌وجود آمدن بستری از نمک در این منطقه شده که آنهم موجب به هم خوردن تعادل اکولوژیک و گسترش بیماری‌های گوارشی و تنفسی در استان‌های ساحلی شده است. در چنین شرایطی با مطالعه و شناخت سرعت و جهت بادهای شدید این منطقه، می‌توان نسبت به برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، تعیین آستانه آسیب‌پذیری سازه‌ها و طراحی سازه‌های مقاوم در آینده و کاهش خسارت‌های ناشی از آن اقدام کرد. با توجه به پیشینه تحقیق و با وجود اهمیت بررسی سرعت و جهت باد بیشینه چه از لحاظ مخاطرات محتمل و چه از لحاظ پتانسیل‌های آن در تولید انرژی بادی، تحقیقات بسیار کمی در این خصوص انجام شده است؛ بنابراین هدف این پژوهش بررسی سرعت، جهت باد بیشینه و روند تغییرات آن ازیک‌طرف و شناسایی مناطق مستعد و بادخیز در شرق دریاچه ارومیه است.

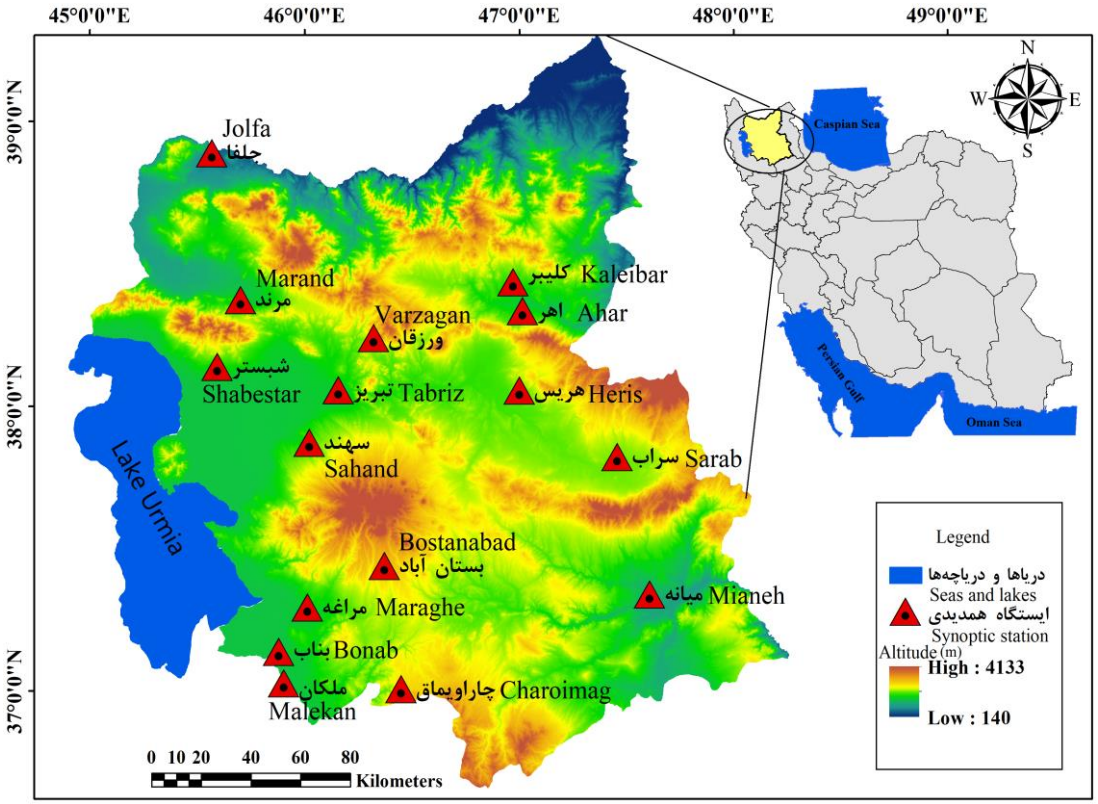
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

استان آذربایجان‌شرقی در شمال‌غربی ایران، در شرق دریاچه ارومیه و در موقعیت ۴۸-۴۵ درجه طول شرقی و ۳۹-۳۶ درجه عرض شمالی قرار گرفته است. بیشتر بخش‌های این استان در حوضه آبریز دریاچه

[1] Random Forest
[2] Extra Tree

ارومیه بوده و بخش‌هایی از شمال و شرق آن در حوضه آبریز دریای خزر واقع شده است. مطابق با طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم این استان نیمه‌خشک است ولی با توجه به تنوع توپوگرافی آن، از شمال تا جنوب و شرق تا غرب، شرایط آب‌وهوایی متفاوتی دارد (Allahverdipour, Ghorbani & Asadi, 2024). میانگین بارش سالانه آذربایجان‌شرقی حدود ۲۵۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی استان آذربایجان‌شرقی واقع در شرق دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی استان آذربایجان‌شرقی

Fig.1. Geographical location of the synoptic stations in East Azarbaijan province

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق با هدف بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در شرق دریاچه ارومیه، از داده‌های سرعت و جهت باد مربوط به ۱۶ ایستگاه همدیدی واقع در استان آذربایجان‌شرقی از فروردین ۱۳۹۴ تا اسفند ۱۴۰۱ استفاده شده است. لازمه هر تحقیق علمی که در آن از آمار و داده‌های اقلیمی استفاده می‌شود، صحت‌سنجی داده‌ها است. واضح است که بدون اطمینان از صحت و کیفیت داده‌ها، نمی‌توان از آن‌ها برای استخراج نتایج

قابل‌قبول استفاده کرد (Allahverdipour & Sattari, 2023). داده‌های مورداستفاده در این پژوهش قبل از انجام هرگونه محاسبات، موردبررسی آماری و صحت‌سنجی قرار گرفت و نسبت به تکمیل داده‌های گمشده و حذف داده‌های پرت اقدام شد. تمام محاسبات مربوط به آماده‌سازی داده‌ها و آزمون‌های بررسی روند سری سرعت باد بیشینه با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT انجام شده و برای رسم نمودارهای گلباد از نرم‌افزار WRPLOT استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات آماری داده‌های مربوط به هر یک از ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری سرعت باد بیشینه ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

Table 1- Statistical characteristics of the maximum wind speed related to the synoptic stations in the east of Lake Urmia

ایستگاه همدید Synoptic station	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع (متر) Altitude (m/s)	کمینه (متر بر ثانیه) Minimum (m/s)	بیشینه (متر بر ثانیه) Maximum (m/s)	میانگین (متر بر ثانیه) Mean (m/s)	انحراف معیار (متر بر ثانیه) Standard deviation (m/s)
جلفا Jolfa	45°38′	38°57′	680	2	28	17.05	4.94
کلیبر Kaleibar	47°02′	38°53′	1000	2	30	12.81	4.66
بناب Bonab	46°03′	37°19′	1260	4	22	13.08	3.35
اهر Ahar	47°03′	38°28′	1350	10	30	19.21	3.82
شبستر Shabestar	45°68′	38°18′	1350	3	26	14.86	4.70
ملکان Malekan	46°06′	37°08′	1350	4	22	13.22	3.50
چاراویماق Charoimag	46°59′	37°08′	1350	6	30	13.53	3.65
تبریز Tabriz	46°19′	38°05′	1370	6	23	15.23	3.42
مراغه Maraghe	46°15′	37°23′	1440	6	29	15.93	4.42
مرند Marand	45°77′	38°42′	1550	4	35	14.42	6.53
ورزقان Varzagan	46°93′	38°31′	1600	8	36	18.18	4.69
سهند Sahand	46°12′	37°93′	1641	5	33	20.26	6.21
سراب Sarab	47°31′	37°52′	1680	8	28	16.66	4.13

بستان‌آباد Bostanabad	46°49′	37°51′	1700	8	26	14.42	3.74
میانه Mianeh	47°25′	37°40′	1900	6	30	13.09	4.42
هریس Heris	47°07′	38°15′	1962	7	32	16.40	5.33

۲-۲-۱- تحلیل روند

هدف از بررسی روند تشخیص وجود و یا عدم وجود سیر صعودی یا نزولی یعنی افزایش یا کاهش در سری داده‌ها است. با توجه به اینکه در روش‌های پارامتری فرضیات اولیه‌ای مانند نرمال بودن، ایستایی و مستقل بودن متغیرها وجود دارد، روش ناپارامتری من- کندال در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژیکی کاربرد بیشتری دارد. همچنین روش‌های ناپارامتری نسبت به روش‌های پارامتری حساسیت کمتری به مقادیر حدی دارند و نیز آزمون ناپارامتری را می‌توان برای سری‌های زمانی، بدون در نظر گرفتن خطی یا غیرخطی بودن روند داده‌ها استفاده کرد (Ahmadi, Khalili, Behmanesh & Verdinazhad, 2013).

۲-۲-۱-۱- آزمون من- کندال

آزمون من- کندال که به‌عنوان یکی از آزمون‌های ناپارامتری بررسی روند سری داده‌ها شناخته می‌شود، ابتدا توسط من (Mann, 1945) ارائه شده و توسط کندبال (Kendall, 1948) توسعه و ارتقا یافت. روش محاسبه آماره آزمون من- کندال به‌شرح زیر است. با فرض اینکه تعداد داده‌های موجود سری زمانی مربوط به پارامتر موردنظر در دوره آماری موردبررسی n باشد، ابتدا آماره S طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k) \quad (۱)$$

در رابطه ۱ پارامترهای x_j و x_k به ترتیب مقدار داده j ام و k ام بوده و $sgn(\theta)$ تابع علامت است که به‌صورت رابطه ۲ تعریف شده است.

$$sgn(x) = \begin{cases} +1 & if\ (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & if\ (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & if\ (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۲)$$

واریانس آماره S که به‌صورت Var(s) نشان داده می‌شود، با استفاده از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{P} t_i(t_i-1)(2t_i-5)}{18} \quad (۳)$$

در رابطه ۳ پارامترهای t_i و P به ترتیب تعداد داده‌های دسته i ام و تعداد گروه‌های یکسان را نشان می‌دهند.

درنهایت آماره آزمون من- کندال (Z_S) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(s)}} & if\ S > 0 \\ 0 & if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(s)}} & if\ S < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

مقدار مثبت Z_S نشان‌دهنده روند صعودی (افزایشی) و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند نزولی (کاهشی) در داده‌ها است. سطح معنی‌داری این آزمون با فرض صفر (H_0) که به معنی عدم وجود روند در داده‌ها است، به شرط برقراری رابطه ۵ و در غیر این صورت با رد فرض H_0 و قبول فرض مقابل آن یعنی وجود روند معنی‌دار در سری داده‌ها تعیین می‌شود.

$$-Z_{1-\alpha/2} \leq Z \leq Z_{1-\alpha/2} \quad (۵)$$

در رابطه ۵ پارامتر α نشان‌دهنده سطح معنی‌داری این آزمون است (Mann1945; Kendall, 1948).

۲-۲-۱-۲- شیب خط تخمین‌گر سن

روش شیب تخمین‌گر سن که یک روش ناپارامتری برای تخمین میزان شیب روند در یک سری داده است، توسط سن(Sen, 1968) توسعه‌یافته و ارائه شده است. میزان شیب یک سری از داده‌ها در روش شیب سن، با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\beta = Median\left[\frac{X_j - X_i}{j-i}\right] \quad , (j > i) \quad (۶)$$

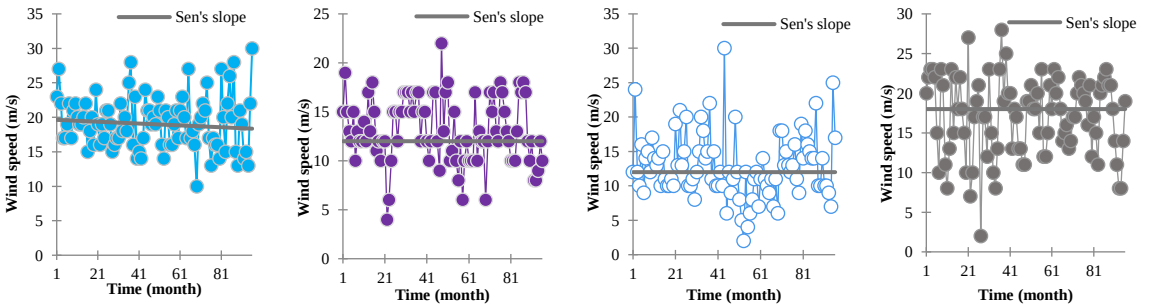
در رابطه ۶ پارامترهای X_i و X_j به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام و j ام سری داده‌ها بوده و پارامتر β نشان‌دهنده میزان شیب خط روند در سری داده‌ها است. مقدار مثبت β به معنی روند افزایشی (صعودی) و مقدار منفی آن به معنی روند کاهشی (نزولی) در سری داده‌های موردبررسی است (Sen, 1968).

۳- نتایج و بحث

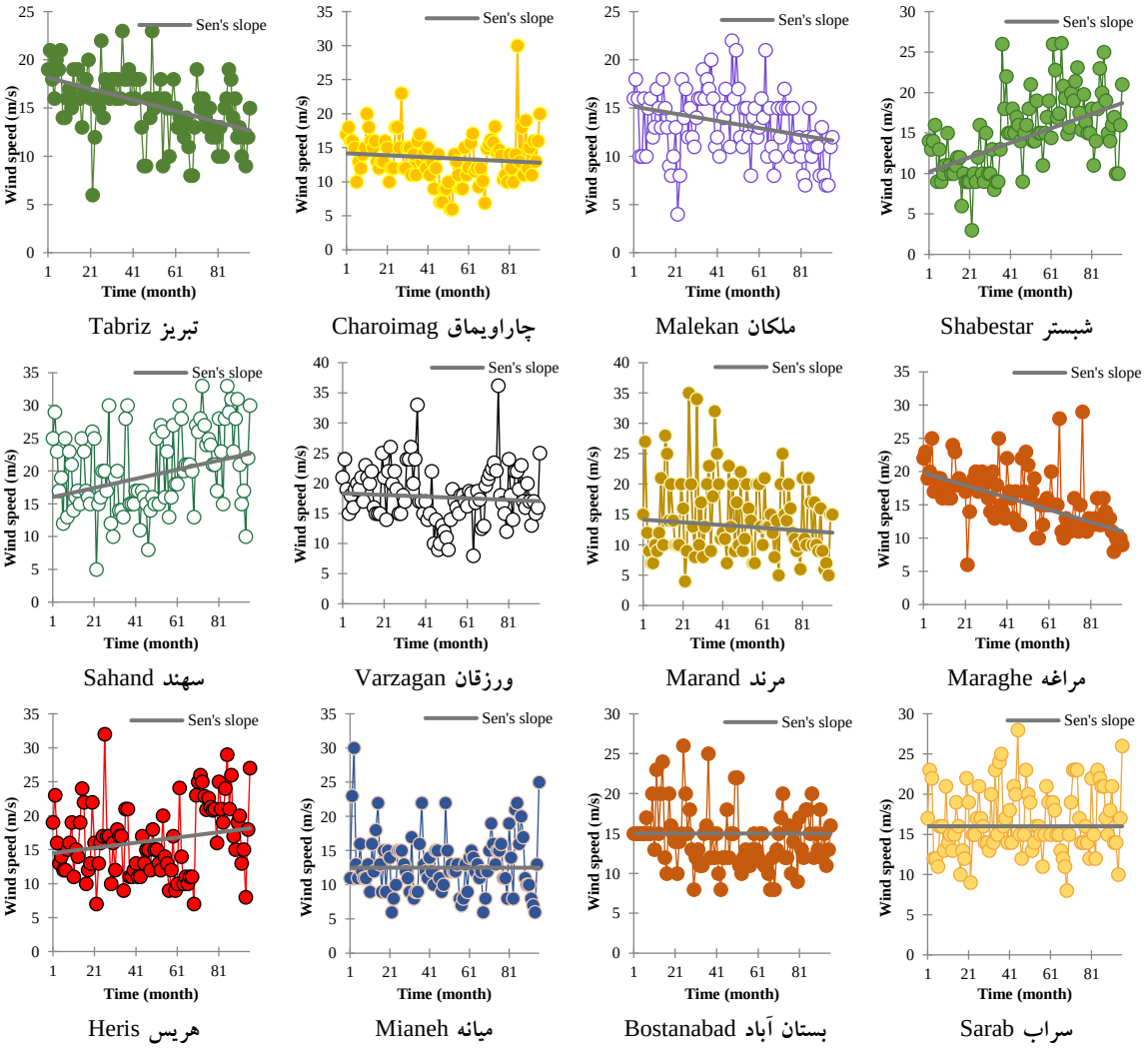
۳-۱- نتایج بررسی روند تغییرات سرعت باد بیشینه

در شکل ۲ نمودارهای روند تغییرات و شیب سن سرعت باد بیشینه مربوط به ۱۶ ایستگاه همدیدی واقع در شرق دریاچه ارومیه نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲ میزان سرعت باد بیشینه و همچنین روند تغییرات آن در ایستگاه‌های همدیدی مختلف، یکسان نیست. علت تفاوت در میزان سرعت باد در ایستگاه‌های همدیدی مختلف، می‌تواند به دلیل توپوگرافی منطقه و اختلاف ارتفاع ایستگاه‌های همدیدی از یکدیگر باشد. از طرفی قرارگیری کوه سهند و ارتفاعات اطراف آن در این منطقه، می‌تواند از دلایل اصلی اختلاف سرعت باد در این منطقه باشد. همچنین تأثیر امواج مدیترانه‌ای از سمت غرب و جنوب‌غربی و امواج سرد و خشک سیبری از سمت شمال و شمال‌شرقی این استان از عوامل مهم تفاوت در سرعت باد بیشینه مربوط به ایستگاه‌های همدیدی مختلف این منطقه محسوب می‌شود. با توجه به شکل ۲ بیشترین میزان سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های ورزقان و مرند به ترتیب با سرعت ۳۶/۲ m/s و ۳۵ m/s ثبت شده است. کمترین میزان سرعت باد بیشینه مربوط به ایستگاه‌های کلیبر و جلفا با ۲ m/s است. البته بیشترین اختلاف میان کمترین و بیشترین میزان سرعت باد بعد از ایستگاه‌های مرند و ورزقان به ترتیب با ۳۱ m/s و ۲۸/۲ m/s، در این دو ایستگاه یعنی کلیبر و جلفا به ترتیب با ۲۸ m/s و ۲۶ m/s است. کمترین اختلاف نیز مربوط به ایستگاه تبریز با ۱۸ m/s بوده و بعدازآن ایستگاه‌های بستان آباد، بناب و ملکان همگی با ۱۸ m/s در جایگاه بعدی قرار دارند. ثبات سرعت باد و اختلاف کم در کمترین و بیشترین میزان آن، برای برنامه‌ریزی جهت استفاده از توربین‌های مولد انرژی از نیروی باد حائز اهمیت است.



Ahar اهر | Bonab بناب | Kaleibar کلیبر | Jolfa جلفا



شکل ۲- نمودار روند تغییرات و شیب سن سرعت باد بیشینه ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

Fig. 2. Changes trend and Sen's slop chart of the maximum wind speed related to the synoptic stations in the east of Lake Urmia

در جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون من- کندال و تخمین‌گر شیب سن ارائه شده است. شکل ۳ نیز روند تغییرات سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی آذربایجان‌شرقی را نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود که روند تغییرات سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه یکسان نیست. با توجه به مقادیر آماره آزمون من- کندال و تخمین‌گر شیب سن، تغییرات سرعت باد در ایستگاه‌های کلیبر، میانه، جلفا، بستان آباد، بناب و سراب روند مشخصی ندارد. ایستگاه‌های همدیدی تبریز، مرند، اهر، ملکان، مراغه، چاراویماق و ورزقان به ترتیب با شیب سن ۰/۰۵۸-، ۰/۰۲۳-، ۰/۰۱۳-، ۰/۰۳۷-، ۰/۰۳۷-، ۰/۰۹۲-، ۰/۰۱۵- و ۰/۰۱۴- دارای روند نزولی (کاهشی) در سرعت باد بیشینه هستند که

تبریز، ملکان و مراغه روند کاهشی معنی‌دار (P<۰/۰۵) دارند. تغییرات سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های هریس، شبستر و سهند با شیب سن ۰/۰۳۸، ۰/۰۸۹ و ۰/۰۷۰ صعودی (افزایشی) بوده که فقط در دو ایستگاه شبستر و سهند افزایش معنی‌دار مشاهده می‌شود. بیابانی و همکاران (Biabani, Nazari Samani, Khosravi & Kazemzadeh, 2019) نیز در تحقیق خود نشان داده بودند که روند تغییرات سرعت باد در ایستگاه سهند افزایشی است که مشابه نتیجه این تحقیق است؛ اما برای ایستگاه تبریز روند کاهشی را نتیجه گرفته بودند که تفاوت نتایج می‌تواند به دلیل تفاوت در دوره آماری و سطح اطمینان متفاوت باشد. با توجه به عدم وجود روند یا روند کاهشی تغییرات سرعت باد بیشینه در اکثر ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه، این موضوع به معنی کاهش میزان سرعت باد این مناطق در آینده بوده و کاهش توان و پتانسیل تولید انرژی بادی و از طرف دیگر احتمال کاهش مخاطرات مربوط به بادهای شدید و وقوع طوفان در این مناطق را نشان می‌دهد.

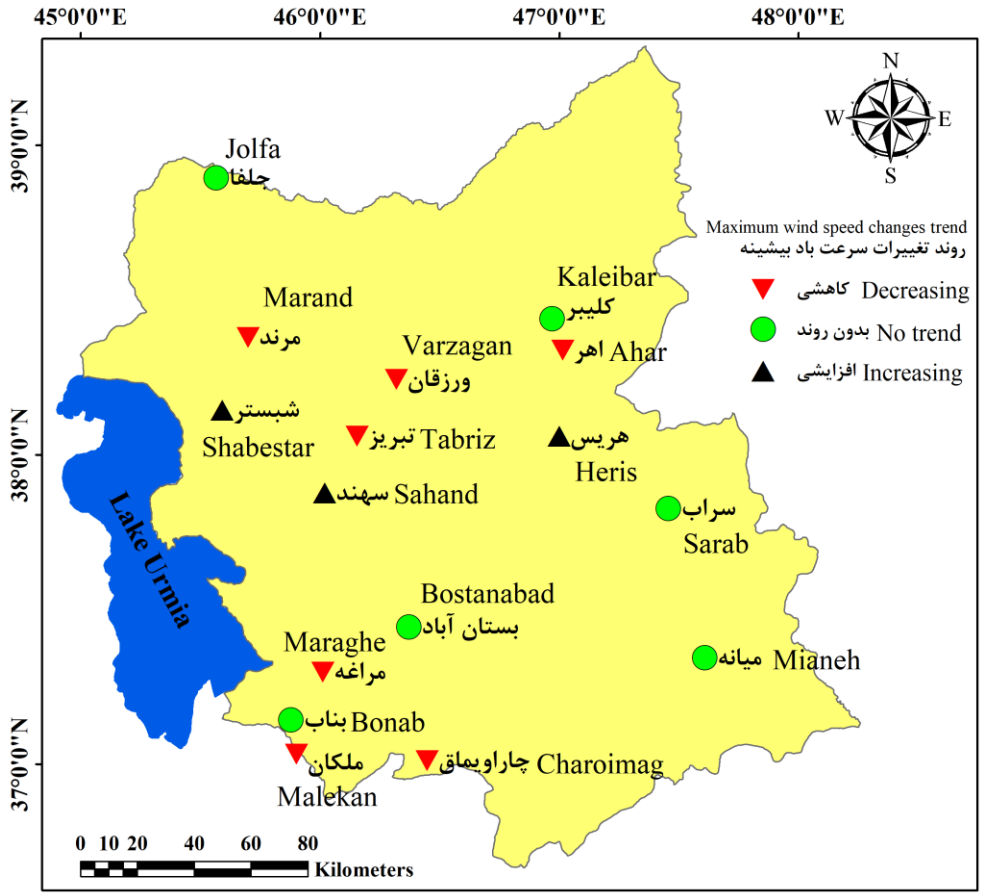
جدول ۲- مقدار روند تغییرات و شیب سن سرعت باد بیشینه ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

Table 2- The changes trend value and Sen's slop of the maximum wind speed related to the synoptic stations in the east of Lake Urmia

ایستگاه همدید Synoptic station	مقدار Z آزمون من - کندال Z-Value of the Mann-Kendall test	شیب سن Sen's Slop	p-value	نوع روند Trend type
جلفا Jolfa	-0.035	0.000	0.620	-
کلیبر Kaleibar	-0.045	0.000	0.535	-
بناب Bonab	-0.107	0.000	0.146	-
اهر Ahar	-0.083	-0.013	0.248	کاهشی Decreasing
شبستر Shabestar	0.386	0.089	< 0.0001	افزایشی* Increasing*
ملکان Malekan	-0.224	-0.037	0.002	کاهشی* Decreasing*
چاراویماق Charoimag	-0.098	-0.015	0.171	کاهشی Decreasing
تبریز Tabriz	-0.364	-0.058	< 0.0001	کاهشی* Decreasing*
مراغه Maraghe	-0.471	-0.092	< 0.0001	کاهشی* Decreasing*
مرند Marand	-0.083	-0.023	0.244	کاهشی Decreasing

ورزقان Varzagan	-0.072	-0.014	0.307	کاهشی Decreasing
سهند Sahand	0.216	0.070	0.002	افزایشی* Increasing*
سراب Sarab	0.064	0.000	0.373	-
بستان‌آباد Bostanabad	-0.117	0.000	0.108	-
میانه Mianeh	-0.021	0.000	0.767	-
هریس Heris	0.127	0.038	0.073	افزایشی Increasing

* Indicates significance at the 5% level. * نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.



شکل ۳- روند تغییرات سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

Fig. 3. The changes trend of maximum wind speed related to the synoptic stations in the east of Lake Urmia

جدول ۳ فراوانی وقوع سرعت باد بیشینه در هر یک از ۱۶ ایستگاه همدیدی موردمطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ فراوانی بادهای شدید در همه ایستگاه‌ها زیاد بوده و در اکثر ماه‌ها سرعت باد بیشینه بیشتر از ۵/۷۱ m/s است. بیش از ۵۰٪ از بادهای بیشینه در همه ایستگاه‌ها، سرعتی بیش از ۱۱/۱۱ m/s دارند. این مسئله آسیب‌پذیری اکثر مناطق شرق دریاچه ارومیه از این نظر و لزوم توجه به مباحث سازه‌ای و پیشگیری از آسیب‌های احتمالی در این منطقه را نشان می‌دهد؛ اما از دیدگاه انرژی و پتانسیل تولید نیرو از توان باد، این منطقه قابلیت و پتانسیل مناسبی دارد. با توجه به لزوم کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی به دلیل تأثیرات منفی این نوع منابع انرژی بر اقلیم و گرمایش جهانی که منجر به تبخیر- تعرق زیاد و در نتیجه کاهش منابع آبی می‌شود، باید حرکت به سمت استفاده از منابع انرژی پاک ازجمله نیروی باد موردتوجه قرار گیرد. با توجه به نتایج این جدول بیشترین فراوانی بادهای شدید (با سرعت بیشتر از ۱۱/۱۱ m/s) مربوط به ایستگاه‌های همدیدی اهر، سهند و ورزقان به ترتیب با ۹۸/۹۶، ۹۴/۷۹ و ۹۳/۷۵ درصد است. این مسئله آسیب‌پذیری بیشتر این مناطق و از دیدگاه دیگر پتانسیل بالای این مناطق از نظر توان تولید انرژی از نیروی باد را نشان می‌دهد. به‌طورکلی علت این امر می‌تواند به گرادیان فشار با توجه به توپوگرافی و وجود ارتفاعات کوه سهند در منطقه، اصطکاک سطحی با توجه به مشخصات جغرافیایی، کاربری اراضی و وجود ساختمان‌ها در مناطق شهری و دیگر عوامل جغرافیایی مرتبط با این مسئله مرتبط باشد (Shi, Dong, Xiao & Huang, 2021).

جدول ۳- فراوانی سرعت باد بیشینه ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

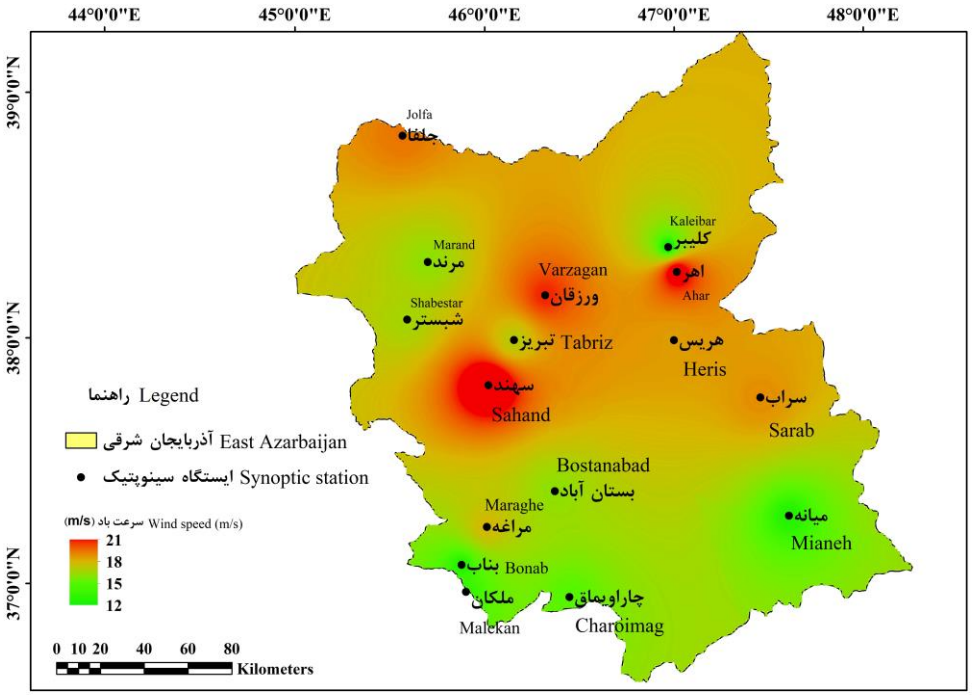
Table 3- The frequency of the maximum wind speed related to the synoptic stations in the east of Lake Urmia

ایستگاه همدید Synoptic station		سرعت باد بیشینه (m/s) Maximum wind speed (m/s)						
		0-0.5	0.51-2.1	2.11-3.6	3.61-5.7	5.71-8.8	8.81-11.1	11.1<
جلفا Jolfa	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	1	0	0	5	9	81
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	1.04	0	0	5.21	9.38	84.38
کلیبر Kaleibar	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	1	0	2	9	31	53
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	1.04	0	2.08	9.38	32.29	55.21
بناب Bonab	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	1	6	20	69
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	1.04	6.25	20.83	71.88
اهر Ahar	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	0	1	95

	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	0	1.04	98.96
شبستر Shabestar	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	1	0	2	25	68
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	1.04	0	2.08	26.04	70.83
ملکان Malekan	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	1	10	21	64
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	1.04	10.42	21.88	66.67
چاراویماق Charoimag	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	5	21	70
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	5.21	21.88	72.92
تبریز Tabriz	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	3	9	84
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	3.13	9.38	87.50
مراغه Maraghe	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	2	12	82
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	2.08	12.5	85.42
مرند Marand	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	3	11	26	56
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	3.13	11.46	27.08	58.33
ورزقان Varzagan	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	1	5	90
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	1.04	5.21	93.75
سهند Sahand	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	1	1	3	91
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	1.04	1.04	3.13	94.79
سراب Sarab	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	1	6	89
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	1.04	6.25	92.71
بستان‌آباد Bostanabad	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	4	15	77
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	4.17	15.63	80.21
میانه	فراوانی (تعداد ماه‌ها)	0	0	0	0	13	24	59

Mianeh	Frequency (Monthes)							
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	13.54	25	61.46
هریس Heris	فراوانی (تعداد ماه‌ها) Frequency (Monthes)	0	0	0	0	3	16	77
	درصد فراوانی (٪) Frequency percentage (%)	0	0	0	0	3.13	16.67	80.21

شکل ۴ پهنه‌بندی مکانی متوسط سرعت باد بیشینه در استان آذربایجان‌شرقی واقع در شرق دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که سرعت باد بیشینه در شرق دریاچه ارومیه بیش از ۱۲ m/s بوده و البته در مناطق مرکزی و شمالی سرعت‌های بیشتری نیز دارد. متوسط سرعت باد بیشینه در مناطق مرکزی استان آذربایجان‌شرقی به ۲۱ m/s نیز می‌رسد.



شکل ۴- پهنه‌بندی مکانی متوسط سرعت باد بیشینه در شرق دریاچه ارومیه

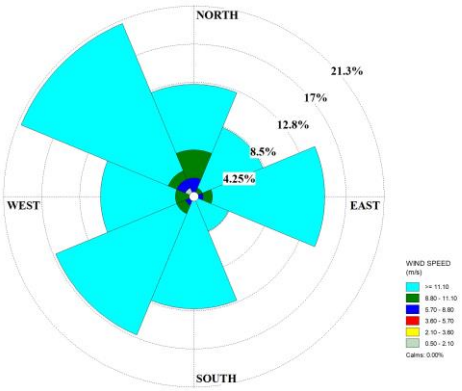
Fig.4. Spatial zoning of maximum wind speed means in the east of Lake Urmia

۳-۲- نتایج بررسی جهت باد بیشینه

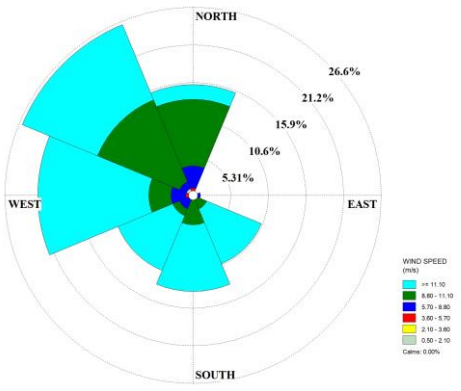
شکل ۵ گلباد مربوط به هر یک از ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ در اکثر ایستگاه‌ها جهت باد غالب از سمت غرب و جنوب‌غربی است. باد غالب ایستگاه‌های همدیدی بناب و سراب از سمت غرب، ایستگاه‌های اهر، چاراویماق، میانه، تبریز و ورزقان از سمت

جنوب‌غربی، ایستگاه‌های بستان آباد، هریس، ملکان، مرند و شبستر از سمت جنوب، جلفا و کلیبر از سمت شمال‌غربی، ایستگاه مراغه از سمت شرق و ایستگاه سهند از سمت غرب و جنوب‌غربی است. از عوامل مؤثر در جهت باد غالب منطقه می‌توان توپوگرافی، نیروی گرادیان فشار و نیروی کوریولیس را نام برد. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه، جهت باد غالب در نواحی مختلف از نیروهای موجود پیروی کرده و چنین جهت باد غالب در شرق دریاچه ارومیه منطقی به نظر می‌رسد (Shi et al., 2021).

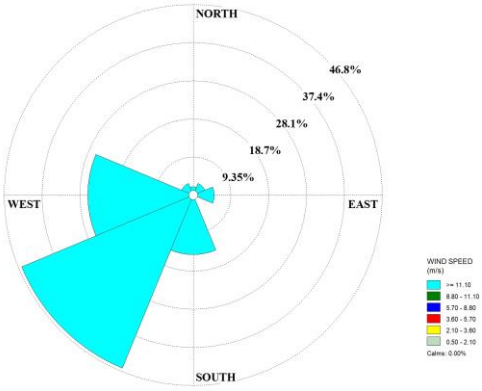
بیشترین وزش باد بیشینه از یک جهت ثابت مربوط به ایستگاه همدیدی مراغه با وزش ٪۵۰ از بادهای شدید آن (با سرعت بیشتر از ۱۱/۱۱ m/s) از سمت شرق است و کمتر از ٪۲۰ بادهای شدید این منطقه از سمت غرب است. همچنین حدود ٪۱۰ از بادهای شرقی این منطقه با سرعت ۸/۸۱ m/s تا ۱۱/۱رخ داده است. بعد از این ایستگاه، جهت باد غالب اهر و چاراویماق به ترتیب با ٪۴۶/۸ و ٪۴۵/۷ از سمت جنوب‌غربی و سراب با ٪۴۰/۴ از سمت غرب، همگی با سرعت بیشتر از ۱۱/۱۱ m/s، جهت ثابتی در وزش باد غالب دارند. در بقیه ایستگاه‌های همدیدی، وزش باد غالب از هر یک از جهت‌های مختلف کمتر از ٪۴۰ است. ضروری است این موضوع در مباحث سازه‌ای و سمت‌وسوی ساختمان‌ها و تأسیسات مختلف و همچنین بحث احداث نیروگاه‌ها یا توربین‌های بادی و یا در موضوع کشاورزی در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی و مباحث مرتبط در نظر گرفته شود.



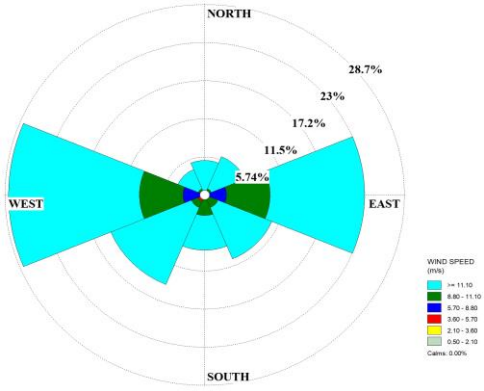
جلفا Jolfa



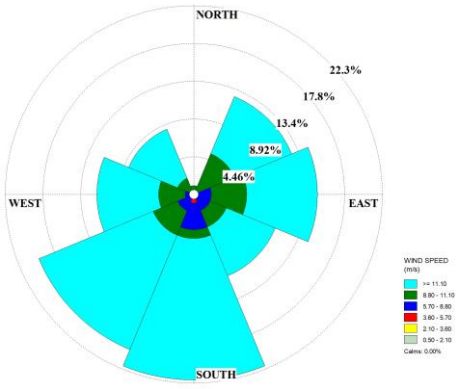
کلیبر Kaleibar



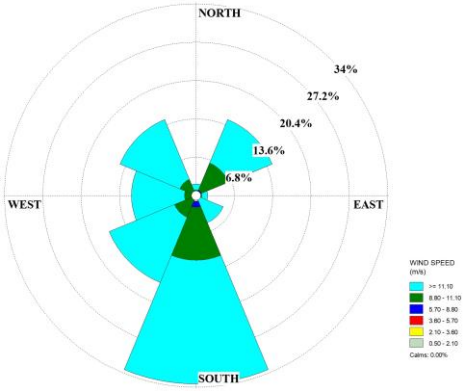
اهر Ahar



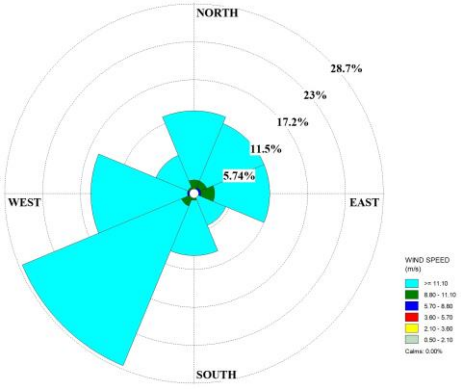
بناب Bonab



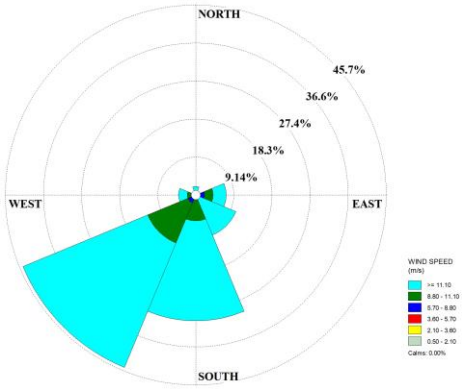
ملکان Malekan



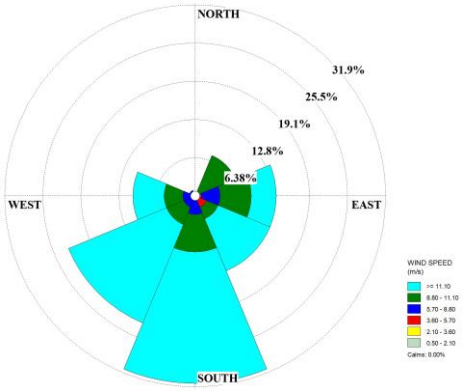
شبستر Shabestar



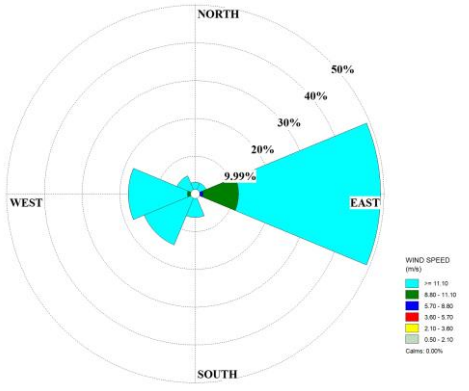
تبریز Tabriz



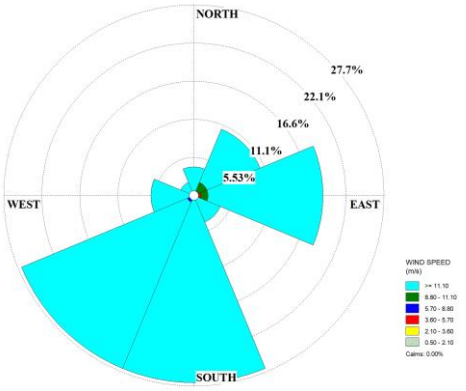
چاراویماق Charoimag



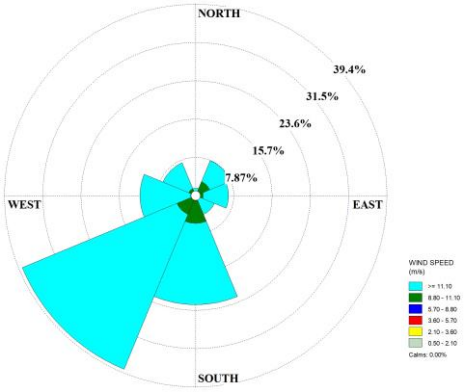
Marand **مرند**



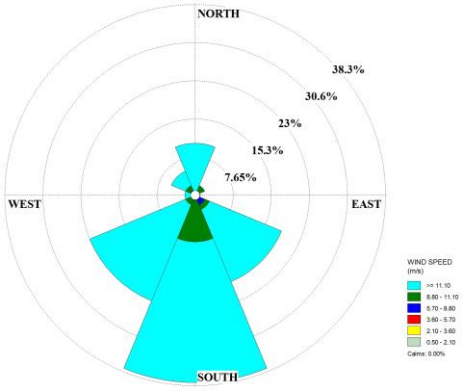
Maraghe **مراغه**



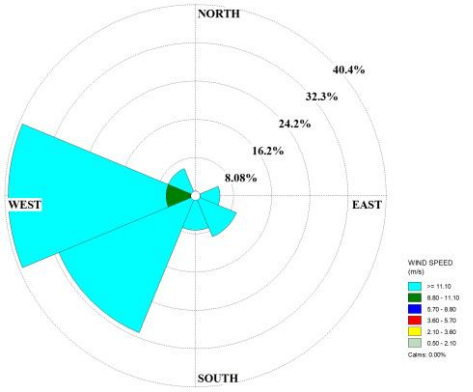
Sahand **سهند**



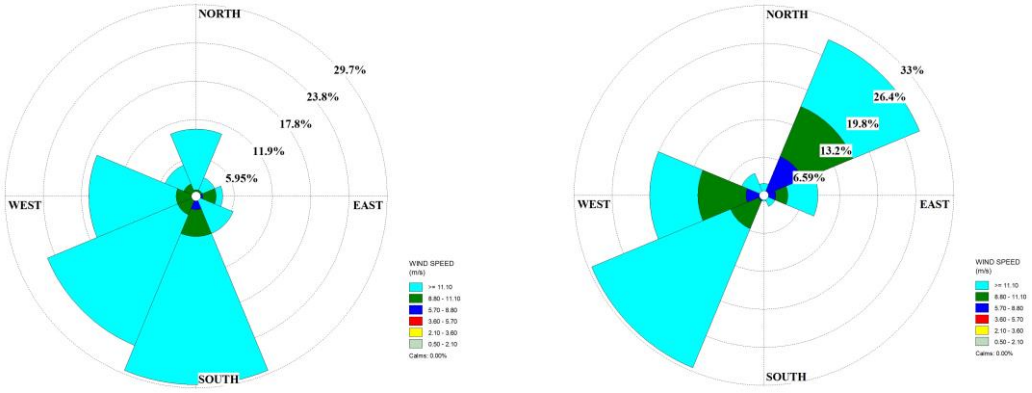
Varzagan **ورزقان**



Bostanabad **بستان آباد**



Sarab **سراب**



هریس Heris میانه Mianeh

شکل ۵- گلباد مربوط به ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه

Fig. 5. Wind Rose of the synoptic stations in the east of Lake Urmia

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف بررسی روند تغییرات سرعت باد بیشینه و جهت باد غالب در شرق دریاچه ارومیه از آزمون‌های ناپارامتری من- کندال و تخمین‌گر شیب سن و نمودار گلباد استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد میزان سرعت باد بیشینه در نواحی مختلف این منطقه یکسان نیست. از علت‌های این تفاوت، توپوگرافی منطقه و ارتفاع متفاوت ایستگاه‌های همدیدی، وجود ارتفاعات کوه سهند و جلوگیری آن از نفوذ بادها به نواحی مختلف، تأثیر امواج مدیترانه‌ای از سمت غرب و جنوب‌غربی و امواج سرد و خشک سیبری از سمت شمال و شمال‌شرقی این منطقه است. بیشترین میزان سرعت باد بیشینه مربوط به ایستگاه‌های ورزقان و مرند و کمترین میزان آن مربوط به ایستگاه‌های کلیبر و جلفا است. مطابق نتایج آزمون من- کندال و تخمین‌گر شیب سن، تغییرات سرعت باد بیشینه در اکثر ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه هیچ روندی ندارد و یا دارای روند کاهشی است. فقط در دو ایستگاه شبستر و سهند روند افزایشی معنی‌دار وجود دارد. در ایستگاه‌های تبریز، ملکان و مراغه نیز روند کاهشی معنی‌دار وجود دارد. تغییرات سرعت باد بیشینه در ایستگاه‌های کلیبر، میانه، جلفا، بستان آباد، بناب و سراب بدون روند، در ایستگاه‌های تبریز، مرند، اهر، ملکان، مراغه، چاراویماق و ورزقان دارای روند کاهشی و در ایستگاه‌های هریس، شبستر و سهند دارای روند افزایشی است.

مطابق نمودارهای گلباد، در اکثر ایستگاه‌ها جهت باد غالب از سمت غرب و جنوب‌غربی است. باد غالب ایستگاه‌های همدیدی بناب و سراب از سمت غرب، ایستگاه‌های اهر، چاراویماق، میانه، تبریز و ورزقان از سمت جنوب‌غربی، ایستگاه‌های بستان‌آباد، هریس، ملکان، مرند و شبستر از سمت جنوب، جلفا و کلیبر از سمت شمال‌غربی، ایستگاه مراغه از سمت شرق و ایستگاه سهند از سمت غرب و جنوب‌غربی است. از نظر

درصد وقوع بادهای شدید از یک جهت ثابت، در ایستگاه مراغه از سمت شرق، اهر و چاراویماق از سمت جنوب‌غربی و سراب از سمت غرب، بیشترین وزش باد غالب از یک جهت ثابت رخ داده است.

فراوانی بادهای شدید در همه ایستگاه‌های همدیدی این منطقه بسیار زیاد بوده است. این مسئله از نظر آسیب‌پذیری این منطقه در مقابل بادهای شدید و طوفان‌ها و لزوم توجه به مباحث سازه‌ای اهمیت دارد؛ اما از دیدگاه انرژی و تولید نیرو، این منطقه دارای پتانسیل مناسبی است. با توجه به لزوم کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی به دلیل تأثیرات منفی آن‌ها بر اقلیم و وقوع گرمایش جهانی که منجر به کاهش بارش، افزایش دما، تبخیر- تعرق زیاد و در نتیجه کاهش منابع آبی می‌شود، باید حرکت به سمت استفاده از نیروی باد به‌عنوان یک منبع انرژی پاک در نظر گرفته شود. یکی از محدودیت‌های این تحقیق صرفاً مطالعه شرق دریاچه ارومیه بود. طبیعتی است اگر امکان مطالعه کل حوضه دریاچه ارومیه در جهات مختلف وجود داشت، می‌توانستیم در شرایط خشکیدگی دریاچه ارومیه و گستردگی بستر نمکی، تصویر دقیق‌تری از روند تغییرات سرعت و جهت باد داشته باشیم و برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تری از دیدگاه آمایش سرزمین برای سال‌های آتی ارائه کنیم.

References

Ahmadi, F., Khalili, K., Behmanesh, J., & Verdinazhad, V. (2013). Determination of Climate Changes on Air Temperature and Shahar-Chai River in the West of Urmia Lake Using Trend and Stationarity Analysis. *Irrigation Sciences and Engineering*, *35*(4), 97-108. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.25885952.1391.35.4.10.0

Allahverdipour, P., & Sattari, M. T. (2023). Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(2), 125-142. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11337.1120

Allahverdipour, P., Ghorbani, M. A., & Asadi, E. (2024). Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, *4*(3), 95-112. [In Persian]. https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12755.1271

Asakereh, H., Beyranvand, A., & Doustkamian, M. (2019). Assessment of wind power in the synoptic station of Ardebil. *Spatial Planning*, *8*(3), 65-82. [In Persian] https://doi.org/10.22108/sppl.2018.110113.1179

Azorin-Molina, C., Rehman, S., Guijarro, J. A., McVicar, T. R., Minola, L., Chen, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2018). Recent Trends in Wind Speed Across Saudi Arabia, 1978–2013: a Break in The Stilling. *International Journal of Climatology*, *38*(1), e966-e984. https://doi.org/10.1002/joc.5423

Biabani, L., Nazari Samani, A., Khosravi, H., & Kazemzadeh, M. (2019). An investigation of the trends of monthly wind speed fluctuation on the edge of Lake Urmia over the last 30

years. *Journal of Arid Biome*, *9*(1), 139-151. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008790.1398.9.1.11.5

Bilir, L., Imir, M., Devrim, Y., & Albostan, A. (2015). Seasonal and Yearly Wind Speed Distribution and Wind Power Density Analysis Based on Weibull Distribution Function. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(44), 15301-15310. http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.140

Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., Abnavi, M. D., & Rosen, M. A. (2016). Evaluation of Wind Energy Potential in Province of Bushehr, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55*, 455-466. http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.148

Deng, K., Azorin-Molina, C., Minola, L., Zhang, G., &Chen, D. (2021). Global Near-Surface Wind Speed Changes over the Last Decades Revealed by Reanalyses and CMIP6 Model Simulations. *Journal of Climate*, *34*(6), 2219-2234. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0310.1

Ghaedi, S. (2019). Wind Speed Trends in Iran. *Desert Management, 7*(13), 15-28. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jdmal.2019.36529

Hafner, M., Tagliapietra, S., & de Strasser, L. (2018). The challenge of energy access in Africa. *Energy in Africa: Challenges and Opportunities*, 1-21. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92219-5_1

Hanafi, A., & Iranpour, F. (2017). Evaluation and zoning of wind speed potential in the country in order to plan for wind power generation. *Journal of Climate Research, 8*(31), 73-88. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_68879.html

Kendall, M. G. (1948). *Rank Correlation Methods(3rd ed.)*. London: Griffin.

Klink, K. (2015). Seasonal patterns and trends of fastest 2-min winds at coastal stations in the conterminous USA. *International Journal of Climatology*, *35*(14), 4167-4175. https://doi.org/10.1002/joc.4275

Libanda, B., & Paeth, H. (2023). Modelling wind speed across Zambia: Implications for wind energy. *International Journal of Climatology, 43*(2), 772-786. https://doi.org/10.1002/joc.7826

Mahmood, F. H., Resen, A. K., & Khamees, A. B. (2020). Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq. *Energy Reports, 6*, 79-87. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.021

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, 13*(3), 245-259. https://doi.org/10.2307/1907187

Mazidi, A., & Bahaaddinbeygi, H. (2021). Study of temperature, precipitation and wind speed trends in the northern and western regions of Kerman province using parametric and non-parametric tests. *Geography and Human Relationships*, *4*(2), 246-254. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2021.296784.1587

Mofidi, A., & Kamali, S. (2012). Investigating the Structure of Dust-storms in the Sistan Region by using Regional Climate Model RegCM4; Case Study July 30, 2001. *1st National Desert Conference*, University of Tehran, Tehran, Iran. [In Persian]

Molaei, A., & Lashkari, H. (2020). Investigation of wind speed trend changes in central Iran using ECMWF Reanalysis data. *Physical Geography Research*, *52*(3), 481-498. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.295406.1007476

Raeispoor, K., Beykrezaei, E., & Tavoosi, T. (2013). Statistical Analyze and Predicting Incident Probability of Stormy and Strong Winds in Kermanshah Province. *Geography and Environmental Planning*, *24*(3), 93-106. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1392.24.3.9.8

Raheja, L., Wadalkar, R., Chaudhuri, R. R., & Pandit, A. (2024). Surface wind speed trends for the period of 1981–2020 and their implication for a highly urbanised semi-arid Delhi–NCR and surrounding areas. *Journal of Earth System Science*, *133*(2), 112. https://doi.org/10.1007/s12040-024-02322-2

Sattari, M. T., & Allahverdipour, P. (2024). Application of tree-based intelligence methods for wind speed estimation at the east of Lake Urmia. In: Kahraman, C., Cevik Onar, S., Cebi, S., Oztaysi, B., Tolga, A.C., Ucal Sari, I. (eds) Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2024. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *1090*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67192-0_20

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379-1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Shi, H., Dong, Z., Xiao, N., & Huang, Q. (2021). Wind speed distributions used in wind energy assessment: a review. *Frontiers in Energy Research*, *9*, 769920. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.769920

Ying, J., Yong, L., & Zongci, Z. (2013). Maximum wind speed changes over China. *Acta Meteorology Sinica*, *27*(1), 63-74. https://doi.org/10.1007/s13351-013-0107-x

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.222-243 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.74930.1160 Open access

Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023

Hamid Ganjaeian*

PhD in Geomorphology, University of Tehran, Tehrn, Iran

Received: 11 March 2024 ***Revised: 13 May 2024*** ***Accepted: 21 May 2024***

Extended Abstract

Introduction

The geological situation of Iran and the presence of active faults have resulted in frequent earthquakes occurring in Iran every year. In some cases, large earthquakes have caused significant human and financial losses. Earthquake risk has always been a major concern due to the substantial damage it can cause, but unfortunately, no method has yet been developed to accurately predict the time of its occurrence. This challenge has led to the adoption of statistical methods for approximate earthquake prediction. Given the importance of earthquakes and Iran's high seismic potential, this research focuses on the spatial and temporal analysis of earthquakes that have occurred in Iran. As no comprehensive studies have been conducted on earthquake spatial and temporal analysis, the purpose of this research is to assess the earthquake situation in Iran and identify high-risk areas. Additionally, another aim of this research is to address questions and rumors about the timing of earthquakes at different hours of the day and night. To achieve these objectives, the analysis uses data on earthquake epicenters recorded in Iran between the years 1286 to 1402 (1907 to 2023).

Material and Methods

This research is based on quantitative methods. The key datasets include the SRTM 30-meter digital elevation model, a digital layer of Iran's faults, and information about earthquake epicenters recorded in Iran from 1286 to 1402 (1907 to 2023), sourced from the USGS website. The primary research tools are ArcGIS (for map preparation) and

* . Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir Tel:+989186074070

How to cite this Article: Ganjaeian, H (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222-243.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

SPSS (for data analysis). According to the research objectives, the study was conducted in two main stages. In the first stage, after gathering statistical data on earthquake epicenters, the spatial analysis of earthquakes was performed by examining magnitude, political divisions, and proximity to major faults. In the second stage, temporal analysis was conducted by evaluating earthquakes across different months and times of the day and night.

Discussion and Results

In this research, earthquakes that occurred in Iran from 1286 to 1402 were analyzed. The results revealed that during the study period, 7139 earthquakes with a magnitude greater than 3 Richter were recorded in Iran, including 12 earthquakes exceeding 7 Richter. This indicates that, on average, an earthquake with a magnitude greater than 7 occurs approximately once every 10 years. The spatial analysis of earthquakes based on political divisions showed that the highest number of earthquake centers were located in the provinces of Hormozgan, Fars, and Kerman, where 1187, 1175, and 796 earthquakes with magnitudes greater than 3 Richter were recorded, respectively. Conversely, the provinces of Alborz, Markazi, and Qom recorded the lowest number of earthquake centers, with 4, 8, and 11 centers, respectively.

The spatial analysis of earthquakes in relation to major faults indicated that the highest earthquake density occurred near the Zagros fault and the Kazeroon fault. Additionally, experts observed that earthquakes with magnitudes greater than 6 Richter were more frequently associated with these faults.

Conclusion

The results of the spatial analysis of earthquakes showed that, in terms of quantity and the number of earthquake foci, the southwestern regions of the country have the highest seismic potential. However, regarding high-magnitude earthquakes (7 Richter), the eastern and northwestern regions of the country exhibit the highest potential. The results also indicate that while the Zagros fault has caused numerous earthquakes, the Nayband fault has played a significant role in high-magnitude earthquakes. Temporal analysis was also conducted, showing that the majority of earthquakes occurred during the months of May and April, with a general decrease in earthquake frequency from May to February. Analysis of the time of occurrence revealed that the highest number of earthquakes occurred between 24:00 and 6:00, while the fewest occurred between 6:00 and 12:00. Overall, earthquake frequency increased from early afternoon until midnight and decreased thereafter until noon. The findings suggest that the early hours of the morning, along with the months of May and April, exhibit the highest earthquake frequency.

Keywords: Earthquake Risk Zoning, Seismic Hazard Analysis, Spatial and Temporal Earthquake Analysis, Active Faults, Zagros and Nayband Faults.

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۲۴۳-۲۲۲

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.87246.1470 دسترسی آزاد

تحلیل مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌های ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

حمید گنجائیان[۱]- دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ **دریافت:** ۱۴۰۲/۱۲/۲۱ **تاریخ بازنگری:**۱۴۰۳/۲/۲۴ **تاریخ پذیرش:**۱۴۰۳/۳/۱

چکیده

موقعیت زمین‌ساختی ایران سبب شده است تا این کشور پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی داشته باشد. با توجه به اینکه زمین‌لرزه با خسارات جانی و مالی زیادی همراه است و مطالعه در این زمینه دارای اهمیت بالایی است، در این پژوهش به تحلیل مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران پرداخته شده است. این پژوهش بر مبنای روش‌های کمی است. مهم‌ترین داده‌های پژوهش، لایه رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM، لایه رقومی گسل‌های ایران و همچنین اطلاعات مربوط به کانون زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۲-۱۲۸۶) است که از سایت USGS تهیه شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش ArcGIS و SPSS بوده است. با توجه به اهداف مورد نظر، در این پژوهش ابتدا به آنالیز مکانی و سپس آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده پرداخته شده است. بر اساس نتایج حاصله، در طی دوره زمانی موردمطالعه، ۷۱۳۹ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر در ایران ثبت شده است که ۱۲ زمین‌لرزه بیش از ۷ ریشتر بزرگا داشته‌اند (بر این اساس حدوداً هر ۱۰ سال یک‌بار شاهد یک زمین‌لرزه بیش از ۷ ریشتری در ایران بوده‌ایم). نتایج آنالیز مکانی و تحلیل فضایی زمین‌لرزه‌های رخ داده نشان داده است که از نظر کمی و تعداد کانون‌های زمین‌لرزه، مناطق جنوب غربی کشور دارای بیش‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند ولی از نظر زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۷ ریشتر، مناطق شرقی و شمال غربی کشور دارای پتانسیل بالاتری هستند. همچنین مناطق مرکزی کشور، خصوصاً مناطق مجاور شهر اصفهان، دارای کم‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند. نتایج آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده نیز نشان داده است که بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده مربوط به ماه‌های فروردین و اردیبهشت و ساعات اولیه بامداد بوده است.

[۱] .نویسنده مسئول : ۰۹۱۸۶۰۷۴۰۷۰

Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها: منطقه‌بندی خطر زلزله ، تحلیل خطر لرزه‌ای ، تحلیل مکانی و زمانی زلزله، گسل‌های فعال، گسل‌های زاگرس و نایبند.

۱-مقدمه

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا این کشور پتانسیل زیادی از نظر وقوع مخاطرات طبیعی داشته باشد و به همین دلیل جزء کشورهای پرمخاطره دنیا محسوب می‌شود (Ganjaeian, 2019). یکی از مخاطراتی که ایران را همواره تهدید کرده است، مخاطره زمین‌لرزه یا زلزله است (Bodenmann, Reuland & Stojadinovic, 2023; Aloisio, Rosso, De Leo, Fragiacomo & Basi, 2023). سرزمین ایران به‌عنوان بخشی از زون فعال زمین‌ساختی آلپ – هیمالیا در طول زمان تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی زیادی قرارگرفته است که پیدایش رشته‌کوه‌های زاگرس، مکران، البرز و کپه داغ در فلات ایران در اثر زیر راندگی صفحات عربستان - اقیانوس هند از لندفرم‌های منتج از این همگرایی است (Goorabi & Emami, 2018). با توجه به موقعیت زمین‌ساختی فلات ایران، این فلات با ناآرامی‌های زیادی مواجه است (Agha Nabati, 2004). درواقع، سرزمین ایران طرح پیچیده‌ای از مجموعهٔ پوسته‌ها و قطعات زمین‌ساختی است که از نگاه نوزمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی، ویژگی‌های خاصی دارد و دارای پوسته‌ای به‌شدت خرد شده و تکتونیزه است و در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی فعالیت‌های کوهزایی عمده‌ای را پشت سر گذاشته است (Roustaee, Zamani, Navabpour & Moayyed, 2015). جنبش‌های طبقات زمین در امتداد این گسل‌ها با تغییرات عمده محیطی در مناطق همراه بوده است که تغییرات ناشی از آن‌ها، تا زمان حاضر نیز ادامه داشته است (McCalpin, 2013). در حال حاضر، تنش‌های فشارشی ناشی از بازشدگی دریای سرخ و گسترش اقیانوس هند موجب جابه‌جایی و تغییر شکل متفاوت پوسته و صفحات قاره‌ای ایران شده، درنتیجه، فعالیت‌های جوان زمین‌ساختی و تغییرات و تأثیرات متقابل قطعات زمین‌ساختی برهم، که متأثر از ساختارهای حاصل از فازهای زمین‌ساختی قدیمی‌تر است، زمینه ایجاد جنبایی گسل‌های قدیمی و پیدایش گسل‌های جدید و در نتیجه پتانسیل – لرزه‌خیزی بالای ایران شده است (Payandeh, Servati & Shafiei, 2018).

موقعیت زمین‌ساختی ایران و وجود گسل‌های فعال سبب شده است تا هرساله شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های متعددی در ایران باشیم و در بعضی از مواقع نیز زمین‌لرزه‌های با بزرگای زیاد سبب وارد آوردن خسارات جانی و مالی زیادی شده‌اند. مخاطره زمین‌لرزه به دلیل اینکه با خسارات جانی و مالی زیادی همراه است، همواره موردتوجه قرار گرفته است ولی متأسفانه تاکنون روشی برای پیش‌بینی دقیق زمان وقوع آن پیدا نشده است و همین مسئله سبب شده است تا به‌منظور پیش‌بینی تقریبی آن اغلب از روش‌های آماری استفاده شود (Giannaraki, Kassaras, Roumelioti, Kazantzidou-Firtinidou & Ganas, 2019; Tang, Zhu, Ba, Lee & Gong, 2023). با توجه به اهمیت موضوع زمین‌لرزه و پتانسیل بالای لرزه‌خیزی ایران، در این پژوهش به

آنالیز مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌های رخ‌داده در ایران پرداخته شده است. با توجه به اینکه در مورد زمین‌لرزه‌های رخ‌داده و آنالیز مکانی و زمانی آن‌ها، مطالعات جامعی صورت نگرفته است، هدف از این پژوهش، بررسی وضعیت زمین‌لرزه‌های رخ‌داده در ایران و شناسایی مناطق در معرض مخاطره زمین‌لرزه است. همچنین یکی دیگر از اهداف پژوهش، پاسخ به سؤالات و شایعات در مورد زمان وقوع زمین‌لرزه در ساعات مختلف شبانه‌روز است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. با توجه به موارد مذکور، در این پژوهش به‌منظور آنالیز مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌های رخ‌داده در ایران از اطلاعات مربوط کانون‌های زمین‌لرزه‌های رخ‌داده در طی سال‌های ۱۲۸۶ تا ۱۴۰۲ (۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳) استفاده شده است.

در ارتباط با موضوع موردمطالعه، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که ازجمله آن‌ها می‌توان به وانگ و همکاران (Wang, Huang, Chang & Wu, 2014) اشاره کرد که به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده در تایوان در یک دوره زمانی ۱۱۰ ساله پرداخته است. بوسارد (Bossard, 2014) به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده در ژاپن با استفاده از توزیع پواسون پرداخته است و همچنین وانگ و چانگ (Wang & Chang, 2015) نیز با استفاده از توزیع پواسون، به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده در تایوان پرداخته‌اند. اومی و همکاران (Omi, Ogata, Hirata & Aihara, 2013) به آنالیز مکانی و زمانی پس‌لرزه‌ها و ارتباط آن‌ها با زمین‌لرزه اصلی در ژاپن پرداختند. دیاس و همکاران (Dias, Papa & Ferreira, 2019) به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه کالیفرنیا پرداختند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2023) به آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه زلزله‌زده سیچوان چین پرداختند. زمانی و اسدی (Zamani & Asadi, 2005) به آنالیز رقومی الگوی لرزه‌خیزی چند منطقه زلزله‌خیز در ایران پرداختند. هاشمی و علی‌محمدی سراب (Hashemi & Ali Mohammadi Sarab, 2010) به بررسی الگوهای زمانی- مکانی در داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران با استفاده از شاخص‌های و مدل‌های آمار فضایی پرداختند. رستمی و همکاران (Rostami, Hashemi & Ahmadi, 2017) به تحلیل آماری الگوی زمانی زمین‌لرزه در زون زاگرس پرداختند. رجبی و رضاپور (Rajabi & Rezapour, 2019) به تحلیل پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه هجدک استان کرمان در سال ۱۳۹۶ پرداختند. زندی و همکاران (Zandi, Zanganeh & Moghadam, 2019) به ارزیابی، مدل‌سازی و پیش‌بینی توسعه شهری نیشابور با تأکید بر زلزله پرداختند. ساکت و فاطمی عقدا (Saket, Fatemi Aqda, Fahimifar & Sadeghi, 2020) به تحلیل و روندیابی پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان خراسان جنوبی در آذرماه سال ۱۳۹۱ پرداختند. مرادی و همکاران (Moradi, Amir Ahmadi, Goli Mokhtari & Zandi, 2022) به مطالعه آماری و ارزیابی عوامل مؤثر در تشدید زلزله در غرب استان کرمانشاه پرداختند. تحریری و صفاری (Tahriri & Safari, 2023) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی در امتداد سامانه گسلی درونه پرداختند. در راستای تکمیل تحقیقات پیشین، هدف از این پژوهش، آنالیز مکانی و زمانی زمین‌لرزه-

های رخ داده در ایران است. درواقع، نوآوری تحقیق حاضر این است که بر خلاف تحقیقات پیشین که فقط به بررسی زمین‌لرزه‌های رخ داده در یک دوره و در یک منطقه خاص پرداخته شده است، در این پژوهش تمامی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در طی دوره زمانی ۱۱۶ ساله مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته شده است. همچنین در تحقیقات پیشین، به وضعیت زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده توجه نشده است، درحالی‌که در این پژوهش آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های ثبت شده نیز انجام شده است.

۲-روش تحقیق

این پژوهش بر مبنای روش‌های کمی است. مهم‌ترین داده‌های پژوهش، لایه رقومی گسل‌های ایران و همچنین اطلاعات مربوط به کانون زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۲-۱۲۸۶) است که از سایت USGS تهیه شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه-های مورد نظر) و SPSS (به‌منظور آنالیز اطلاعات) بوده است. با توجه به اهداف مورد نظر، این پژوهش در دو مرحله کلی انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های ایران): در این مرحله پس از تهیه اطلاعات آماری مربوط به کانون‌های زمین‌لرزه، به‌منظور آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده، ابتدا به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده از نظر بزرگا پرداخته شده است و سپس موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده بر مبنای تقسیمات سیاسی و همچنین موقعیت آن‌ها نسبت به گسل‌های اصلی پرداخته شده است. همچنین در ادامه با استفاده از روش تحلیل فضایی فاصله اقلیدوسی[1]، نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه در ایران تهیه شده است. در روش فاصله اقلیدوسی کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه بر طبق رابطه فیثاغورث، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در این بخش، نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه هم بر مبنای تمامی زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۳ ریشتر و هم بر مبنای زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ ریشتر تهیه شده است.

مرحله دوم (آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های ایران): در این مرحله به‌منظور آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده، به تجزیه‌وتحلیل زمین‌لرزه‌های رخ داده در طی ماه‌های مختلف و همچنین ساعات مختلف شبانه‌روز پرداخته شده است.

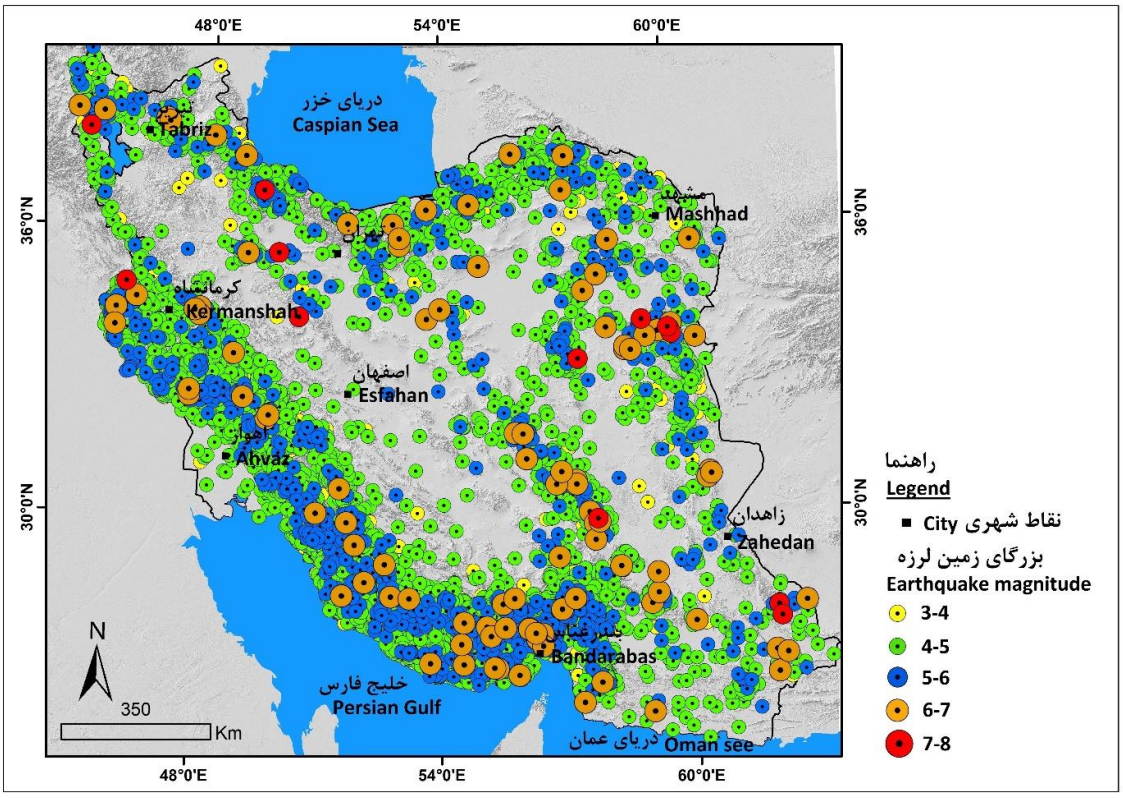
۳-نتایج

۳-۱-آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران

الف) وضعیت کلی زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران

1 . Euclidean Distance

موقعیت زمین‌شناسی ایران سبب پتانسیل بالای لرزه‌خیزی آن شده است. مطالعه صورت گرفته نشان داده است که ایران ازجمله ده کشور لرزه‌خیز دنیا محسوب می‌شود. نتایج آنالیز زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۲-۱۲۸۶) نشان داده است که در ایران ۷۱۳۹ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر ثبت شده است. آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های ثبت شده نشان داده است که بخش زیادی از این زمین‌لرزه‌ها در نوار زاگرس ازجمله در حدفاصل شهرهای اهواز تا بندرعباس رخ داده است و مناطق مجاور شهر اصفهان دارای کم‌ترین تعداد کانون‌های زمین‌لرزه بوده است (شکل ۱). در ادامه به پراکنش مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده بر اساس ریشتر پرداخته شده است.



شکل ۱- نقشه کانون زمین‌لرزه‌های ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Fig.1. Map of the epicenter of earthquakes in Iran during the years 1907 to 2023

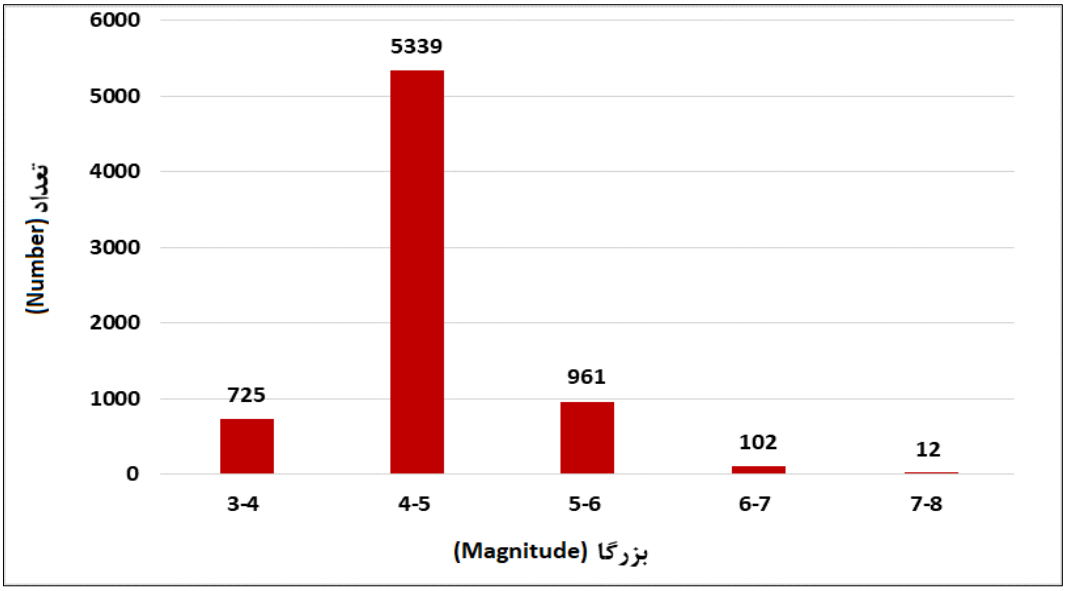
نتایج آنالیزهای صورت گرفته در این بخش نشان داده است (جدول ۱ و شکل ۲) که بخش زیادی از زمین-لرزه‌های ثبت شده دارای بزرگای بین ۴ تا ۵ ریشتر بوده است (حدود ۷۵ درصد از زمین‌لرزه‌های رخ داده). همچنین ۱۲ زمین‌لرزه نیز دارای بزرگای بیش از ۷ ریشتر بوده است (حدود ۰/۲ درصد از زمین‌لرزه‌های رخ داده) که با توجه به دوره زمانی موردمطالعه می‌توان گفت که حدوداً هر ۱۰ سال یک‌بار، یک زمین‌لرزه با

بزرگای بیش از ۷ ریشتر در ایران رخ داده است. نکته قابل‌توجه در این بخش، موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های بالای ۷ ریشتر بوده است که برخلاف سایر زمین‌لرزه‌ها، بیش‌ترین پراکنش آن‌ها مربوط به مناطق شرقی و شمال غربی کشور بوده است، درحالی‌که زمین‌لرزه‌ها با بزرگای کم‌تر، در مناطق جنوبی غربی کشور دارای بیش‌ترین میزان تراکم بوده‌اند؛ بنابراین می‌توان گفت که از نظر کمی و تعداد کانون‌های زمین‌لرزه، مناطق جنوب غربی کشور دارای بیش‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند ولی از نظر زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۷ ریشتر، مناطق شرقی و شمال غربی کشور دارای بالاترین پتانسیل هستند.

جدول ۱- تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران به تفکیک ریشتر در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Table 1- Number of earthquakes that occurred in Iran by Richter magnitude during the years 1907 to 2023

7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	بزرگا Magnitude
12	102	961	5339	725	تعداد Number
0/2	1/4	13/5	74/8	10/2	درصد percent

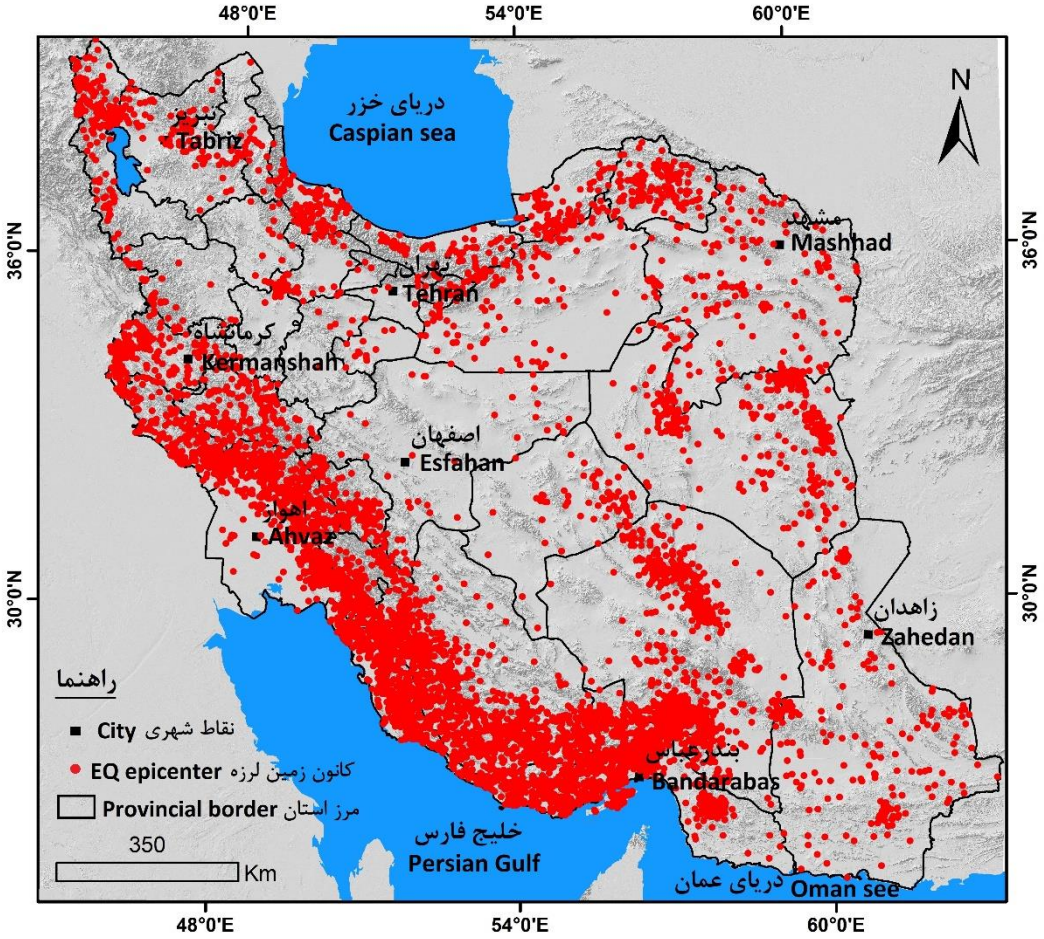


شکل ۲- نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران به تفکیک ریشتر در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Fig.2. Diagram of the number of earthquakes that occurred in Iran by Richter magnitude during the years 1907 to 2023

ب) وضعیت تراکم کانون‌های زمین‌لرزه بر مبنای تقسیمات سیاسی

وضعیت زمین‌شناسی ایران و پراکنش خطوط گسل اصلی آن سبب شده است تا پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در مناطق مختلف آن یکسان نباشد. بر این اساس در این بخش به بررسی وضعیت تراکم کانون‌های زمین‌لرزه بر مبنای تقسیمات سیاسی پرداخته شده است (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه وضعیت توزیع کانون‌های زمین‌لرزه بر مبنای تقسیمات سیاسی

Fig.3. Map of the distribution of earthquake epicenters based on political divisions

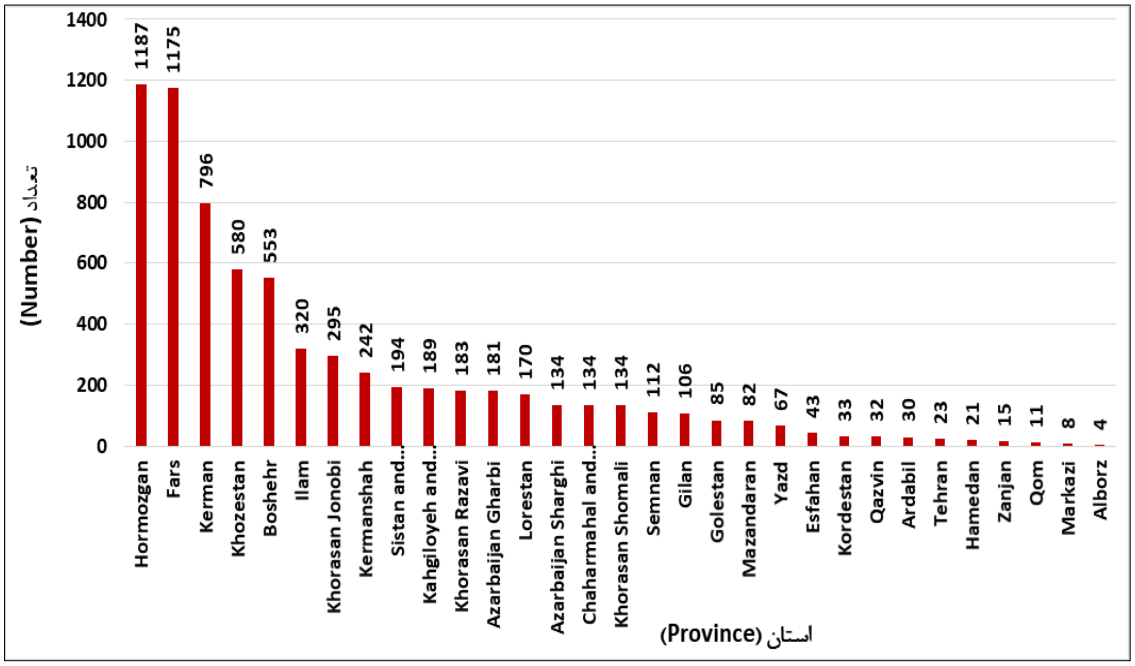
بررسی وضعیت پراکنش کانون‌های زمین‌لرزه در استان‌های مختلف کشور نشان داده است که بیش‌ترین تعداد کانون‌های زمین‌لرزه مربوط به استان‌های هرمزگان، فارس و کرمان بوده است به‌طوری‌که در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ در این استان‌ها به ترتیب ۱۱۸۷، ۱۱۷۵ و ۷۹۶ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر ثبت شده است. همچنین کم‌ترین تعداد کانون‌های زمین‌لرزه به ترتیب با ۴، ۸ و ۱۱ کانون، مربوط به استان‌های البرز، مرکزی و قم بوده است (جدول ۲ و شکل ۴).

جدول ۲- تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده به تفکیک استان‌های کشور

Table 2- Number of earthquakes that occurred by province of the country

ردیف Row	استان Province	3-4	4-5	5-6	6-7	7 >	مجموع Total
1	آذربایجان غربی (Azarbaijan Gharbi)	11	139	28	2	1	181
2	آذربایجان شرقی (Azarbaijan Sharghi)	17	96	19	2	0	134
3	اردبیل (Ardabil)	5	21	3	1	0	30
4	اصفهان (Esfahan)	2	36	5	0	0	43
5	البرز (Alborz)	0	2	2	0	0	4
6	ایلام (Ilam)	15	258	45	2	0	320
7	بوشهر (Boshehr)	64	439	49	1	0	553
8	تهران (Tehran)	2	19	2	0	0	23
9	چهارمحال و بختیاری (Chaharmahal and Bakhtiary)	12	106	16	0	0	134
10	خراسان جنوبی (Khorasan Jonobi)	28	210	46	8	3	295
11	خراسان رضوی (Khorasan Razavi)	14	122	41	5	1	183
12	خراسان شمالی (Khorasan Shomali)	12	106	14	2	0	134
13	خوزستان (Khozestan)	50	470	57	3	0	580
14	زنجان (Zanjan)	2	13	0	0	0	15
15	سمنان (Semnan)	7	86	16	3	0	112
16	سیستان و بلوچستان (Sistan and Balochestan)	7	139	37	9	2	194
17	فارس (Fars)	170	835	160	10	0	1175
18	قزوین (Qazvin)	0	24	6	1	1	32
19	قم (Qom)	0	6	5	0	0	11
20	کردستان (Kordestan)	4	25	۴	0	0	33
21	کرمان (Kerman)	94	588	98	15	1	796
22	کرمانشاه (Kermanshah)	9	196	30	6	1	242
23	کهگیلویه و بویراحمد (Kahgiloyeh and boyerahmad)	16	145	26	2	0	189
24	گلستان (Golestan)	4	63	16	2	0	85

106	1	1	16	86	2	گیلان (Gilan)	25
170	0	1	17	139	13	لرستان (Lorestan)	26
82	0	5	12	595	6	مازندران (Mazandaran)	27
8	1	0	2	3	2	مرکزی (Markazi)	28
1187	1	19	174	840	154	هرمزگان (Hormozgan)	29
21	0	0	3	18	0	همدان (Hamedan)	30
67	0	2	12	50	3	یزد (Yazd)	31

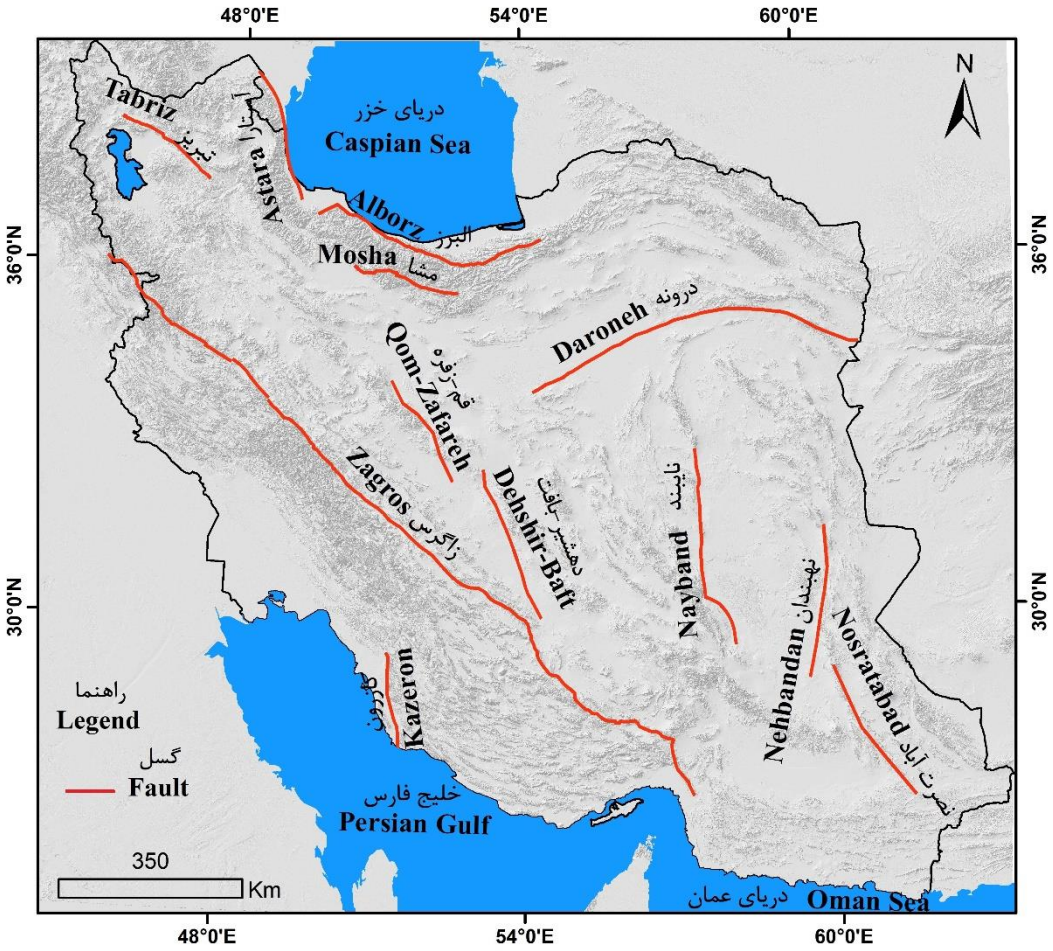


شکل ۴- نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده به تفکیک استان‌های کشور

Fig.4. Diagram of the number of earthquakes that occurred by province of the country

ج) وضعیت تراکم کانون‌های زمین‌لرزه در مجاورت خطوط گسل اصلی

با توجه به اینکه دلیل اصلی زمین‌لرزه، فعالیت گسل‌هاست، در این بخش به بررسی وضعیت پراکنش کانون‌های زمین‌لرزه در مجاورت گسل‌های اصلی ایران و سپس آنالیز مکانی آن‌ها پرداخته شده است. به‌منظور انجام این کار، ابتدا نقشه موقعیت ۱۲ گسل اصلی ایران تهیه شده است (شکل ۵) و سپس موقعیت کانون زمین‌لرزه‌های ثبت شده در حریم ۱۰۰ کیلومتری این گسل‌ها استخراج شده است. پس از استخراج کانون‌های زمین‌لرزه، به تشریح وضعیت مکانی کانون‌های زمین‌لرزه در حریم هر گسل پرداخته شده است.



شکل ۵- نقشه موقعیت گسل‌های اصلی ایران

Fig.5. Map of the location of Iran's main faults

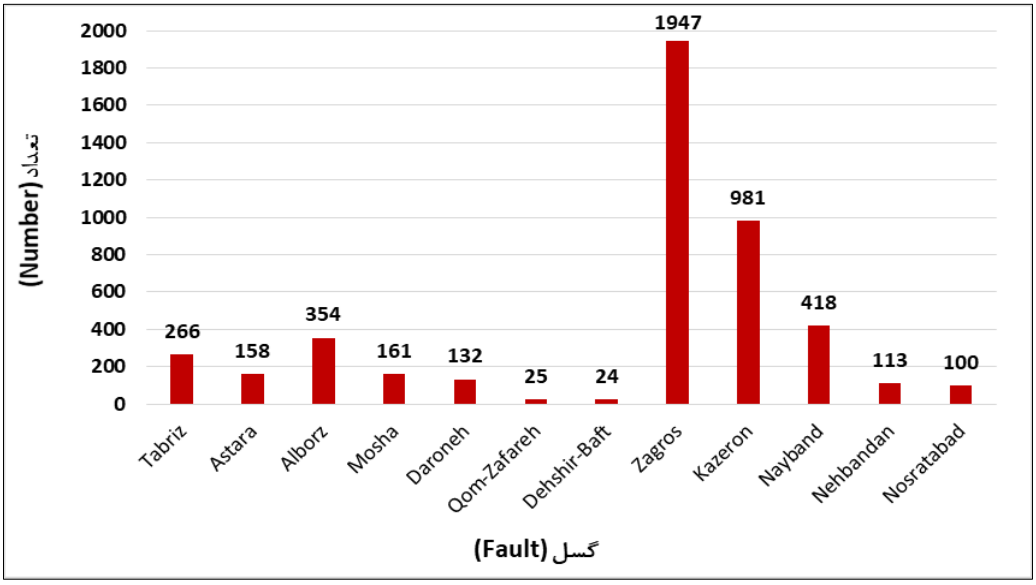
بر اساس نتایج حاصله (جدول ۳ و شکل ۶)، در طی دوره زمانی موردمطالعه، ۲۶۶ زمین‌لرزه در حریم گسل تبریز، ۱۵۸ زمین‌لرزه در حریم گسل آستارا، ۳۵۴ زمین‌لرزه در حریم گسل البرز، ۱۶۱ زمین‌لرزه در حریم گسل مشا، ۱۳۲ زمین‌لرزه در حریم گسل درونه، ۲۵ زمین‌لرزه در حریم گسل قم –زفره، ۲۴ زمین‌لرزه در حریم گسل دهشیر–بافت، ۱۹۴۷ زمین‌لرزه در حریم گسل زاگرس، ۹۸۱ زمین‌لرزه در حریم گسل کازرون، ۴۱۸ زمین‌لرزه در حریم گسل نایبند، ۱۱۳ زمین‌لرزه در حریم گسل نهبندان و ۱۰۰ زمین‌لرزه در حریم گسل نصرت‌آباد رخ داده است. نتایج آنالیز زمین‌لرزه‌های رخ داده نشان داده است که بالاترین تراکم زمین‌لرزه در مجاورت گسل اصلی زاگرس و گسل کازرون رخ داده است. همچنین از نظر بزرگا، درصد وقوع زمین‌لرزه–های با بزرگای بیش از ۶ ریشتر در حریم گسل نایبند بیش از سایر گسل‌ها بوده است. با توجه به موارد

مذکور می‌توان گفت که گسل اصلی زاگرس سبب وقوع زمین‌لرزه‌های زیادی شده است ولی گسل نایبند نقش مهمی در وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالا داشته است.

جدول ۳- تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در شعاع ۱۰۰ کیلومتری گسل‌های اصلی کشور

Table 3- Number of earthquakes occurring within a 100 km radius of the country's main faults

ردیف Row	بزرگا Magnitude	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	مجموع Total
1	تبریز (Tabriz)	27	193	40	5	1	266
2	آستارا (Astara)	9	124	22	2	1	158
3	البرز (Alborz)	16	281	49	7	1	354
4	مشا (Mosha)	11	120	25	4	1	161
5	درونه (Daroneh)	3	93	29	7	0	132
6	قم_زفره (Qom-Zafareh)	1	18	5	0	1	25
7	دهشیر_بافت (Dehshir-Baft)	2	18	4	0	0	24
8	زاگرس (Zagros)	204	1457	۲۵۹	۲۶	1	1947
9	کازرون (Kazeron)	115	749	112	5	0	981
10	نایبند (Nayband)	42	319	45	10	2	418
11	نهبندان (Nehbandan)	7	77	24	5	0	113
12	نصرت‌آباد (Nosratabad)	5	70	20	5	0	100



شکل ۶- نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در شعاع ۱۰۰ کیلومتری گسل‌های اصلی کشور

Fig.6. Graph of the number of earthquakes occurring within a 100 km radius of the country's main faults

۳-۲-آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران

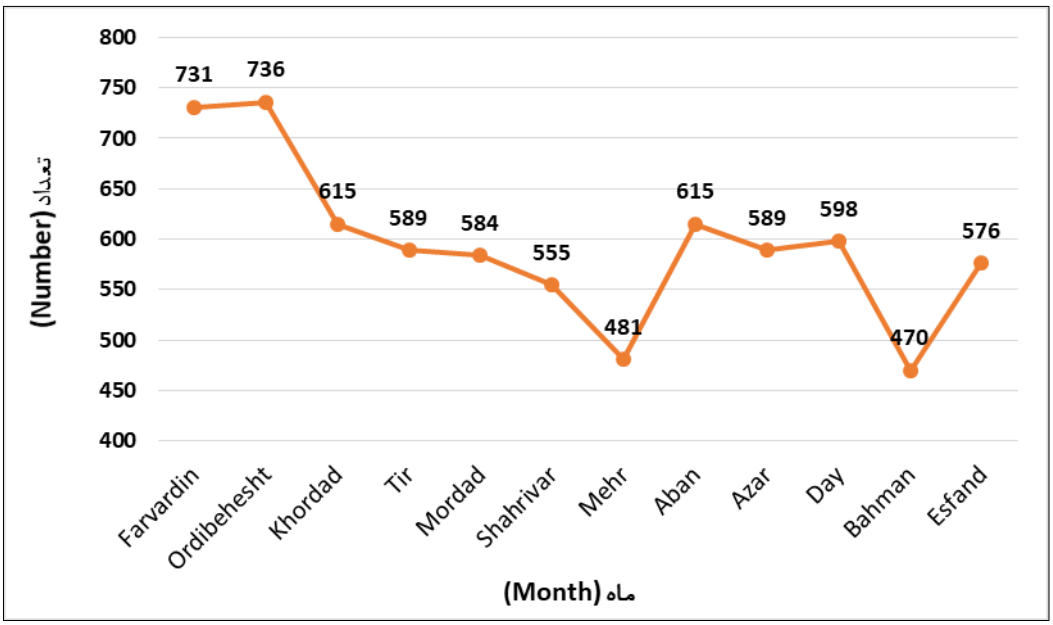
الف) آنالیز زمین‌لرزه‌های رخ داده در طی ماه‌های مختلف

در این پژوهش علاوه بر آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های ثبت شده، به آنالیز زمانی آن‌ها نیز پرداخته شده است. اهمیت بررسی این موضوع به دلیل بررسی تأثیر عوامل مختلفی مانند وضعیت اقلیمی، خشکسالی و غیره بر وضعیت زمین‌لرزه‌ها بوده است. همچنین از نتایج آنالیز این بخش می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مختلف قبل از زمین‌لرزه ازجمله اسکان موقت و غیره استفاده کرد. نتایج حاصله از آنالیز زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ماه‌های مختلف نشان داده است که ماه‌های اردیبهشت و فروردین به ترتیب با ۷۳۶ و ۷۳۱ زمین‌لرزه، دارای بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه ثبت شده بوده‌اند. همچنین کم‌ترین تعداد زمین‌لرزه نیز به ترتیب با ۴۷۰ و ۴۸۱ زمین‌لرزه مربوط به ماه‌های بهمن و مهر بوده است (جدول ۴). با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که در یک روند کلی، ماه‌های اردیبهشت و فروردین دارای بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه بوده‌اند و سپس تعداد زمین‌لرزه‌ها تا ماه بهمن دارای روند کاهشی است (شکل ۷).

جدول ۴- تعداد و درصد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ماه‌های مختلف سال در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Table 4- Number and percentage of earthquakes occurring in different months of the year during the years 1907-2023

درصد percent	مجموع Total	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	ماه Month
10/2	731	2	12	97	530	90	فروردین (Farvardin)
10/3	736	2	8	99	538	89	اردیبهشت (Ordibehesht)
8/6	615	1	7	72	475	60	خرداد (Khordad)
8/3	589	0	10	78	458	43	تیر (Tir)
8/2	584	1	7	91	441	44	مرداد (Mordad)
7/8	555	3	10	98	390	54	شهریور (Shahrivar)
6/7	481	0	3	62	362	54	مهر (Mehr)
8/6	615	1	11	74	484	45	آبان (Aban)
8/3	589	1	11	79	437	61	آذر (Azar)
8/4	598	0	5	85	451	57	دی (Day)
6/6	470	1	5	54	364	46	بهمن (Bahman)
8/1	576	0	13	72	409	82	اسفند (Esfand)



شکل ۷- نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ماه‌های مختلف سال در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Fig.7. Graph of the number of earthquakes occurring in different months of the year during the years 1907-2023

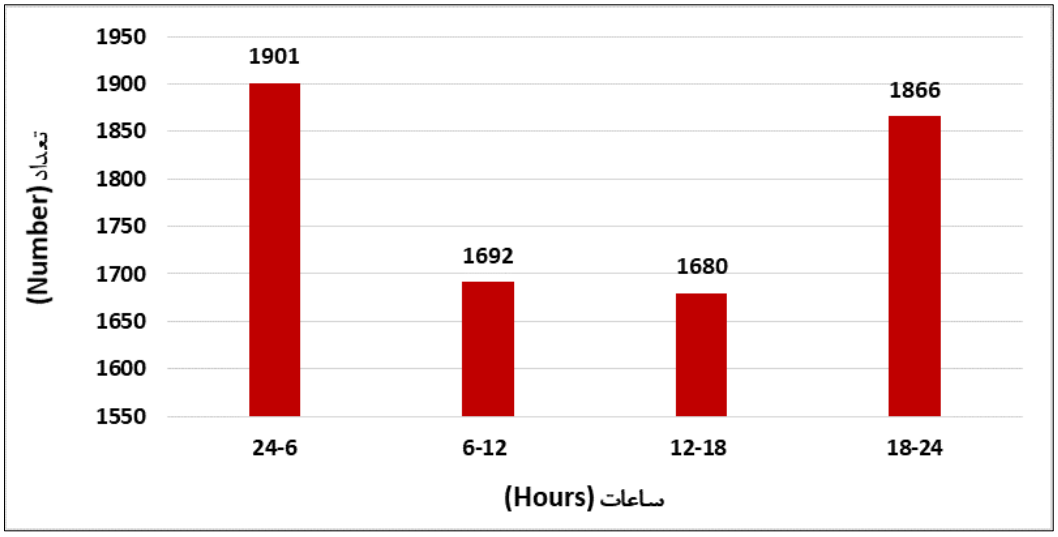
ب) آنالیز زمین‌لرزه‌های ایران در طی ساعات مختلف شبانه‌روز

ساعت وقوع زمین‌لرزه از نظر میزان خسارات خصوصاً خسارات جانی بسیار حائز اهمیت است. به‌طور-معمول، زمین‌لرزه‌هایی که در شب رخ می‌دهند، با خسارات جانی زیادی همراه هستند. همچنین در خصوص ساعات وقوع زمین‌لرزه نیز شایعات و سؤالات زیادی وجود دارد. با توجه به اهمیت موضوع، در این بخش به بررسی فراوانی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ساعات مختلف شبانه‌روز پرداخته شده است که برای این منظور، ابتدا به بررسی تعداد زمین‌لرزه‌ها رخ داده در ساعات ۲۴ تا ۶، ۶ تا ۱۲، ۱۲ تا ۱۸ و ۱۸ تا ۲۴ پرداخته شده است. مجموع نتایج حاصله از این بخش نشان داده است که تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ساعات مختلف شبانه‌روز دارای تفاوت محسوسی بوده است. بر اساس نتایج حاصله، بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده با ۱۹۰۱ مورد مربوط به ساعات ۲۴ تا ۶ بوده است و بعد از آن نیز با ۱۸۶۶ مورد مربوط به ساعات ۱۸ تا ۲۴ بوده است (جدول ۵ و شکل ۸). بر این اساس می‌توان گفت که ۳۷۶۷ زمین‌لرزه در شب رخ داده است که معادل ۵۲/۸ درصد از کل زمین‌لرزه‌های ثبت شده بوده است. با توجه به موارد ذکر شده، تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در شب بیش از زمین‌لرزه‌های رخ داده در طول روز بوده است.

جدول ۵- تعداد و درصد زمین‌لرزه‌های رخ داده در طول شبانه‌روز

Table 5- Number and percentage of earthquakes occurring during the day

ساعات	24-6	6-12	12-18	18-24
تعداد زمین‌لرزه Number of earthquakes	1901	1692	1680	1866
درصد percent	26/6	23/7	23/5	26/1



شکل ۸- تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در طول شبانه‌روز

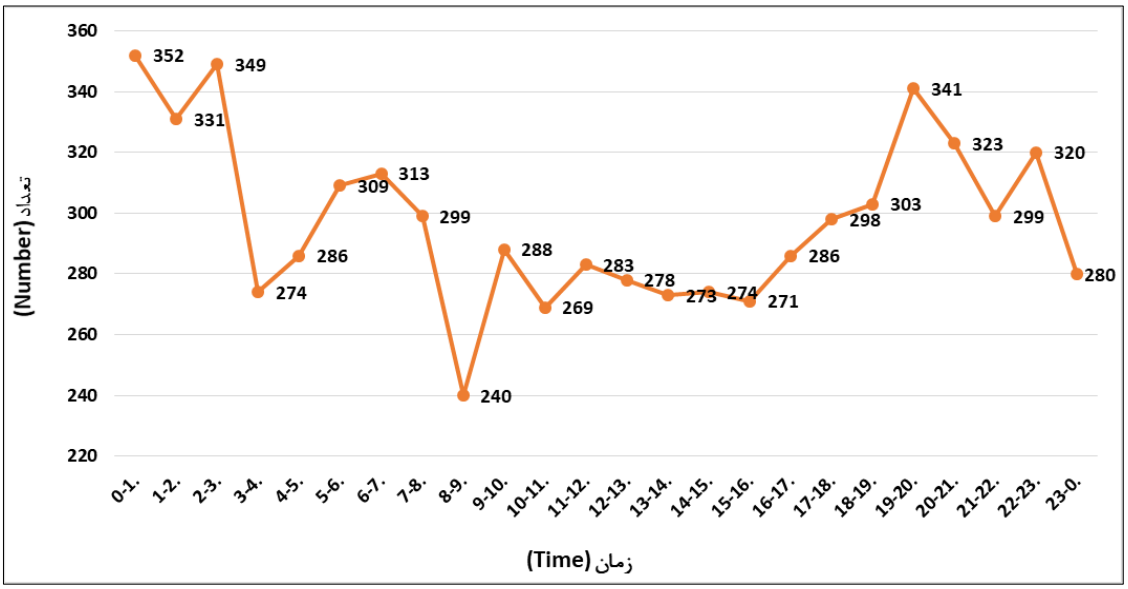
Fig.8. Number of earthquakes occurring during the day

علاوه بر بررسی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در کلاس‌های مختلف، در این بخش به بررسی تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در هر ساعت از شبانه‌روز پرداخته شده است. بر اساس نتایج حاصله، بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه با ۳۵۲ مورد مربوط به ساعت ۲۴ تا ۱ بوده است و بعد از آن نیز با ۳۴۹ و ۳۴۱ مورد به ترتیب مربوط به ساعات ۲ تا ۳ و ۱۹ تا ۲۰ بوده است. همچنین کم‌ترین تعداد زمین‌لرزه با ۲۴۰ مورد مربوط به ساعت ۸ تا ۹ بوده است و بعد از آن به ترتیب با ۲۶۹ و ۲۷۱ مورد مربوط به ساعات ۱۰ تا ۱۱ و ۱۵ تا ۱۶ بوده است (جدول ۶). با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که در ساعات اولیه بامداد بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه و در ساعات اولیه صبح نیز کم‌ترین تعداد زمین‌لرزه رخ داده است (شکل ۹).

جدول ۶- تعداد و درصد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ساعات مختلف شبانه‌روز در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Table 6- Number and percentage of earthquakes occurring at different times of the day during the years 1907-2023

ردیف	زمان	تعداد	درصد
Row	**Time**	**Number**	**percent**
1	0(24)-1	352	4/9
2	1-2	331	4/6
3	2-3	349	4/9
4	3-4	274	3/8
5	4-5	286	4
6	5-6	309	4/3
7	6-7	313	4/4
8	7-8	299	4/2
9	8-9	240	3/4
10	9-10	288	4
11	10-11	269	3/8
12	11-12	283	4
13	12-13	278	3/9
14	13-14	273	3/8
15	14-15	274	3/8
16	15-16	271	3/8
17	16-17	286	4
18	17-18	298	4/2
19	18-19	303	4/2
20	19-20	341	4/8
21	20-21	323	4/5
22	21-22	299	4/2
23	22-23	320	4/5
24	23-24	280	3/9

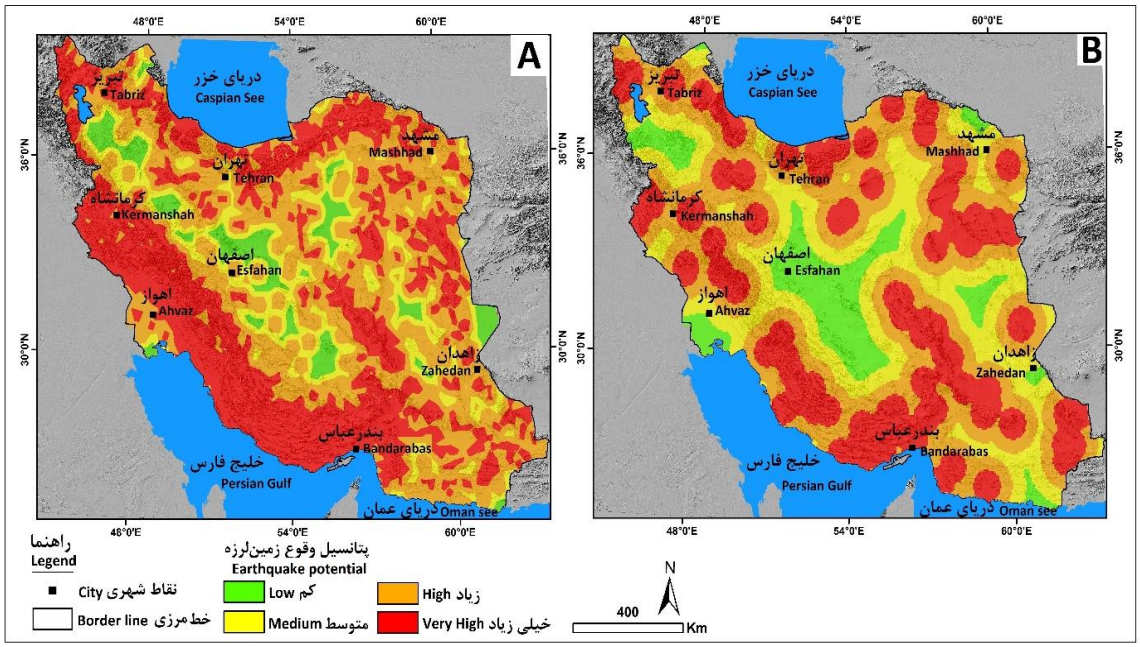


شکل ۹- تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در ساعات مختلف شبانه‌روز در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳

Fig.9. Number of earthquakes occurring at different times of the day during the years 1907-2023

۴-بحث

موقعیت زمین‌شناسی ایران سبب شده است تا بخشی‌های زیادی از آن در معرض مخاطره زمین‌لرزه باشد. نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که بعضی از مناطق دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بیش‌تری هستند و همچنین بعضی از مناطق نیز در معرض زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ ریشتر قرار دارند. در این بخش بر مبنای زمین‌لرزه‌های ثبت شده، با استفاده از روش تحلیل فضایی فاصله اقلیدوسی، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه در ایران تهیه شده است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۳ ریشتر (شکل ۱۰: A)، مناطق جنوب غربی کشور، منطبق بر ارتفاعات زاگرس دارای بالاترین پتانسیل لرزه-خیزی هستند و بعد از آن نیز نوار شمالی کشور دارای بالاترین پتانسیل هستند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ ریشتر (شکل ۱۰: B)، بخش‌های زیادی از کشور، خصوصاً مناطق شرقی و شمالی کشور، در معرض وقوع زمین‌لرزه قرار دارند. همچنین بر اساس نقشه‌های تهیه شده، مناطق مرکزی کشور، خصوصاً مناطق مجاور شهر اصفهان، دارای کم‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند.



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه در ایران A) با بزرگای بیش از ۳ ریشتر B) با بزرگای بیش از ۶ ریشتر

Fig.10. Earthquake risk zoning map in Iran A) Magnitude greater than 3 on the Richter scale B) Magnitude greater than 6 on the Richter scale

در این پژوهش همچنین وضعیت پراکنش زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران ارزیابی شد. مجموع نتایج حاصله نشان داده است که ساعات اولیه بامداد و همچنین ماه‌های اردیبهشت و فروردین، دارای بیش‌ترین فراوانی زمین‌لرزه بوده‌اند. البته لازم به ذکر است که بر خلاف بسیاری از شایعاتی که گفته می‌شود زمین‌لرزه-ها در شب رخ می‌دهند، نتایج این پژوهش نشان داده است که اختلاف خیلی زیادی بین زمین‌لرزه‌های رخ داده در شب (۵۲/۸ درصد) و زمین‌لرزهای رخ داده در روز (۴۷/۲ درصد) وجود نداشته است.

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران در طی سال‌های ۱۲۸۶ تا ۱۴۰۲ مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله، در طی دوره زمانی موردمطالعه، ۷۱۳۹ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر در ایران ثبت شده است که ۱۲ زمین‌لرزه بیش از ۷ ریشتر بزرگا داشته‌اند (بر این اساس حدوداً هر ۱۰ سال یک بار شاهد یک زمین‌لرزه بیش از ۷ ریشتری در ایران بوده‌ایم). نتایج آنالیز مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده نشان داده است که از نظر کمی و تعداد کانون‌های زمین‌لرزه، مناطق جنوب غربی کشور دارای بیش‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند ولی از نظر زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۷ ریشتر، مناطق شرقی و شمال غربی کشور دارای بالاترین پتانسیل هستند. نتایج آنالیز زمین‌لرزه‌های رخ داده بر اساس تقسیمات سیاسی نشان داده

است که بیش‌ترین تعداد کانون‌های زمین‌لرزه مربوط به استان‌های هرمزگان، فارس و کرمان بوده است به‌طوری‌که در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ در این استان‌ها به ترتیب ۱۱۸۷، ۱۱۷۵ و ۷۹۶ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر ثبت شده است. همچنین کم‌ترین تعداد کانون‌های زمین‌لرزه به ترتیب با ۴، ۸ و ۱۱ کانون، مربوط به استان‌های البرز، مرکزی و قم بوده است. نتایج آنالیز مکانی زمین‌لرزه نسبت به گسل‌های اصلی نیز نشان داده است که بالاترین تراکم زمین‌لرزه در مجاورت گسل اصلی زاگرس و گسل کازرون رخ داده است. همچنین از نظر بزرگا، درصد وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ ریشتر در حریم گسل نایبند بیش از سایر گسل‌ها بوده است. با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت که گسل اصلی زاگرس سبب وقوع زمین‌لرزه‌های زیادی شده است ولی گسل نایبند نقش مهمی در وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالا داشته است. همچنین نتایج حاصله از تحلیل فضایی زمین‌لرزه‌های رخ داده نشان داده است که مناطق جنوب غربی کشور دارای بالاترین پتانسیل لرزه‌خیزی و مناطق مرکزی کشور، خصوصاً مناطق مجاور شهر اصفهان، دارای کم‌ترین پتانسیل لرزه‌خیزی هستند. در این پژوهش همچنین به آنالیز زمانی زمین‌لرزه‌های رخ داده نیز پرداخته شد. نتایج حاصله از آنالیز زمانی زمین‌لرزه در ماه‌های مختلف نشان داده است که بیش‌ترین زمین‌لرزه‌ها در طی ماه‌های اردیبهشت و فروردین بوده است و در یک روند کلی، تعداد زمین‌لرزه‌ها از ماه اردیبهشت تا ماه بهمن دارای روند کاهشی بوده است. همچنین نتایج آنالیز زمین‌لرزه‌های ثبت شده نشان داده است که بیش‌ترین تعداد زمین‌لرزه‌ها در طی ساعات ۲۴ تا ۶ بوده است و کم‌ترین آن در طی ساعات ۶ تا ۱۲ بوده است و در یک روند کلی، تعداد زمین‌لرزه‌ها از ساعات اولیه ظهر تا ساعات ۲۴ دارای روند افزایشی و از ساعت ۲۴ تا ظهر دارای روند کاهشی بوده است. مجموع نتایج حاصله نشان داده است که ساعات اولیه بامداد و همچنین ماه‌های اردیبهشت و فروردین، دارای بیش‌ترین فراوانی زمین‌لرزه بوده‌اند.

References

Agha Nabati, S. A. (2004). *Geology of Iran*. Tehran: Publications of the Geology and Mineral Exploration Organization of the Country. **[**In Persian]

Aloisio, A., Rosso, M. M., De Leo, A. M., Fragiacomo, M., & Basi, M. (2023). Damage classification after the 2009 L'Aquila earthquake using multinomial logistic regression and neural network. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96, 103959. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103959

Bodenmann, L., Reuland, Y., & Stojadinovic, B. (2023). Dynamic post-earthquake updating of regional damage estimates using Gaussian Processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 234,109201. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109201

Bossard, A. (2014). Analysis of the Poisson distribution applicability to the Japanese seismic activity. *International Journal of Data Science, 3*(1), 1- 18. https://doi.org/10.1504/IJDS.2018.090627

Dias, V. H. A., Papa, A. R. R., & Ferreira, D. S. R. (2019). Analysis of temporal and spatial distributions between earthquakes in the region of California through Non-Extensive Statistical Mechanics and its limits of validity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 529, 121471. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121471

Ganjaeian, H. (2019). *Geomorphological hazards of urban areas, study methods and control strategies*. Entebbe Publishing. [In Persian]

Giannaraki, G., Kassaras, I., Roumelioti, Z., Kazantzidou-Firtinidou, D., & Ganas, A. (2019). Correction to: Deterministic seismic risk assessment in the city of Aigion (W. Corinth Gulf, Greece) and juxtaposition with real damage due to the 1995 Mw6.4 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 635–636. https://doi.org/10.1007/s10518-018-0487-5

Goorabi, A., & Emami, K. (2018). Neotectonics influences on morphological variations of Makran costal basins, SE Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, *6*(1), 74-89. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.1.5.2

Hashemi, M., & Ali-Mohammadi Sarab, A. (2010). Investigating spatial-temporal patterns in data related to historical earthquakes in Iran, using spatial statistics indices and models. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 2(2), 55-70. [In Persian] https://gisj.sbu.ac.ir/article_94494.html

McCalpin, J. P. (2013). Neotectonics. In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_252

Moradi, H., Amir Ahmadi, A., Goli Mokhtari, L., & Zandi, R. (2022). Statistical study and evaluation of effective factors in earthquake intensification based on GWR and OLS models (Study area: West of Kermanshah province). *Journal of Arid Regions Geographic Studies, 12*(46), 76-92. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161556.html?

Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y., & Aihara, K. (2013). Forecasting large aftershocks within one day after the main shock. *Scientific reports*, *3*(1), 2218. https://doi.org/10.1038/srep02218

Payandeh, Z., Servati, M., & Shafiei, F. (2018). Evaluation activities Neotectonics using geomorphic indicators (case study: Northwest Kabirkuh anticline). *Quantitative Geomorphological Research*, *4*(4), 104-118. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1395.4.4.7.0

Rajabi, Z., & Rezapour, M. (2019). *Analysis of aftershocks of the December 1, 2017 Hajdak earthquake in Kerman Province*. Paper presented of the 7th National Conference on Tectonics and Structural Geology of Iran, University of Tehran. [In Persian] https://tsg7.ut.ac.ir/paper?manu=38896

Rostami, S., Hashemi, S. N., & Ahmadi, M. (2017). Statistical Analysis of the Temporal Pattern of Seismicity in the Zagros Region. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, *4*(2), 1-14. [In Persian] http://www.bese.ir/article_240315.html

Roustaee, M., Zamani, B., Navabpour, P., & Moayyed, M. (2015). Investigation of the mechanism and neotectonics of the Siah Cheshmeh- Khoy fault zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, *24*(96), 221-234. [In Persian] https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41768

Saket, A., Fatemi Aqda, S. M., Fahimifar, A., & Sadeghi, H. (2020). Analysis and routing of basic parameters of foreshocks and aftershocks in Zohan earthquake, 2012 in south khorasan. *Journal of Engineering Geology*, *14*(4), 635-668. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jeg.14.4.635

Tahriri, M. H., & Saffari, H. (2023). Temporal and spatial changes in the seismicity parameters along Doruneh fault system. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, *33*(3), 85-96. [In Persian] https://doi.org/10.22071/gsj.2023.387658.2068

Tang, Y., Zhu, Z., Ba, Z., Lee, V.W., & Gong, W. (2023). Running safety assessment of trains considering post-earthquake damage state of bridge–track system. *Engineering Structures*, *287*, 116187. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116187

Wang, J. P., & Chang, S. C. (2015). Evidence in support of seismic hazard following Poisson distribution. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *424*, 207-216. http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.026

Wang, J. P., Huang, D., Chang, S. C., & Wu, Y. M. (2014). New evidence and perspective to the Poisson process and earthquake temporal distribution from 55,000 events around Taiwan since 1900. *Natural Hazards Review*, *15*(1), 38-47. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000110

Yang, Y., Tang, C., Tang, C., Chen, M., Cai, Y., Bu, X., & Liu, C. (2023). Spatial and temporal evolution of long-term debris flow activity and the dynamic influence of condition factors in the Wenchuan earthquake-affected area, Sichuan, China. *Geomorphology*, 435, 108755. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108755

Zamani, A., & Asadi, A. (2005). The numerical analysis of earthquake distrubution in several seismogenic regions of Iran. *Journal of Sciences(Islamic Azad University)*, *15*(57), 341-345. [In Persian] https://sid.ir/paper/70457/fa

Zandi, R., Zanganeh, M., & Moghadam, M. (2019). Evaluation, modeling, and prediction of urban development in Neyshabur with emphasis on earthquakes. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, *10*(36), 16-31. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161492.html

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.244-268 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.75404.1206 Open access

Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed

SeyedAsdollah Hejazi[a*], Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam[b], Jamshid Yarahmadi[c] Fariba Karami[a] , Ali Bigham[d]

[a] *Associate Professor in Geomorphology, Tabriz University of Tabriz, Tabriz, Iran.*
[b] *Professor in Geomorphology, Tabriz University of Tabriz, Tabriz, Iran.*
[c] *Professor in Geomorphology, agricultural research education and extension organization, Tabriz, Iran.*
[d] *PhD Candidate in Geomorphology, Tabriz University of Tabriz, Tabriz, Iran.*

Received: 18 June 2023 ***Revised: 23 August 2023*** ***Accepted: 6 September 2023***

Extended Abstract

Introduction

Climate changes have occurred throughout Earth's history. However, in recent years, human interference in the environment has accelerated temperature changes, leading to more pronounced climate shifts. According to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**,** the average global temperature increased by ±0.18 to 0.7°C over the past century (1906 to 2007) (IPCC, 2007). Furthermore, the Fifth Assessment Report (IPCC, 2013) indicates an increase of 0.85°C between 1901 and 2012**.** Global warming, with its numerous negative impacts on biological systems, is a critical issue today. To assess these changes at a regional level, detailed investigations using downscaling techniques are necessary. Among these, statistical downscaling models (e.g., SDSM) have proven effective for simulating and evaluating climate change impacts**.** Despite extensive research on downscaling, no prior study has specifically examined the exponential downscaling of maximum and minimum temperature and precipitation for the Hajiler watershed using IPCC's fifth report scenarios. Therefore, this study aims to simulate monthly temperature and precipitation parameters at Ahar synoptic station using the SDSM model under RCP scenarios and analyze their annual trends using the non-parametric Mann-Kendall test.

[*] .Corresponding author: SeyedAsdollah Hejazi Email: s.hejazi@tabrizu.ac.ir Tel:+989144039787

How to cite this Article: Hejazi, S. , Rezaei Moghaddam, M. H. , Karami, F. , Yarahmadi, J. , & Bigham, A. (2024). Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),244-268

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Material and Methods

This study employed the SDSM model (version 5.3) and three RCP scenarios (2.6, 4.5, and 8.5) from the IPCC Fifth Assessment Report**.** Climate data from Ahar synoptic station were used to simulate precipitation and temperature (maximum and minimum) across four time periods: the near future (2020-2039), mid-future (2040-2059, 2060-2079), and far future (2080-2099). In the first stage, daily data for precipitation and temperature from 1986 to 2005 were collected from the Meteorological Organization and underwent quality control. These data were then used in the SDSM model for monthly-scale simulations and compared with baseline observations.

The SDSM model incorporates three types of data for downscaling: daily observational data (predictand), NCEP reanalysis data (predictor), and large-scale forecast data from atmospheric general circulation models (GCMs). Predictor data from the CanESM2 model were sourced from the Environment Canada website. Large-scale daily time series data (1961-2005) for precipitation, maximum temperature, and minimum temperature were pre-processed in Excel and prepared for analysis in Notepad. Predictor variables suitable for the region were selected based on correlation with observational data and analyzed using the NCEP and CanESM2 datasets. Using these predictors, precipitation and temperature values for future scenarios **(**RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5**)** were simulated for the four study periods.

Results and Discussion

To predict temperature changes in the Hajiler watershed, the SDSM statistical downscaling model was used. The statistical relationship between observed and predictor variables was evaluated based on correlation coefficients**.** Among the 26 atmospheric variables tested, nceptempgl and ncepp500gl exhibited the highest correlation with temperature and precipitation data**.** Temperature data showed a stronger correlation with observational data than precipitation due to temperature's continuous nature and lower variability compared to precipitation, which is more influenced by anomalies.

After validating the model for the baseline period (1986-2005), climatic parameters were simulated for future periods under the RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios using the CanESM2 global model. The analysis revealed that climate change affects precipitation in two primary ways**:** changes in precipitation amount and changes in its temporal distribution**.** Results indicate that precipitation patterns will become increasingly irregular, with rainfall occurring during inappropriate seasons.

In terms of temperature trends, the model predicts a general increase in both maximum and minimum temperatures across all scenarios and time periods. This temperature rise is more pronounced during warmer months.

Conclusion

This study used the SDSM linear model and CanESM2 outputs under RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios to predict temperature and precipitation trends in the Hajiler watershed until 2100**.** Results showed that temperature data had a stronger correlation with observational data compared to precipitation, due to temperature's continuous and less variable nature.

The findings revealed a significant increasing trend in both maximum and minimum temperatures**,** alongside irregular rainfall patterns**.** Specifically, rainfall is projected to decrease during traditional rainy seasons while increasing during unseasonal months under certain scenarios.
In conclusion, the observed increases in temperature and irregular rainfall distribution emphasize the need for proactive measures in water resource management**,** watershed planning**,** and agriculture**.** These measures are essential to mitigate the adverse effects of climate change in the Hajiler watershed region.
This study highlights the efficacy of the SDSM model in climate parameter downscaling and underscores the importance of considering regional climate projections for sustainable environmental management.

Keywords: Climate Change Modeling, SDSM, RCP Scenarios, Statistical Downscaling, Temperature and Precipitation Trends.

How to cite this Article: Hejazi, S. , Rezaei Moghaddam, M. H. , Karami, F. , Yarahmadi, J. , & Bigham, A. (2024). Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),244-268


©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۲۶۸-۲۴۴

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/geoeh.2022.75404.1206

دسترسی آزاد

شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و سناریوهای RCP در حوضه آبخیز حاجیلر

سیداسدالله، حجازی[1] ـ دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

محمدحسین رضائی مقدم – استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

جمشید یاراحمدی- دانشیار ژئومورفولوژی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران.

فریبا کرمی– دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

علی بی‌غم– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۳/۲۸ تاریخ بازنگری:۱۴۰۲/۶/۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۶/۱۵

چکیده

مدل‌های ریزمقیاس نمایی به‌منظور تولید مقادیر بارش واقعی در یک محدوده محیطی از طریق شبیه‌سازی مجموعه داده‌های اتمسفری مورداستفاده قرار می‌گیرند. هدف از این پژوهش پیش‌بینی مقادیر عناصر اقلیمی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک اهر با مدل ریزمقیاس نمایی SDSM و با استفاده از خروجی مدل تغییر اقلیمی CanESM2 تحت سه سناریو RCP۲.۶ ، RCP۴.۵ و RCP ۸.۵ ریزمقیاس و برای چهار دوره ۱۸ ساله برای دوره‌های آینده ۲۰۷۹-۲۰۵۹،۲۰۶۰-۲۰۳۹،۲۰۴۰-۲۰۲۰ و ۲۰۸۰- ۲۰۹۹ بوده است. همچنین از شاخص‌های آماری میانگین جذر خطا مربع (RMSE) و میانگین خطای مطلق و (MAE) استفاده شده و بررسی روند سالانهٔ این تغییرات با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو–ویلک است. نتایج پیش‌بینی‌ها نشان داد در سناریوهای ۲.۶ RCP و ۴.۵ در فصل بهار کاهش بارش به میزان ۱۴ تا ۵ میلی‌متر در ایستگاه سینوپتیک اهر رخ می‌دهد همچنین متوسط دمای حداکثر از ۰/۱ تا ۱/۵۶ درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای حداقل از ۰/۴ تا ۱/۵۴ درجه سانتی‌گراد در هر سه سناریو در خلال دوره‌های زمانی افزایش خواهد یافت. از نظر روند تغییرات بارش فصلی در تمام سناریوها در فصول بارشی کاهش و در ماه‌های سرد افزایش داشته و در مورد عنصرهای دما در تمام سال این روند معنادار و افزایشی خواهد بود.

[1] - نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۰۳۹۷۸۷

Email:s.hejazi@tabrizu.ac.ir

کلیدواژه‌ها: مدلسازی تغییرات اقلیمی ، مدل SDSM ، سناریوهای RCP ، کوچک‌مقیاس‌سازی آماری ، روندهای دما و بارش.

۱-مقدمه

تغییرات اقلیمی در کرهٔ زمین در طول تاریخ همواره در حال رخداد بوده، اما با دخالت نابسامان انسان در محیط‌زیست در سال‌های اخیر، شرایط ویژه‌ای برای دگرگونی دما و در نتیجهٔ آن تغییرات اقلیمی فراهم شده است. طبق خروجی‌های مدل گردش عمومی جو[2] (GCM) دمای سطح زمین در کل جهان تا پایان قرن ۲۱ احتمالاً تا ۱/۵ درجه نسبت به دوره‌ی پایه‌ی ۱۹۰۰-۱۸۵۰ برای همه سناریوهای تعریف شده به‌جز یک سناریو افزایش خواهد یافت و البته این تغییرات در مناطق مختلف یکنواخت نخواهد بود.

علوی نیا (Alavinia, 2022) تمام مدل‌های AOGCMs مانند SDSM, LARS-WGS و غیره افزایش دما در سطح زمین و افزایش شدت بارش و مقدار آن بر اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را در قرن حاضر پیش‌بینی می‌کنند. هملت و لتنمایر (Hamlet & Lettenmaier, 2007) طبق گزارش‌های چهارم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم[3](IPCC) این افزایش دما به‌صورت متوسط در طی صدسال گذشته (۱۹۰۶ تا ۲۰۰۷) به میزان ۱۸/. ± تا ۷/. درجهٔ سانتی‌گراد (IPCC,2007) و طبق گزارش پنجم در طی سال‌های ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۲ به میزان ۸۵/. درجهٔ سانتی‌گراد بوده است (IPCC,2013). پدیده گرمایش زمین که اثرات متعددی منفی بر شرایط مختلف زیستی می‌گذارد امروزه حائز اهمیت زیادی است و برای تعین این تغییرات در هر منطقه‌ای نیاز به بررسی‌های دقیق در مقیاس‌های ریز می‌باشد که در این میان ریزمقیاس نمایی بر اساس مدل‌های مختلف چون SDSM از روش‌های متداول در این زمینه بوده و مطالعات خیلی زیادی در این زمینه صورت گرفته که همگی بر کارایی این مدل در شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم می‌باشد؛ به‌طوری‌که چو و همکاران (Chu, Xia, Xu & Singh, 2010) اقدام به ارزیابی این مدل در شبیه‌سازی دمای هوا، تبخیر، بارش و همچنین برخی رویدادهای حدی دما و بارش در ۱۱ ایستگاه هواشناسی در حوضه رودخانه‌های چین نمودند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت مناسب SDSM در ریزمقیاس نمایی بارش، دما و تبخیر بود. اگرچه در شبیه‌سازی رویدادهای حدی خطاهای سیستماتیک وجود داشت اما نتایج حاصل جهت کاربردهای عملی قابل‌قبول تشخیص داده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که طی ۳۹ سال آینده، اقلیم گرم‌تر و خشک‌تر و رویدادهای جدی شدیدتر خواهند بود.

خان و همکاران (Khan, Coulibaly & Dibike, 2006) طی مطالعه‌ای در SDSM به مقایسه عدم قطعیت دو مدل مولد آب‌وهوایی و ریزمقیاس نمای دمای بیشینه و کمینه روزانه و بارش روزانه مربوط به منطقه‌ای در

[2] -General Circulation Model
[3] -Intergovernmental Panel on Climate Change

شمال کانادا پرداخته‌اند. در این تحقیق از نظر عدم قطعیت، کارایی مدل رگرسیونی چند متغیره بهتر از عملکرد مدل مولد آب‌وهوایی بوده است. براون و همکاران (Brown, Sharp & Collura, 2016) در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دمای آب حوضه یاکواینا[4] در ایالت اورگان ایالات‌متحده در دوره ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ پیش‌بینی کردند که در هر دهه یک افزایشی در حدود ۰/۳ سانتی‌گراد خواهند داشت. یو و همکاران (Yue et al., 2016) با مدل‌های سری CMIP5 و با سناریوهای RCP در ۷۳۵ ایستگاه هواشناسی سراسر چین نشان دادند که میانگین دمای سالانه ۱/۸ درجه سانتی‌گراد کمتر از حد برآورد شده است. درحالی‌که میانگین بارش سالانه ۲۶۳ میلی‌متر بیشتر از داده‌های مشاهداتی در دوره‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ محاسبه شده است. علیزاده پهلوان و زهرایی (Alizadeh Pahlavan & Zahraei, 2014) با شبیه‌سازی داده‌های بارش در ایستگاه سد لتیان با مدل‌های SDSMو LARS-WG به این نتیجه رسیدند که در دورهٔ اخیر شدت بارش‌های حدی افزایش یافته است و این روند می‌تواند در بیست سال آینده نیز تداوم داشته باشد. احمدآبادی و صدیقی‌فر (Ahmedabadi & Sedighi Far, 2017) پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن، بر اساس مدل ریزمقیاس نمایی آماری در تحقیق حاضر بر اساس داده‌های وضع موجود ایستگاه‌های سینوپتیک کرج، مهرآباد و دوشان تپه با کمک مدل SDSM به پیش‌بینی دوره آماری ۲۰۱۶–۲۰۴۵ پرداختند. نتایج مطالعه ضمن تأیید کارایی هردو مدل SDSM در پیش‌بینی اقلیمی نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۱۶–۲۰۴۵ کاهش بارندگی، افزایش دما و کاهش تبخیر و تعرق واقعی محتمل است.

طاهری تیزرو و همکاران (Taheri Tizro, Khodamorad Pour & Mashhadian, 2017) با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2 و سناریوی RCP۴.۵ از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر بیلان آب سطحی در منطقه تویسرکان پرداختند. نتایج ارزیابی به عملکرد خوب مدل در برآورد بارندگی و دما اشاره داشت و پیش‌بینی بارندگی در ۱۰ سال آینده (۲۰۲۵ –۲۰۱۶) نشان از کاهش بارندگی در بیشتر بخش‌های حوضه دارد.

عساکره و اکبرزاده (Asakereh & Akbarzadeh, 2017) به شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز طی دوره (۲۰۱۰–۲۱۰۰) با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری (SDSM) و خروجی مدل CanESM2 اقدام کردند نتایج نشان می‌دهد تغییرات میانگین حداقل دمای ایستگاه تبریز در کلیه ماه‌ها به‌غیراز ماه نوامبر و دسامبر در دوره‌های آینده افزایش داشته است و حداقل دما در سه سناریوی موردبررسی برای سه دوره موردمطالعه افزایش می‌یابد. همچنین حداقل دما به‌طورکلی در تمام فصول افزایش می‌یابد که در فصل تابستان تا ۸ درجه نیز افزایش دما مشاهده می‌گردد.

[4] Yaquina

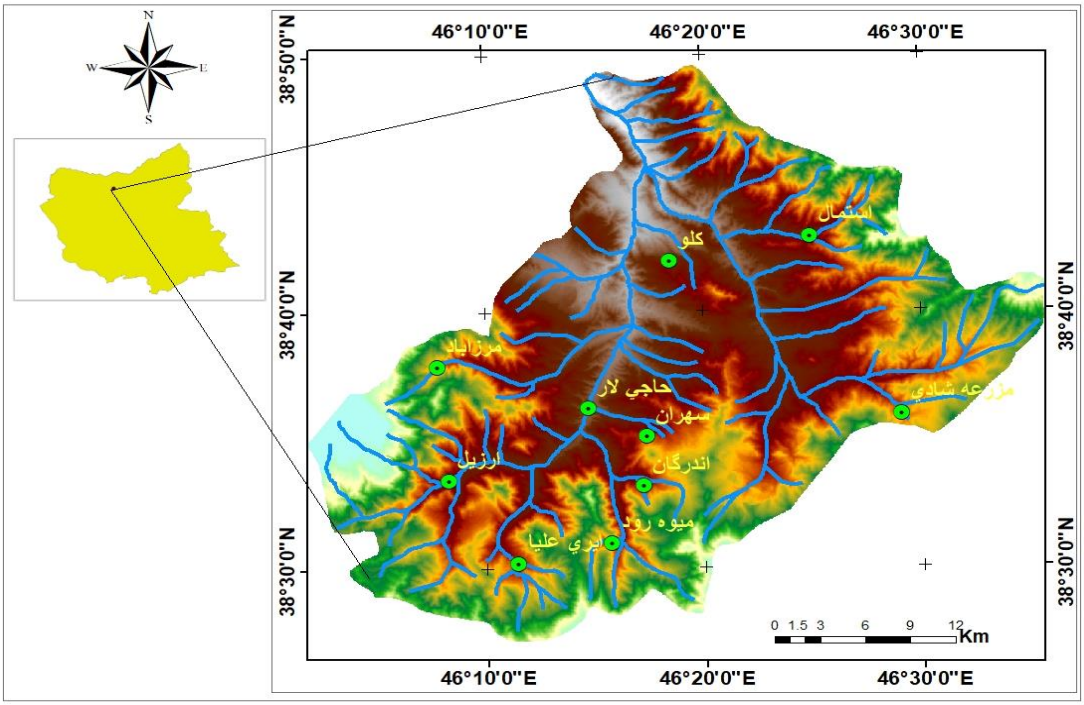
زارعی و همکاران (Zarei, Mohammadi & Bazgeer, 2019) اقدام به پیش‌بینی عناصر اقلیمی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک گرگان بر اساس سناریوهای RCP تا دوره زمانی ۲۰۷۱ کردند نتایج نشان داد در هر سه سناریو دمای حداکثر و حداقل دارایش روندی افزایشی و میزان بارش به‌طور محسوس و معناداری کاهشی می‌گردد.

با توجه به اینکه که تاکنون پژوهشی در رابطه با ریزمقیاس نمایی عناصر اقلیمی دمای حداکثر و حداقل و میزان بارش و شبیه‌سازی آن برای دوره‌های آتی در محدوده حوضه آبخیز حاجیلر بر اساس گزارش پنجم IPCC انجام نگرفته است، لذا این مقاله با دو هدف اصلی شبیه‌سازی ماهانهٔ پارامترهای دما و بارش ایستگاه سینوپتیک اهر در محدوده حوضه حاجیلر با مدل SDSM و تحت سناریوهای جدید انتشار (RCP) و بررسی روند سالانهٔ پارامترهای شبیه‌سازی شده با استفاده از آزمون ناپارامتری من کندال در طی دوره‌های آتی تهیه و اهداف موردبررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

حوضه آبخیز حاجیلر در استان آذربایجان شرقی با مساحت ۱۰۶۸۰۰ هکتار که از شاخه‌های اصلی رودخانه ارس می‌باشد در مختصات جغرافیایی طول '' ۴۶°۰۱'۴۸ تا'' ۴۶°۳۶'۱۳ شرقی و عرض''۳۸°۲۶'۱۳ تا'' ۳۸ ۴۹°'۳۹ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی کشور در محدوده شهرستان ورزقان و دهستان‌های آن جوشی، دیزم، سینا و ارزی می‌باشند. حداکثر ارتفاع موجود در منطقه ۳۲۵۸ متر و حداقل آن ۶۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۴۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه آن ۱۵.۸۰ درجه سانتی‌گراد است، از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن دارای اقلیم مدیترانه‌ای می‌باشد. این منطقه از آب‌های زیرزمینی غنی برخوردار است که از طریق رودخانه گل آخور به سطح آورده می‌شود این رودخانه بزرگ‌ترین محدوده اطراف و تنها رودخانه موجود در حوضه می‌باشد که از ارتفاعات آهکی جنوب غرب منطقه سرچشمه گرفته و از طریق بستر موجود و با جمع‌آوری آبراهه‌های فرعی در مرکز به سمت شمال به رودخانه ارس می‌ریزد.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه در استان

Fig.1. Location of the study area in the province

۲-۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نسخه ۵.۳ مدل SDSM و سه سناریو RCP۸.۵، RCP۴.۵ و RCP۲.۶ از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک اهر با هدف شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی بارش و دما (دماهای حداکثر، حداقل) در محدوده موردمطالعه در چهار بازهٔ زمانی آیندهٔ نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۲۰)، میانی (۲۰۶۰-۲۰۷۹،۲۰۴۰-۲۰۵۹) و آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۹۹)، استفاده گردید.

سناریوهای مذکور برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند در سناریوRCP8.5 بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست-های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت به‌طوری‌که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸.۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ppm ۱۰۰۰ رسیده و همچنان روند افزایش خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و موسسهIIASA به سرپرستی پروفسور کیوان ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است (Riahi et al., 2011).

سناریوی RCP۴.۵ توسط گروه Mini CAM طراحی شده است و در آن تابش ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۱.۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند (Asakereh & Akbarzadeh, 2017).

سناریوی انتشار RCP ۲.۶ توسط گروه مدل‌سازی AIM در موسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن طراحی گردید. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند (Jafary Godeneh, Salajeghe & Haghighi, 2020).

در واقع SDSM روش مولد هواشناسی آماری و توابع تغییر شکل یافته است. نرم‌افزار SDSM کوچک‌مقیاس کردن آماری متغیرهای اقلیمی روزانه را طی مراحل زیر انجام می‌دهد:

در این تحقیق در مرحله اول داده‌های روزانهٔ پارامترهای بارش و دما در دورهٔ آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ از سازمان هواشناسی تهیه و بعد از کنترل کیفی مرتب گردید سپس، با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی آماری ۵.۳ SDSM این پارامترهای اقلیمی در مقیاس ماهانه شبیه‌سازی و با داده‌های دورهٔ آماری پایه مقایسه گردید. در این مدل برای ریزمقیاس نمایی از سه نوع داده استفاده می‌شود: داده‌های مشاهداتی روزانه (پیش‌بینی شونده) داده‌های پیش‌بینی کنندهٔ مشاهداتی (NCEP) و نیز داده‌های پیش‌بینی کنندهٔ بزرگ‌مقیاس حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو در سه سناریو (CanESM2) از سایت محیط‌زیست کانادا اخذ گردید، که مشخصات آن در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- مختصات مدل (CanESM2)

Table 1- Coordinates of the model (CanESM2), (Charron, 2016)

نام مدل **Model Name**	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول*عرض) **Atmospheric Resolution (Degrees) (longitude*latitude)**	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول*عرض) **Oceanic Resolution (Degrees) (longitude*latitude)**	گروه مؤسس **Founding Group**	دورهٔ شبیه‌سازی تاریخی/ آینده **Historical/Future Simulation Period**	سناریوهای شبیه‌سازی **Simulation Scenarios**
Canesm2	2.81 × 2.81	1.41 ×.94	CCCMA کانادا Canada	1961-2005 2020–2100	RCP 2.6, 4.5, 8.5

کوچک‌مقیاس کردن آماری متغیرهای اقلیمی روزانه در مدل SDSM طی مراحل زیر انجام می‌گردد:

۱- تهیه، کنترل کیفیت و تغییر شکل داده‌ها، ۲- انتخاب متغیرهای مناسب پیش‌بینی کننده که دارای میزان همبستگی بالایی هستند،۳- کالیبره کردن داده‌ها با استفاده از پارامترهای مناسب تعیین شده در مدل، ۴- تولید مدل هواشناسی (با استفاده از پیش‌بینی کننده مشاهده‌ای)، ۵- آنالیز آماری داده‌ها در حالت مشاهده‌ای و ماهانه،۶- تهیه خروجی گرافیکی مدل و بررسی میزان همخوانی داده‌های مدل شده با مشاهده‌ای،۷- تولید سناریو اقلیمی در بازه زمانی مختلف.

در مرحله آماده‌سازی داده‌ها در مقیاس بزرگ مناسب حوضه آبخیز موردمطالعه داده‌های سری زمانی روزانه برای عناصر اقلیمی مطرح در این مدل‌سازی شامل بارش، حداکثر دما و حداقل دما در بازه زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ که حد تعریف شده برای شبیه‌سازی توسط سناریوهای مطرح می‌باشد، ابتدا در محیط اکسل کنترل،

تنظیم و سپس در محیط Notepad آماده گردید و داده‌های پیش‌بینی کننده اقلیمی NCEP و CanESM2 مناسب منطقه با توجه به موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز از نقشه جهانی موجود در سایت محیط‌زیست کانادا (CCSN) اخذ گردید. در مرحله دوم سنجش پارامترهای مناسب پیش‌بینی کننده از بین ۲۶ متغیر اتمسفری تعریف شده توسط NCEP و انتخاب متغیرهایی از میان آن‌ها که دارای همبستگی مناسب با داده-های مشاهده‌ای داشته از طریق کنترل پیش‌بینی کننده‌های گوناگون، میزان همبستگی آن‌ها و حذف مرحله‌ای متغیرهای با همبستگی ضعیف صورت گرفت. در این تحقیق به‌منظور بررسی میزان کارایی مدل دو معیار آماری میانگین قدر مطلق خطا (MAD[5]) و مجذور میانگین مربع خطا (RMSE[6]) مورداستفاده قرار گرفت. این معیارها بر اساس رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند

رابطه (۱)
$$MAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|At - Ft|}{n}$$

رابطه (۲)
$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(At - Ft)^2}}{n}$$

در این رابطه‌ها At داده‌های مشاهداتی، Ft داده‌های برآورده شده و n تعداد نمونه می‌باشد. RMSE و MAE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهندهٔ دقت بالای مدل است.

در ادامه با استفاده از پارامترهای به دست آمده از این رابطه، با به‌کارگیری متغیرهای بزرگ‌مقیاس حاصل از مدل canESM2 برای دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ استخراج شدند. سپس با معرفی این داده‌ها به مدلSDSM ، بارش، دمای حداکثر و حداقل تحت سه سناریو RCP۲.۶ ، RCP ۴.۵ و RCP ۸.۵ برای چهار دوره ۱۸ ساله ۲۰۷۹-۲۰۵۹،۲۰۶۰-۲۰۴۰،۲۰۳۹-۲۰۲۰ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ برای محدوده مطالعه تولید کرده و تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه موردبررسی قرار گرفت.

برای بررسی عملکرد نتایج شبیه‌سازی در این مدل از آزمون‌های آماری Kolmogorov–Smirnov (K-S) و Shapiro-Wilk استفاده شده است (Farajzadeh, Oji, Cannon, Ghavidel & Massah Bavani, 2015). نتیجه این آزمون، اگر این آزمون معنی‌دار بود (یعنی p کوچک‌تر از ۵ صدم بود)، به معنی این است که توزیع داده‌ها، نرمال نیست و می‌توان از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده کنیم، و بالعکس. چون تأیید شدن این آزمون، نشانه ناپارامتریک بودن داده‌هاست. این آزمون‌ها بر اساس این فرض هستند که داده‌های هواشناسی مشاهده شده و تولید شده، نمونه‌های تصادفی از توزیع‌های موجود می‌باشند. این آزمون‌ها فرض صفر را

[5]- Mean squared error
[6] -Representative Concentration Pathways

بررسی می‌کنند. فرض صفر به این معنی است که هر دو توزیع مشابه هستند و اختلاف معنی‌داری ندارند. در این مطالعه تغییرات متغیرها در افق ۲۱۰۰ نسبت به دوره مبنا (۲۰۰۵-۱۹۸۶) موردبررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

جهت بررسی تغییرات دما و پیش‌بینی دمای حوضه حاجیلر از مدل آماریRCP استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل مدل ریزمقیاس نمایی آماری، انتخاب متغیرهای غالبی می‌باشد. این امر ناشی از آن است که مشخصات مدل و نتایج، مستقیماً تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد(Santer et al., 1996) .

در مدل SDSM ارتباط آماری بین متغیرهای مشاهده شده یا پیش‌بینی شونده با متغیرهای بزرگ‌مقیاس یا پیش‌بینی کننده بر اساس همبستگی ارزیابی می‌شود. بر اساس ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهده شده با متغیرهای پیش‌بینی روزانه با استفاده از نرم‌افزار SDSM در محدوده حوضه حاجیلر، از بین ۲۶ متغیر آزمون شده ۲ متغیر nceptempgl و ncepp500gl در بخش دما و پارامترهایnceptempgl و ncepp500gl در بخش بارش، دارای بیشترین همبستگی (P-Value=0) با داده‌های مشاهده‌ای حداکثر و حداقل دما و میزان بارش را داشتند (جدول ۲). همان‌طور که از نتایج مندرج در جدول ۲ برمی‌آید، بیشترین میزان همبستگی پیش‌بینی کننده‌های NCEP با عنصر بارش را میانگین فشار سطح دریا، جهت باد در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال و جهت باد در نزدیک سطح، با متوسط حداکثر دما؛ میانگین فشار سطح دریا، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در نزدیک سطح و جهت باد در نزدیک سطح، و با متوسط حداقل دما؛ سرعت جریان هوا ژئواستروفیک در نزدیک سطح زمین، جهت باد در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال و جهت باد در نزدیک سطح، با متوسط حداکثر دما؛ میانگین فشار سطح دریا، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در نزدیک سطح و جهت باد در نزدیک سطح زمین به خود اختصاص داده‌اند. بررسی‌های نشان می‌دهد که میزان این همبستگی در متوسط حداکثر و حداقل دما قوی‌تر از بارش است و جدول شماره ۲ میزان همبستگی بین عناصر را با پارامترهای پیش‌بینی کننده نشان می‌دهد این میزان همبستگی با نتایج اکثر پژوهش‌های رفرنس داده همخوانی دارد.

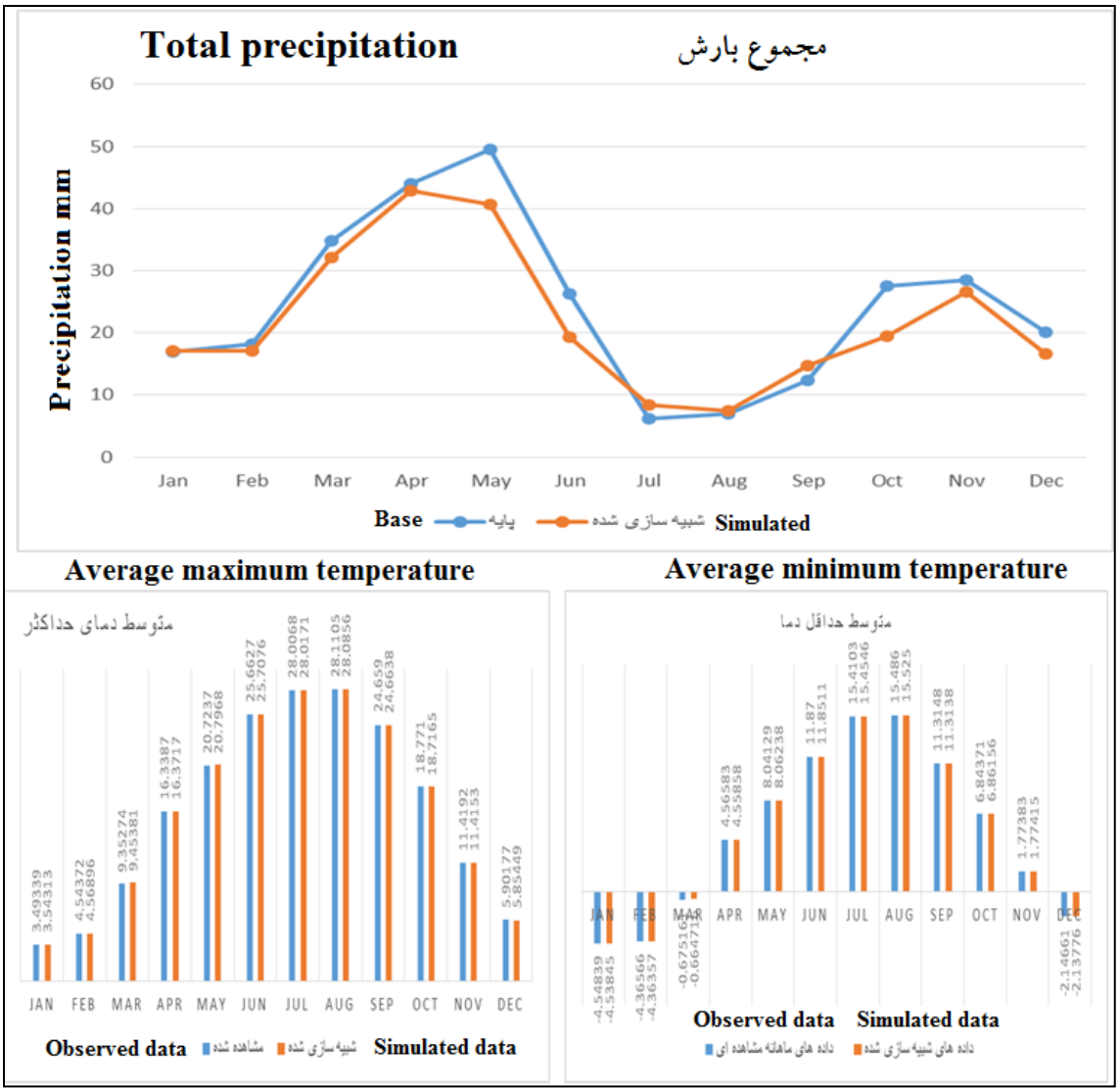
جدول ۲ -میزان همبستگی بین عناصر بارش و دما با پارامترهای پیش‌بینی کننده NCEP

Table2 - The degree of correlation between precipitation and temperature elements with NCEP predictive parameters

دمای حداقل Minimum Temperature			دمای حداکثر Maximum Temperature			بارش Precipitation		
همبستگی جزئی Partial correlation	P-Value	پیش‌بینی کننده منتخب Selected predictor	همبستگی جزئی Partial correlation	P-Value	پیش‌بینی کننده منتخب Selected predictor	همبستگی جزئی Partial correlation	P-Value	پیش‌بینی کننده منتخب Selected predictor
-0.12	0.0	Ncepp1fgl	0.023	0.0	ncepmslpgl	0.064	0.02	ncepmslpgl
0.068	0.0	ncepp500gl	0.027	0.0	ncepp500gl	0.051	0.07	ncepp8thgl
0.026	0.0	nceps850gl	0.059	0.0	nceps850gl	0.108	0.0	nceptempgl
0.449	0.0	nceptempgl	0.553	0.0	nceptempgl			

همان‌طور که مطرح شد با توجه به نتایج جدول ۲ داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی نسبت به بارش داشته‌اند این بدان علت است که تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر است و دما یک متغیر پیوسته می‌باشد که کمتر تحت تأثیر ناهنجارهای زمانی قرار می‌گیرد. درحالی‌که بارندگی یک پارامتر گسسته است و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد.

پس از انتخاب بهترین پیش‌بینی کننده‌ها، به دلیل اینکه SDSM5.3 از رابطه رگرسیونی استفاده می‌کند و کل پارامترها را محاسبه می‌کند کل داده‌های آماری مشاهده‌ای یعنی از سال ۱۳۸۶ تا ۲۰۰۵ برای واسنجی اختصاص داده شد. نتایج این واسنجی به نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است، اختلاف چندانی بین مقادیر داده‌های پایه و مقادیر برآورد شده در داده‌های دما توسط مدل وجود نداشته اما در داده‌های بارش نسبت به داده‌های دما اختلافات بیشتر است.



شکل ۲- مقایسهٔ مقادیر عنصرهای بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحلهٔ واسنجی مدل SDSM

Fig. 2. Comparison of observed and simulated values of precipitation and temperature elements in the calibration stage of the SDSM model

برای روشن شدن توانمندی مدل، علاوه بر روش ترسیمی از معیارهای آماری از مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) و MAE استفاده شد. نتایج حاصل از سنجش در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- ارزیابی کارایی شبیه‌سازی‌های (SDSM) طی دوره آماری پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ در محدوده حوضه حاجیلر

Table 3- Evaluation of the efficiency of simulations (SDSM) during the basic statistical period of 1986-2005 in Hajiler basin

متوسط حداقل دما **Average Minimum Temperature**	متوسط حداکثر دما **Average Maximum Temperature**	بارش (مجموع) **Precipitation (Total)**	معیارهای آماری **Statistical Criteria**
0.034	0.048	4.38	RMSE
0.026	0.039	3.30	MAE

با توجه به نتایج شکل ۲ و جدول ۳، مشخص شد که داده‌های شبیه‌سازی شده توسط عنصرهای پیش‌بینی کنندهٔ منتخب با داده‌های مشاهداتی در طول دورهٔ پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ تطابق خوبی دارند که در این میان تطابق دمای حداقل و حداکثر با ۰ RMSE .34-0.048 و MAE با 0.026 و ۰ 039. بیشتر از پارامترهای بارش هستند. بر این اساس، مشخص شد که عنصرهای پیش‌بینی کنندهٔ منتخب از کارایی مناسب و قابل‌قبولی جهت شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مورد نظر برای دوره‌های آتی برخوردارند.

- شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی محدوده حوضه حاجیلر تا سال ۲۱۰۰

پس از کنترل دقت مدل برای دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دما و بارش برای دوره‌های آتی شد . مدل را برای چهار دوره ۱۸ ساله بر اساس سناریوهای RCP2.6RCP4.5,RCP8.5 و مدل جهانیCanESM2 برای منطقه حوضه تولید و تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه موردبررسی واقع گردید.

-بررسی تغییرات بارش

سناریوهای مختلف RCP جهت ارزیابی تغییرات بارش برای چهار دوره نسبت به دوره پایه در جدول ۴ و نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد که با توجه به مجموع بارش مشاهده شده منطقه موردمطالعه و مقادیر پیش‌بینی شده طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ برای هر ۴ دوره ۱۸ ساله بر اساس سناریوهای RCP۲.۵ و ۴.۵ در فصل بهار کاهش بارش و طبق سناریو ۸.۵ RCP برای ماه‌های آوریل و می‌افزایش و مجدد برای ماه ژوئن کاهش بارش پیش‌بینی می‌گردد، کاهش بارش در آخر این دوره در ماه ژوئن در تمام دوره‌ها و تمام سناریوها به‌ویژه در سناریو ۸.۵ به‌شدت خود را نشان می‌دهد. در تمام فصل تابستان روند افزایش بارش در تمام دوره‌ها در RCP۲.۵ نسبت به سطح پایه به‌طور محسوسی قابل مشاهده است. این شرایط در دو ماهه نخست

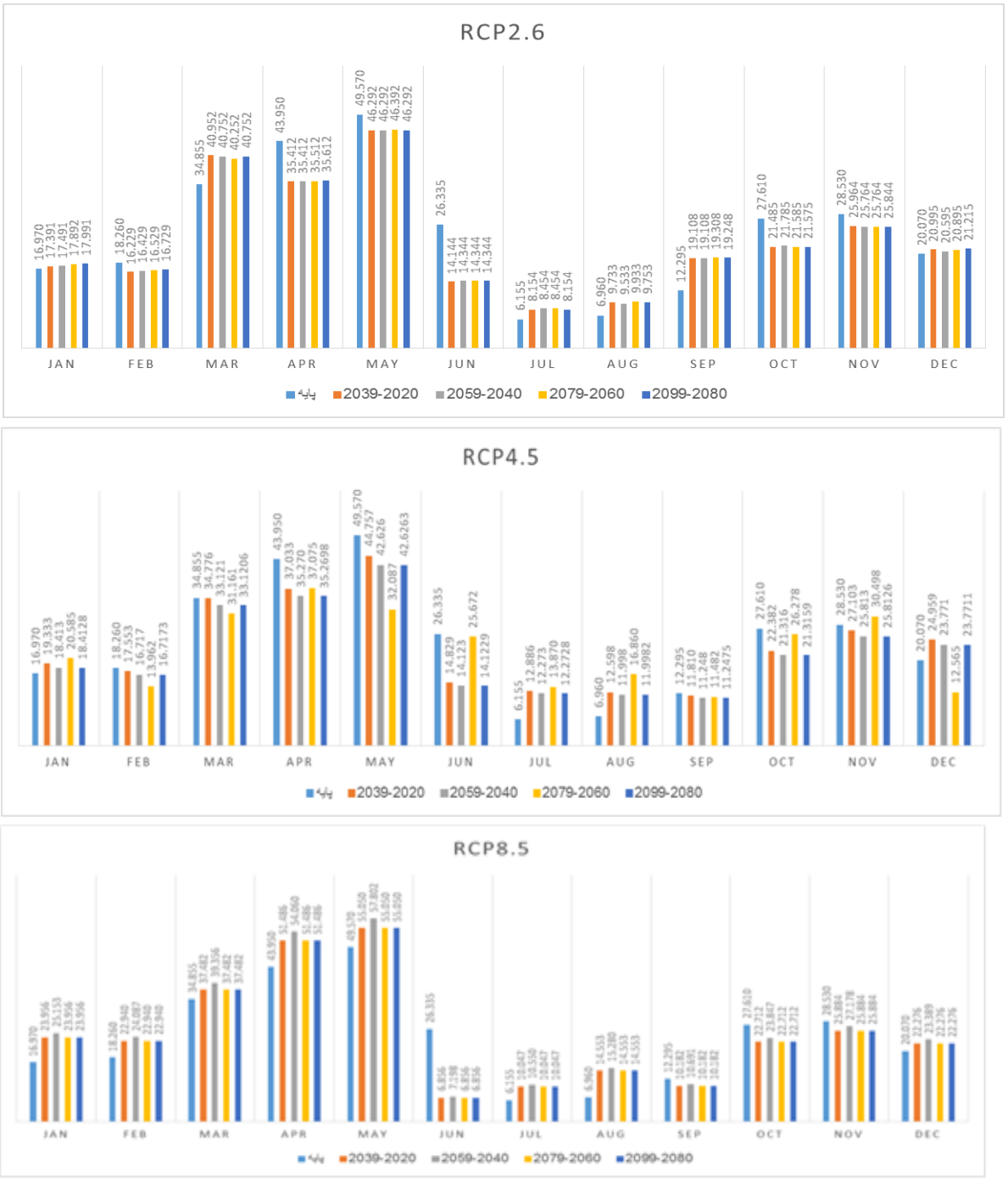
RCPهای ۴.۵ و ۸.۵ در تمام دوره‌ها روند افزایشی خود را حفظ می‌کند و در ماه آخر به سمت کاهش بارش تمایل یافته و ادامه این روند در پاییز در تمام دوره‌ها و تمام سناریوها غیر از ماه نوامبر در RCP ۴.۵ در دوره زمانی ۲۰۶۰–۲۰۷۹ با شتاب بیشتری خود را نشان می‌دهد. در فصل زمستان نیز عموماً در سناریو RCP ۸.۵ در تمام دوره‌های زمانی افزایش بارندگی و در ماه دوم و سوم در سناریوهای ۲.۶ و ۴.۵ کاهش بارندگی نسبت به دوره پایه محسوس است.

تغییر اقلیم به دو شکل می‌تواند بر روی بارش نقش داشته باشد یکی به شکل تغییر در مقدار بارش و دیگری تغییرات زمانی الگوی بارش می‌باشد، شرایط بارش نشان می‌دهد که دوره زمانی توزیع بارش از حالت زمان طبیعی خارج و تمایل به بی‌نظمی و خارج از فصول مناسب شدت می‌یابد که نشان‌دهنده تغییرات میزان و زمانی الگوی بارش در دوره‌های آتی در منطقه است. این شرایط آتی می‌تواند خشکسالی‌های گسترده‌ای نسبت به شرایط حال ایجاد، فرسایش را افزایش و تولیدات کشاورزی را کاهش دهد که لزوم اتخاذ سیاست–ها و تصمیمات مناسب برای این موضوع را از هم اکنون مطرح می‌کند.

جدول ۴– تغییرات مجموع بارش ماهانه پیش‌بینی شده، به نسبت میانگین بارش واقعی طی دوره‌ها

Table 4- Changes in total predicted monthly rainfall, compared to the average actual rainfall during the periods

rcp8.5					rcp4.5					rcp2.6					
2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	month
23.9556	23.9556	25.1533	23.9556	16.97	18.4128	20.5854	18.4128	19.3331	16.97	17.991	17.892	17.491	17.391	16.97	Jan
22.9398	22.9398	24.0866	22.9398	18.26	16.7173	13.9615	16.7173	17.5529	18.26	16.7285	16.5285	16.4285	16.2285	18.26	Feb
37.4824	37.4824	39.356	37.4824	34.855	33.1206	31.1609	33.1206	34.7759	34.855	40.7515	40.2515	40.7515	40.9515	34.855	Mar
51.4859	51.4859	54.0598	51.4859	43.95	35.2698	37.075	35.2698	37.033	43.95	35.6117	35.5117	35.4117	35.4117	43.95	Apr
55.0498	55.0498	57.8017	55.0498	49.57	42.6263	32.0868	42.6263	44.7572	49.57	46.2917	46.3917	46.2917	46.2917	49.57	May
6.85565	6.85565	7.19845	6.85565	26.335	14.1229	25.6724	14.1229	14.8291	26.335	14.344	14.344	14.344	14.144	26.335	Jun
10.0474	10.0474	10.5498	10.0474	6.155	12.2728	13.8704	12.2728	12.8863	6.155	8.15415	8.45385	8.45385	8.15385	6.155	Jul
14.5525	14.5525	15.28	14.5525	6.96	11.9982	16.8598	11.9982	12.598	6.96	9.75285	9.93285	9.53285	9.73285	6.96	Aug
10.182	10.182	10.6912	10.182	12.295	11.2475	11.4816	11.2475	11.81	12.295	19.2479	19.3079	19.1079	19.1079	12.295	Sep
22.7117	22.7117	23.8468	22.7117	27.61	21.3159	26.2783	21.3159	22.3816	27.61	21.575	21.585	21.785	21.485	27.61	Oct
25.8838	25.8838	27.1778	25.8838	28.53	25.8126	30.4975	25.8126	27.1032	28.53	25.8437	25.7637	25.7637	25.9637	28.53	Nov
22.2761	22.2761	23.3894	22.2761	20.07	23.7711	12.5653	23.7711	24.9592	20.07	21.2149	20.8949	20.5949	20.9949	20.07	Dec



شکل۳- تغییرات میزان بارش در محدوده حوضه در دوره‌های زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰،۲۰۳۹-۲۰۶۰،۲۰۵۹-۲۰۷۹ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ در مقایسه با دوره مشاهده آتی ۱۹۸۶-۲۰۰۵

Fig.3. Rainfall changes in the basin in the time periods of 2039-2020, 2040-2059, 2079-2060 and 2099-0280 in comparison with the observation period of 2005-1986.

-بررسی تغییرات متوسط دمای حداکثر

طبق برآورد مدل و نتایج مندرج در جدول ۵ و نمودارهای شکل ۴، متوسط دمای حداکثر در منطقه موردمطالعه به‌طورکلی در تمام سناریوها در کلیه دوره‌های زمانی پیش‌بینی شده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. روند افزایشی دما در تمام سناریوها عمدتاً در ماه‌های اول میلادی ژانویه و فوریه با شیب ملایم بوده و به‌تدریج با شروع ماه‌های گرم از ماه مارس تا نوامبر روند افزایش در کلیه دوره‌ها نسبت به دوره پایه شتاب بیشتری به خود می‌گیرد حداکثر افزایش دما در سناریو RCP۲.۶ در طی دوره‌های پیش‌بینی شده حدود ۱.۵۶ درجه سانتی‌گراد و مربوط به دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۵۹ بوده و بیشترین متوسط دمای حداکثر مربوط به ماه آگوست دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با میزان ۲۹.۵۸ در این سناریو می‌باشد.

در سناریوهای RCP۸.۵, ۴.۵ روند افزایش حداکثر دما در ماهای میانی در تمام دوره‌ها نسبت به دوره پایه شتاب بیشتری نسبت به سناریو RCP۲.۶ به خود می‌گیرد. در سناریو RCP۴.۵ بیشترین میزان افزایش مربوط به ماه جولای در دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با میزان اختلاف ۱.۵۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شده است و میزان افزایش با اختلاف کمتری نسبت به این درجه تا آخر سال ادامه میلادی می‌یابد. در سناریو RCP ۸.۵ روند افزایش دما در کلیه دوره‌ها مشهود بوده و حداکثر میزان اختلاف مربوط به ماه جولای دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با میزان ۱.۶۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد این روند افزایشی دما تا ماه‌های آخر سال ادامه داشته اما نسبت به این میزان اختلاف تعدیل می‌گردد.

جدول ۵- تغییرات متوسط حداکثر دمای ماهانه پیش‌بینی شده، به نسبت میانگین بارش واقعی طی دوره‌های مختلف (۲۰۲۰-۲۰۹۹)

Table 5- The average changes of the predicted maximum monthly temperature, in relation to the average actual precipitation during different periods (2020-2099)

RCP8.5					RCP4.5					RCP2.6					ماه
2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	
3.53	3.89	3.55	3.76	3.49	3.67	3.92	3.56	4.16	3.49	3.50	3.69	3.60	3.98	3.49	Jan
4.60	4.79	4.22	4.75	4.54	4.95	4.65	4.42	5.09	4.54	5.02	4.86	4.70	4.64	4.54	Feb
9.59	9.68	9.52	10.02	9.35	10.28	10.17	9.68	9.91	9.35	10.17	9.60	9.76	10.22	9.35	Mar
17.44	17.14	17.14	17.06	16.34	17.57	17.40	17.34	17.13	16.34	17.42	17.14	16.97	17.11	16.34	Apr
22.13	21.99	21.95	21.61	20.72	22.13	21.49	22.05	21.72	20.72	21.92	21.87	21.77	21.86	20.72	May
27.16	26.99	26.86	26.77	25.66	26.49	26.88	27.12	26.65	25.66	27.12	27.12	26.88	26.73	25.66	Jun
29.66	29.40	29.58	29.36	28.01	29.54	29.23	29.64	29.45	28.01	29.57	29.41	29.50	29.63	28.01	Jul
29.37	29.30	29.37	29.62	28.11	29.23	29.28	29.58	29.66	28.11	29.59	29.29	29.46	29.63	28.11	Aug
25.52	25.70	25.95	25.76	24.66	25.60	25.90	25.90	25.77	24.66	25.69	25.66	26.21	26.14	24.66	Sep
19.52	19.76	19.45	19.16	18.77	20.08	19.55	19.30	19.55	18.77	19.58	19.34	19.78	19.89	18.77	Oct
12.00	11.61	11.85	12.05	11.42	12.04	12.19	11.82	11.94	11.42	12.15	11.68	12.31	12.43	11.42	Nov
5.99	6.21	5.91	6.21	5.90	6.81	6.40	5.91	6.04	5.90	6.22	6.44	5.94	6.21	5.90	Dec



شکل ۴- تغییرات متوسط دمای حداکثر در محدوده حوضه در دوره‌های زمانی ۲۰۵۹،۲۰۲۰-۰۲۳۹- ۲۰۷۹،۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ در مقایسه با دوره مشاهده آتی ۱۹۸۶-۲۰۰۵

Fig.4. average changes of the maximum temperature in the basin in the time periods of 2059-2039, 2079-2020, 2060-2040 and 2099-2080 in comparison with the observation period of 2005-1986

-بررسی تغییرات متوسط دمای حداقل:

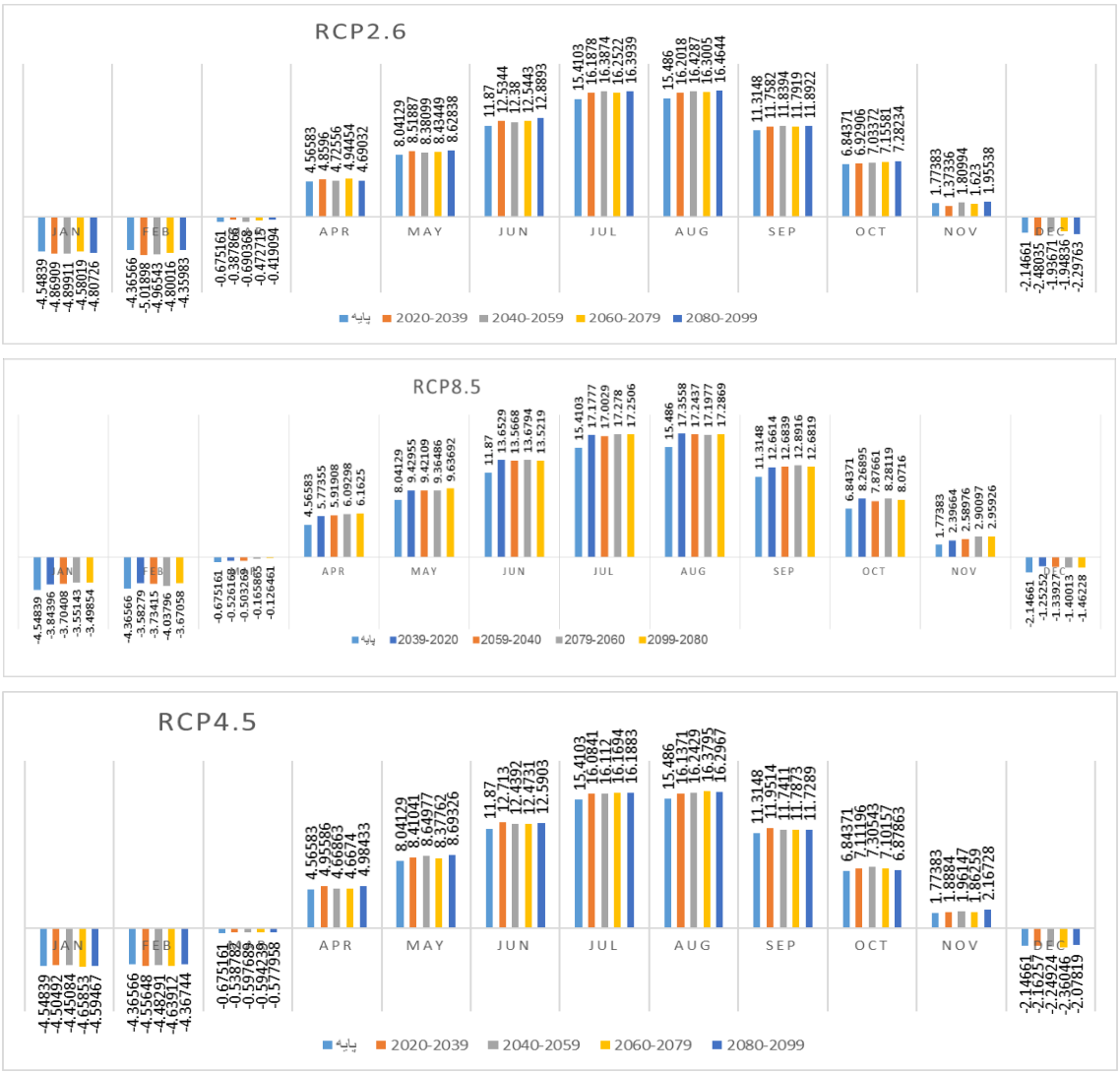
همان‌طورکه در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است، روند کلی متوسط دمای حداقل پیش‌بینی شده نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو و در تمام دوره‌ها روند افزایشی می‌باشد. بیشترین افزایش دما در سناریو RCP۲.۶ مربوط به ماه ژوئن دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با میزان اختلاف ۱.۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه می‌باشد بااین‌حال روند افزایش دما در این سناریوها در تمام دوره‌ها از یک روند پایدار تبعیت می‌کند و اختلاف به‌صورت کاهش یا افزایش چشمگیر در این سناریو مشاهده نمی‌شود.

در سناریو RCP ۴.۵ روند افزایش متوسط حداقل دما در تمام دوره‌های زمانی کماکان ادامه داشته و بالاترین این میزان مربوط به ماه سپتامبر دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با میزان اختلاف ۱.۴۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه می‌باشد. این میزان افزایش دما در خلال ماه‌های آتی در تمام دوره‌ها روند کاهشی به خود گرفته به‌طوری‌که در ماه‌های آخر سال میزان اختلاف به کمتر از ۰.۵ درجه در طی دوره‌ها نسبت به دوره پایه می‌باشد. در سناریو RCP ۸.۵ میزان اختلاف افزایشی دما در تمام دوره‌های زمانی نسبت به دوره پایه با شتاب بیشتری قابل مشاهده است و دما هر چه قدر به ماه‌های گرم سال‌های پیش‌بینی شده نزدیک‌تر می‌شود میزان اختلاف دما هم نسبت به زمان پایه هم بیشتر می‌گردد به‌طوری‌که اختلاف افزایش دما در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست نزدیک ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه می‌گردد. این روند به‌تدریج با کاهش میانگین دما در ماه‌های آخر سال در تمام دوره‌ها کاهش و تا میزان ۱.۱۰ الی ۱.۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایشی ماه دسامبر در خلال دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۹۹ تعدیل می‌یابد.

جدول ۶- تغییرات متوسط حداقل دمای ماهانه پیش‌بینی شده، به نسبت میانگین بارش واقعی طی دوره‌های مختلف (۲۰۲۰-۲۰۹۹)

Table 6- The average changes of the predicted monthly minimum temperature, in relation to the average actual precipitation during different periods (2020-2099)

RCP8.5					RCP4.5					RCP2.6					
2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	2080-2099	2060-2079	2040-2059	2020-2039	پایه	ماه
-3.49854	-3.55143	-3.70408	-3.84396	-4.54839	-4.59467	-4.65853	-4.45084	-4.50492	-4.54839	-4.80726	-4.58019	-4.89911	-4.86909	-4.54839	Jan
-3.67058	-4.03796	-3.73415	-3.58279	-4.36566	-4.36744	-4.63912	-4.48291	-4.55648	-4.36566	-4.35983	-4.80016	-4.96543	-5.01898	-4.36566	Feb
-0.12646	-0.16587	-0.50327	-0.52617	-0.67516	-0.57796	-0.59424	-0.59769	-0.53878	-0.67516	-0.41909	-0.47272	-0.69037	-0.38787	-0.67516	Mar
6.1625	6.09298	5.91908	5.77355	4.56583	4.98433	4.6674	4.66863	4.95586	4.56583	4.69032	4.94454	4.72556	4.8596	4.56583	Apr
9.63692	9.36486	9.42109	9.42955	8.04129	8.69326	8.37762	8.64977	8.41041	8.04129	8.62838	8.43449	8.38099	8.51887	8.04129	May
13.5219	13.6794	13.5668	13.6529	11.87	12.5903	12.4731	12.4392	12.713	11.87	12.8893	12.5443	12.38	12.5344	11.87	Jun
17.2506	17.278	17.0029	17.1777	15.4103	16.1883	16.1694	16.112	16.0841	15.4103	16.3939	16.2522	16.3874	16.1878	15.4103	Jul
17.2869	17.1977	17.2437	17.3558	15.486	16.2967	16.3795	16.2429	16.1371	15.486	16.4644	16.3005	16.4287	16.2018	15.486	Aug
12.6819	12.8916	12.6839	12.6614	11.3148	11.7289	11.7873	11.7411	11.9514	11.3148	11.8922	11.7919	11.8394	11.7582	11.3148	Sep
8.0716	8.28119	7.87661	8.26895	6.84371	6.87863	7.10157	7.30543	7.11196	6.84371	7.28234	7.15581	7.03372	6.92906	6.84371	Oct
2.95926	2.90097	2.58976	2.39664	1.77383	2.16728	1.86259	1.96147	1.8884	1.77383	1.95538	1.623	1.80994	1.37336	1.77383	Nov
-1.46228	-1.40013	-1.33927	-1.25252	-2.14661	-2.07819	-2.36046	-2.24924	-2.16257	-2.14661	-2.29763	-1.94836	-1.93671	-2.48035	-2.14661	Dec



شکل ۵- تغییرات متوسط دمای حداقل در محدوده حوضه در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۲۰،۲۰۵۹-۲۰۴۰،۲۰۷۹-۲۰۶۰ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ در مقایسه با دوره مشاهداتی ۱۹۸۶-۲۰۰۵

Fig.5. Average minimum temperature changes in the basin area in the periods of 2059-2039, 2079-2020, 2060-2040, and 2099-2040 compared to the observation period of 2005-1986

-آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو –ویلک

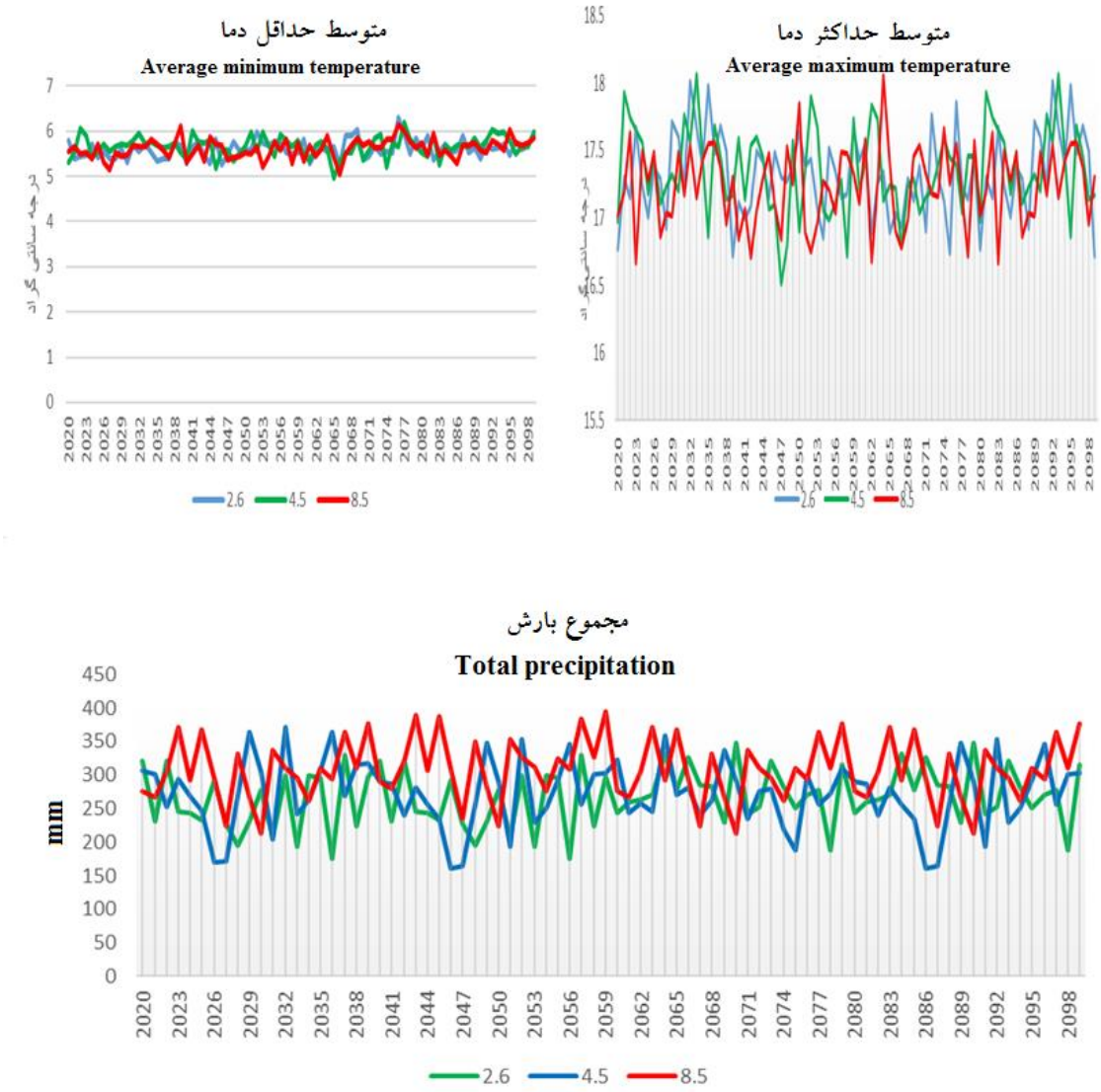
طبق نتایج حاصل از آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف (K-S) و شاپیرو –ویلک که نتایج آن در جدول ۷ و شکل ۶ نشان داده شده است، روند بارش در سناریوی RCP ۲.۶ و RCP ۴.۵ نرمال می‌باشد، اما در RCP ۸.۵ بارش دارای روند غیر نرمال در هر دو آزمون کولموگروف اسمیرنوف (K-S) و شاپیرو–ویلک می باشد. در رابطه با عنصر دما در آزمون کولموگروف اسمیرنوف در هر دو عنصر دما در سناریوهایی RCP ۲.۶

و RCP۴.۵ وضعیت افزایشی دما نرمال می‌باشد اما در سناریوی RCP ۸.۵ در متوسط حداکثر دما وضعیت غیر نرمال، اما در متوسط حداقل دما مجدداً وضع نرمال می‌باشد.

جدول ۷- مقدار آماری کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو –ویلک در سه سناریو و برای چهار دوره آتی

Table 7- The statistical value of Kolmogorov Smirnov and Shapiro-Wilk in three scenarios and for four future periods

شاپیرو –ویلک Shapiro-Wilk			کولموگروف- اسمیرنوف Kolmogorov -Smirnov			آزمون Test
8.5	4.5	2.6	8.5	4.5	2.6	سناریو Scenario / پارامتر Parameter
0.023	0.049	0.09	0.009	0.2	0.2	بارش Precipitation
0.09	0.78	0.34	0.04	0.17	0.2	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature
0.80	0. 45	0.075	0.2	0.19	0.2	متوسط دمای حداقل Average minimum temperature



شکل ۶- نمودار تغییر روند عناصر اقلیمی دما و بارش از سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰

Fig. **6**. Chart of changes in the climate elements of temperature and precipitation from 2020 to 2100

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش با استفاده از مدل خطی SDSM و مدل‌های گردش عمومی هوا در محدوده حوضه حاجیلر اقدام و برای این منظور از خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP۲.۶،RCP۴.۵ و RCP ۸.۵ برای دوره‌های آتی تا سال ۲۱۰۰ استفاده گردید. نتایج نشان داد در روند سالانه داده‌های بارش دارای همبستگی ضعیفی با داده‌های مشاهده‌ای داشته‌اند اما داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های پایه از خود نشان دادند؛ این نتیجه به خاطر این است که عنصر

بارش یک متغیر گسسته و تحت تأثیر عوامل محیطی متفاوت بوده اما دما یک عنصر با توزیع احتمالی نرمال است و تغییرپذیری کمتری نسبت به عنصر بارش دارد این نتایج با نتایج تحقیقاتی محققانی همچون جعفری گدنه و همکاران (Jafary Godeneh et al., 2020)، زارعی و همکاران(Zarei et al., 2019) ، علوی‌نیا (Alavinia, 2022) و عساکره و اکبرزاده (Asakereh & Akbarzadeh, 2017) همخوانی داشته همچنین نتایج خروجی این تحقیق نیز موید این موضوع بوده و توانایی مدل SDSM در کوچک‌مقیاس کردن داده‌های دما و بارش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص گردید که تا ۲۱۰۰ متوسط حداکثر و حداقل دما دارای روند معنادار افزایشی بوده و مجموع بارش نسبت به فصول مختلف سال کاهش یا افزایش می‌یابد و توزیع نرمال بارش در فصول سال بیشتر به هم می‌خورد؛ به‌طوری‌که در ماه‌های منتهی به فصل بارش روند کاهشی و در ماه‌های سرد سال افزایشی می‌گردد با توجه به مجموع بارش مشاهده شده منطقه موردمطالعه و مقادیر پیش‌بینی شده طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ برای هر ۴ دوره ۱۸ ساله بر اساس سناریوهای RCP ۲.۶ و ۴.۵ در فصل بهار کاهش بارش و طبق سناریو RCP ۸.۵ برای ماه‌های آوریل و می‌افزایش و مجدد برای ماه ژوئن کاهش بارش پیش‌بینی می‌گردد، کاهش بارش در آخر این دوره در ماه ژوئن در تمام دوره‌ها و تمام سناریوها به‌ویژه در سناریو ۸.۵ به‌شدت خود را نشان می‌دهد. در تمام فصل تابستان روند افزایش بارش در تمام دوره‌ها در RCP ۲.۶ نسبت به سطح پایه به‌طور محسوسی قابل مشاهده است. این شرایط در دو ماهه نخست RCP های ۴.۵ و ۸.۵ در تمام دوره‌ها روند افزایشی خود را حفظ می‌کند و در ماه آخر به سمت کاهش بارش تمایل یافته و ادامه این روند در پاییز در تمام دوره‌ها و تمام سناریوها غیر از ماه نوامبر در ۴.۵ RCP در دوره زمانی ۲۰۶۰-۲۰۷۹ با شتاب بیشتری خود را نشان می‌دهد. در فصل زمستان نیز عموماً در سناریو RCP۸.۵ در تمام دوره‌های زمانی افزایش بارندگی و در ماه دوم و سوم در سناریوهای ۲.۶ و ۴.۵ کاهش بارندگی نسبت به دوره پایه محسوس است. در رابطه با عنصرهای دما، می‌توان گفت که روند کلی عنصرهای دمایی در دوره‌های آتی با روند طبیعی این عنصرها نسبت به دوره پایه در هماهنگی کامل است؛ به‌طوری‌که دما در طی فصول و برای تمام دوره‌ها دارای روند افزایشی محسوس بوده و این افزایش در ماه‌های گرم سال در تمام دوره‌ها دارای روند شتابداری نسبت به ماه‌های سرد سال می‌باشد. با توجه به نتیجهٔ کلی برآمده از این تحقیق مبنی بر افزایش دما و کاهش بارش در فصول مناسب بارش، به نظر می‌رسد که در مباحث منابع آب، اقدامات آبخیزداری و کشاورزی شرایط پیش‌بینی شده باید موردتوجه بوده تا اثرات منفی تغییر اقلیم در محدوده موردمطالعه به کمترین حد ممکن خود برسد.

References

Ahmedabadi, A., & Sedighi Far, Z. (2017). Prediction of Climate Change Induced Hydrogeomorphology by using SDSM in CAN Watershed. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *18*(51), 103-114. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jgs.18.51.103

Alavinia, S. H. (2022). Analysis of Extreme Temperature Change Trend under Future Scenarios in order to Assess Climate Fluctuations (Case Study: Sanandaj and Saghez Synoptic Stations). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, *11*(41), 1-16. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161521.html

Alizadeh Pahlavan, H. & Zahraei, B. (2014). Statistical downscaling of precipitation to assess the effects of climate change on extreme events in urban areas. Paper presented at the Conference on Climate Change and a Road to a Sustainable Future papers, Tehran. [In Persian] https://civilica.com/doc/269548/

Asakereh, H., & Akbarzadeh, Y. (2017). Simulation of Temperature and Precipitation Changes of Tabriz Synoptic Station Using Statistical Downscaling and Canesm2 Climate Change Model Output. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *6*(1), 153-174. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.54791

Brown, C. A., Sharp, D., & Collura, T. C. M. (2016). Effect of climate change on water temperature and attainment of water temperature criteria in the Yaquina Estuary, Oregon (USA). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *169*, 136-146. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.11.006

Charron, I. (2016). A guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions. *Ouranos*. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/hors_proj-2016-charron-guide_scenario_en.pdf

Chu, J. T., Xia, J., Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2010). Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, *99*, 149-161. https://doi.org/10.1007/s00704-009-0129-6

Farajzadeh, M., Oji, R., Cannon, A. J., Ghavidel, Y., & Massah Bavani, A. (2015). An evaluation of single-site statistical downscaling techniques in terms of indices of climate extremes for the Midwest of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *120*, 377-390. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1157-4

Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2007). Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western US. *Water Resources Research*, *43*(6), w06427. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006AGUFM.H24B..05H/abstract

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impact, adaption and Vulnerability. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson (eds.), *Contribution of working group II to the Fourth Assessment report*. Cambridge UK: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge UK: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

Jafary Godeneh, M., Salajeghe, A., & Haghighi, P. (2020). Forecast Comparative of Rainfall and Temperature in Kerman County Using LARS-WG6 Models. *Iranian journal of Ecohydrology*, *7*(2), 529-538.[In Persian] https://doi.org/10.22059/ije.2020.298577.1294

Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, *319*(1-4), 357-382. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.035

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, *109*, 33-57. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y

Santer, B. D., Taylor, K. E., Wigley, T. M., Johns, T. C., Jones, P. D., Karoly, D. J., ... & Tett, S. (1996). A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere. *Nature*, *382*(6586), 39-46. https://doi.org/10.1038/382039a0

Taheri Tizro, A., Khodamorad Pour, M., & Mashhadian, M. J. (2017). Evaluation of RegCM4 Regional Climate Model simulations for the land surface water budget components (A case study in Toyserkan plain, Hamedan province). *Journal of Water and Soil Conservation*, *24*(5), 1-24. [In Persian] https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.11686.2616

Yue, T., Zhao, N., Fan, Z., Li, J., Chen, C., Lu, Y., … & Wilson, J. (2016). CMIP5 downscaling and its uncertainty in China. *Global and Planetary Change*, *146*, 30-37. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.09.003

Zarei, K., Mohammadi, H., & Bazgeer, S. (2019). Simulation of Gorgan Synoptic Station Temperature and Precipitation with RCP Scenarios. *Physical Geography Research*, *51*(4), 563-579. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.280943.1007378

Vol. 13, No.4, Winter 2024, pp. 269-290 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.86012.1446 Open access

Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin)

Mahin Saedpanah[a], Jamil Amanollahi[b] *

[a] *PhD Student in Environment Science, Department of Environmental Sciences, University of Kurdistan, Iran.*
[b] *Associate Professor in Environmental Science, Department of Environmental Sciences, University of Kurdistan, Iran.*

Received: 22 December 2023 ***Revised: 2 June 2024*** ***Accepted 10 June 2024:***

Extended Abstract

Introduction

Since the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) is derived from various aspects and characteristics of an ecosystem, it can be used as a reliable index to show environmental quality or assess the condition of a region or ecosystem. The quality of urban ecosystems is determined by several indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI**)**, leaf area index (LAI), Land Surface Temperature (LST)**,** Land Surface Moisture (LSM)**,** Normalized Difference Built-up Index (NDBI)**,** Index-Based Built-up Index (IBI)**,** and Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI)**.** However, most of these indicators are not comprehensive enough and cannot evaluate all the important and effective aspects of urban environmental quality. RSEI integrates various indices without requiring manual weighting. This index is a comprehensive measure derived from four indices—vegetation, humidity, dryness, and heat—using Principal Component Analysis (PCA)**.**
Wang et al. (2022) investigated the environmental quality of eastern China using RSEI. The average RSEI values for the years 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were reported as 0.67, 0.55, 0.59, 0.58, and 0.63, respectively, showing an initial decline followed by an increase. The purpose of the current research is to investigate the environmental quality of the Zaribar Lake basin using RSEI. The variables required to calculate this index were obtained under the conceptual model of Pressure-State-Response.

Material and Methods

Zaribar Lake, covering an area of 20 km² with an average depth of 5 m, is located 3 km west of Marivan city, Kurdistan province, at an altitude of 1,320 m above sea level. Landsat

* .Corresponding author : Jamil Amanollahi Email: j.amanollahi@uok.ac.ir Tel:+989379701832

How to cite this Article: Sedpanah, M. , & Amanollahi, J. (2024). Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4) ,269-290

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

satellite images for 1998, 2010, and 2022 were downloaded from the United States Geological Survey website (https://earthexplorer.usgs.gov). After performing the pre-processing operations, land use maps were created using the supervised classification method and the maximum likelihood algorithm in ENVI 5.3 software. The maps categorized land into five classes: built-up areas, agricultural lands, lakes, forests, and reeds.
To verify the accuracy of the classified maps, a random sampling method was employed with ground truth points (control points). Control points were collected through Google Earth images, and classification accuracy was assessed using an error matrix and statistical parameters **(**kappa coefficient and overall accuracy**).** The RSEI was calculated using NDVI, LSM, LST, and NDBSI, representing greenness, humidity, heat, and dryness, respectively.

Results and Discussion

Considering the large water area of Zaribar Lake, the lake was excluded from the computational analysis. The results indicated that the specific values of Principal Component 1 (PC1) for each year exceeded 60%, ranging from 63.78% to 71.35%. Two contrasting groups of indicators were observed based on their contribution to environmental quality. NDVI and LSM indices were positively associated, while LST and NDBSI were negatively associated with environmental quality.
The average RSEI for 1998, 2010, and 2022 was 0.39, 0.38, and 0.37, respectively, showing a declining trend. The values suggest an average RSEI of less than 0.40, indicating poor environmental quality in the Zaribar Lake basin. Environmental quality improved with increased vegetation, humidity, and surface water content, while higher NDBSI and LST values indicated greater soil degradation and poorer conditions.
Between 1998 and 2022, NDVI decreased from 0.56 to 0.45, and LSM decreased from 0.64 to 0.62, both negatively impacting environmental quality. Conversely, NDBSI increased from 0.63 to 0.65, and LST rose from 0.77 to 0.87, contributing to environmental degradation. NDBSI reflects changes in urban construction and highlights how urbanization in the Zaribar Lake basin has significantly affected environmental quality.

Conclusion

The analysis of environmental quality changes in the Zaribar Lake basin for 1998, 2010, and 2022 using RSEI revealed that vegetation and humidity positively influenced the environment, whereas heat and dryness had negative effects. The inhibitory effects of NDBSI and LST were more pronounced than the positive effects of NDVI and LSM. The weak RSEI category occupied the largest area, while excellent and good levels were primarily observed in forest and reed lands around Zaribar Lake.
The findings demonstrate that environmental quality in the Zaribar Lake basin has significantly declined, with the average RSEI decreasing from 0.39 in 1998 to 0.37 in 2022. Land use changes were identified as a major factor contributing to the degradation of environmental quality. Therefore, effective urban planning and sustainable land management practices are essential to improve and maintain the ecological quality of the Zaribar Lake basin.

Keywords: Remote Sensing Index , Land Use Changes, Vegetation Index , Moran Index , Environmental Quality Assessment.

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۲۹۰-۲۶۹

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.86012.1446 دسترسی آزاد

ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص‌های کیفی اکولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریبار)

مهین ساعد پناه-دانشجوی دکترای محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

جمیل امان‌اللهی[1]- دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۲/۱ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۱۳ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۳/۲۱

چکیده

فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند به‌طور عینی و کمی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست را ارزیابی کند. پی بردن به کیفیت محیط‌زیست منطقه‌ای و تغییرات اکولوژیکی برای نظارت و مدیریت محیط‌زیست و برنامه‌ریزی ساخت‌وساز شهری بسیار مهم است. به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار از تصاویر لندست سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ جهت استخراج چهار شاخص پوشش گیاهی، رطوبت، گرما و خشکی استفاده شد. سپس شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور با تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌دست آمد. ناهمگنی فضایی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در دوره موردمطالعه توسط شاخص موران ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که اثر بازدارندگی NDBSI و LST به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از اثر ترویجی NDVI و LSM بر محیط‌زیست محدوده موردمطالعه است. بر اساس نتایج RSEI مساحت طبقه با کیفیت محیط‌زیست ضعیف در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۵۹/۳۶، ۶۵/۴۹ و ۵۶/۰۲ درصد به‌دست آمد. منطقه با سطوح عالی و خوب RSEI عمدتاً متعلق به اراضی جنگلی و نیزار بود. مقادیر میانگین RSEI حاکی از کاهش کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار بود. نتایج نمودارهای پراکندگی شاخص جهانی موران، در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۸۵ و ۰/۷۱ تعیین شد که حاکی از کاهش همگنی در این دوره بود. محیط‌زیست محیطی پیچیده است، بنابراین با استفاده از چهار شاخص RSEI می‌توان وضعیت آن را تخمین زد. در مطالعات آینده می‌توان از داده‌های مکانی متنوع‌تری مانند بهره‌وری خالص اولیه و ذرات معلق در هوا استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: شاخص سنجش از دور ، تغییرات کاربری زمین ، شاخص پوشش گیاهی ، شاخص موران ، ارزیابی کیفیت محیط زیست.

[1] .نویسنده مسئول : ۰۹۳۷۹۷۰۱۸۳۲

Email: j.amanollahi@uok.ac.ir

۱- مقدمه

ازآنجایی‌که شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور (RSEI[1]) با استفاده از جنبه‌ها و ویژگی‌های مختلف یک بوم‌سازگان به‌دست می‌آید، می‌توان آن را به‌عنوان شاخصی قابل‌اعتماد برای نشان دادن وضعیت کیفیت محیط‌زیست یک منطقه یا بوم‌سازگان در نظر گرفت (Karbalaei Saleh, Amoushahi & Gholipour, 2021) کیفیت محیط‌زیست به مناسب بودن ترکیب کلی یا جزئی عوامل اکولوژیکی در یک محدوده مکانی و زمانی خاص برای بقای انسان و توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی اشاره دارد. در دهه ۱۹۹۰، سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD[2]) مدل فشار-حالت-پاسخ (PSR[3]) را برای نظارت و ارزیابی کیفیت محیط-زیست منطقه‌ای پیشنهاد کرد که به‌طور گسترده توسط پژوهشگران در کشورهای مختلف مورداستفاده قرار گرفته است (Wu, Zhao, Qin, Liu & Shen, 2023) . کیفیت بوم‌سازگان شهری توسط چندین شاخص از جمله شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI[4]) یا شاخص سطح برگ (LAI[5])، دمای سطح زمین (LST[6])، رطوبت سطح زمین (LSM[7])، شاخص تفاضل نرمال شده مناطق ساخته شده (NDBI[8])، شاخص مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته شده (IBI[9]) و شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDISI[10]) ارزیابی شده است (Hu & Xu, 2018; Ariken, Zhang, Liu, Fang & Kung, 2020; Karbalaei Saleh et al., 2021). بااین‌حال، اکثر این شاخص‌ها به‌اندازه کافی جامع نیستند و نمی‌توانند تمام جنبه‌های مهم و مؤثر کیفیت محیط شهری را ارزیابی کنند. ازاین‌رو، اخیراً توجه پژوهشگران به شاخص‌های ترکیبی آغاز شده است. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور (Xu, 2013)، شاخص‌های مختلفی را ادغام می‌کند و نیازی به تعیین وزن به‌صورت دستی ندارد (Zhang, Cai, Yang & Guo, 2022). این شاخص، یک شاخص جامع مشتق شده از چهار شاخص شامل: سبزی، رطوبت، خشکی و گرما است که با استفاده از تجزیه‌وتحلیل مؤلفه اصلی (PCA[11]) ساخته می‌شود. بنابراین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور می‌تواند فشارهای وارده بر محیط‌زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی (به‌عنوان‌مثال، شهرنشینی)، تغییرات در وضعیت محیطی (به‌عنوان‌مثال، پوشش گیاهی) (Arekhi, Mahmoudian & Emadaddian, 2022) و واکنش‌های تغییرات آب‌وهوایی (به‌عنوان‌مثال، دما و رطوبت) را منعکس کند (Esmaeili, Mirmousavi & Soheili, 2022).

---

1. Remote Sensing-Based Ecological Index
2. Organization for Economic Cooperation and Development
3. Pressure-State-Response
4. Normalized Difference Vegetation Index
5. Leaf Area Index
6. Land Surface Temperature
7. Land Surface Moisture
8. Normalized Difference Built-up Index
9. Index-Based Built-up Index
10. Normalized Difference Impervious Surface Index
11. Principal Components Analysis

همچنین این شاخص برای ارزیابی کمی تنوع کیفیت محیط‌زیست در مقیاس منطقه‌ای مطلوب است (Hang, Li, Luo, Xu & Han, 2020). اعتبار و پایایی شاخص‌های اکولوژیکی سنجش‌ازدور در مطالعات قبلی تأیید شده است. جلیلیان و امان‌اللهی (Jalilian & Amanollahi, 2023) پتانسیل تخریب اکولوژیک را در منطقه حفاظت شده کوسالان با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS بررسی کردند، آن‌ها نشان دادند که نزدیک به ۵۰ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل تخریب اکولوژیک هستند و مناطق نزدیک به روستا بیشتر در معرض تخریب قرار دارند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) به تجزیه‌وتحلیل تغییر کیفیت محیط‌زیست در حوضه رودخانه Yellow با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور پرداختند. طی ۳۰ سال گذشته، کیفیت محیط‌زیست در حوضه مذکور به‌طورکلی بهبود یافت، و این بهبود را می‌توان به دو دوره با بهبود سریع (۱۹۹۰-۲۰۰۰) و بهبود آهسته (۲۰۰۰-۲۰۲۰) تقسیم کرد. وانگ و همکاران (Wang, Zhang & Xi, 2022) کیفیت محیط‌زیست شرق چین را بر اساس شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور موردبررسی قرار دادند. مقادیر میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۵۵، ۰/۵۹، ۰/۵۸ و ۰/۶۳ به‌دست آمد که مقادیر میانگین ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر ژای و همکاران (Zhai, Xie, Li & Zhang, 2019) کیفیت محیط‌زیست شهر ژینجیکو[1] چین را توسط شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سه بازه زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۳ بررسی نمودند و یافته‌ها حاکی از کاهش کیفیت اکولوژیکی شهر بود. حوضه دریاچه زریبار با کاربری‌های متنوع در غرب ایران، مشابه بسیاری از مناطق در معرض تهدید فعالیت‌های انسانی است. این حوضه در سال‌های اخیر به‌دلیل جنگل‌زدایی و تغییر اراضی به کشاورزی و مسکونی و همچنین کاهش میزان بارندگی دستخوش تغییرات زیادی شده است (Sadeghi, Khaledi & Nyman, 2018). این فعالیت‌ها می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست وارد کنند (Lin, Hao, Post & Mikhailova, 2022). به‌منظور ارزیابی مؤثر کیفیت محیط-زیست برای نوع بشر و حفظ توسعه پایدار، تشخیص کیفیت اکولوژیکی به‌ویژه پویایی بلندمدت محیط-زیست ضروری است. هدف از پژوهش حاضر بررسی کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور است. متغیرهای موردنیاز جهت استخراج این شاخص جدید تحت مدل مفهومی فشار-حالت-پاسخ به‌دست آمد.

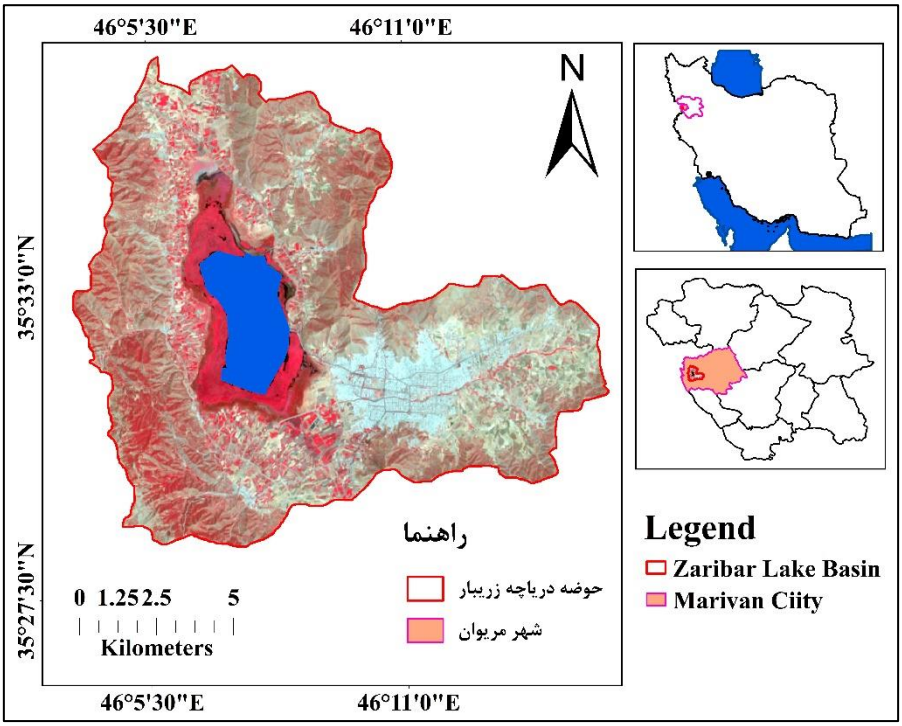
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده موردمطالعه

دریاچه زریبار به وسعت ۲۰ کیلومترمربع و عمق متوسط پنج‌متر در فاصله سه کیلومتری غرب شهرستان مریوان، استان کردستان (مختصات مرکز دریاچه طول جغرافیایی "۱۰،'۳،°۴۶ و عرض جغرافیایی

[1] Xinjiekou

"۳۷،۳۳'،۳۰°) با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). محدوده این دریاچه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای بوده و میانگین بارندگی و دمای سالانه آن به ترتیب ۹۹۱/۲ میلی‌متر و ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین بارندگی در اواخر زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد. کوه‌ها و تپه‌ها بخش مهمی از حوضه دریاچه زریبار را تشکیل می‌دهند. تأمین آب دریاچه توسط چشمه‌های آب شیرین و عدم ارتباط آن با رودخانه، زریبار را به بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین ایران تبدیل کرده است. حوضه آبخیز محدوده وسیعی را تغذیه می‌کند که کشاورزی در آن استفاده اولیه از زمین و منبع درآمد است. کشاورزان بیشتر محصولاتی مانند انگور و توت‌فرنگی تولید می‌کنند که به آب زیادی نیاز دارد و به‌طور سنتی از طریق استخراج آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شود (Sadeghi et al., 2018).



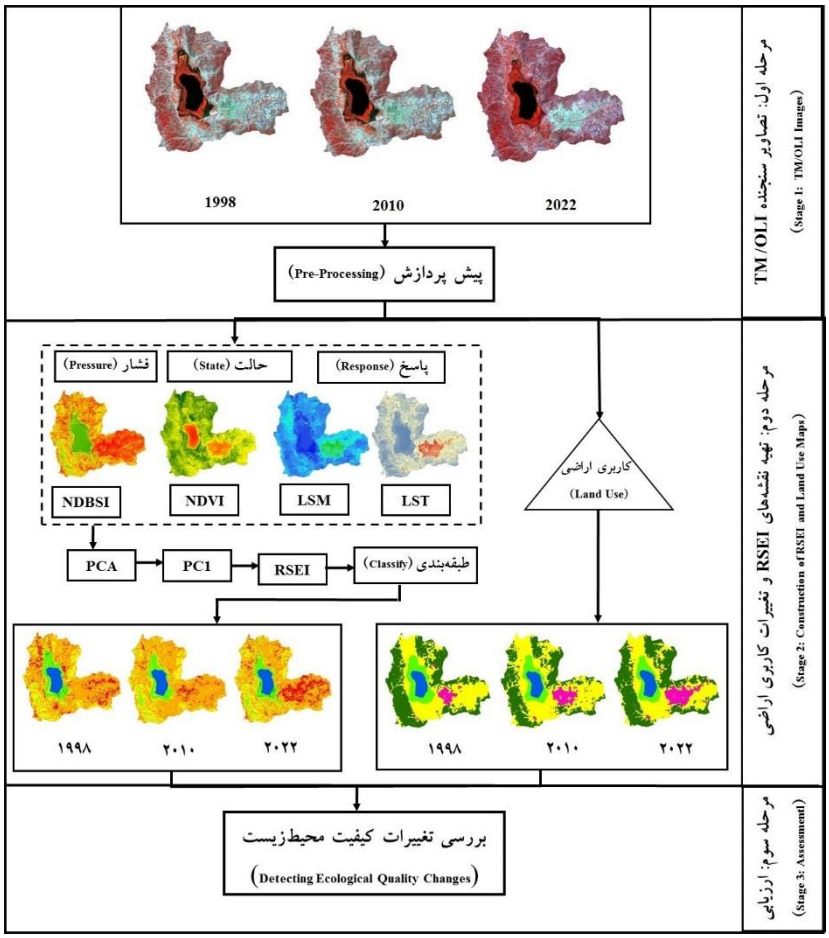
شکل ۱- موقعیت محدوده موردمطالعه

Fig. 1. Geogrphical position of study area

۲-۲- جمع‌آوری، پیش‌پردازش داده‌ها و نقشه کاربری اراضی

این مطالعه همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ از وبگاه زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا (https://earthexplorer.usgs.gov) دانلود شدند. ویژگی‌های دقیق آن در جدول ۱ ارائه شده است. پس از انجام عملیات پیش‌پردازش، نقشه‌های کاربری اراضی بر اساس روش طبقه‌بندی نظارت شده- الگوریتم

حداکثر احتمال توسط نرم‌افزار ENVI5.3 در پنج کلاس (مناطق ساخته شده، اراضی کشاورزی، دریاچه، جنگل و نیزار) طبقه‌بندی شدند. به‌منظور بررسی صحت نقشه‌های به‌دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای از روش نمونه‌گیری تصادفی به‌عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترل) استفاده شد. سپس با جمع‌آوری نقاط کنترلی از طریق تصاویر Google Earth، صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (ضریب کاپا و صحت کلی) محاسبه شد (جدول ۲). درنهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.6.1 نقشه کاربری اراضی برای سه سال موردمطالعه استخراج شد.



شکل ۲- فلوچارت مراحل مختلف روش کار

Fig. 2. Flowchart of different steps of the methodology

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شده در پژوهش

Table 1- Characteristics of satellite images selected in the current research

ردیف **Rows**	ستون **Columns**	تاریخ دریافت تصویر **Date of images**	قدرت تفکیک (متر) **Spatial Resolution**	سنجنده **Sensor**	لندست **Landsate**
168	35	1998.05.14 ،1998.07.17	30	TM	لندست ۵ Landsate 5

لندست ۵ Landsate5	TM	30	2010.05.18 ،2010.07.18	35	168
لندست ۸ Landsate8	OLI	30	2022.05.16 ،2022.07.19	35	168

جدول ۲- ضریب کاپا و صحت کلی حاصل از طبقه‌بندی

Table 2- Kappa cofficient and overall accuracy of classification

نوع طبقه‌بندی **Classification Type**	سال **Years**	ضریب کاپا **Kappa Coefficient**	صحت کلی **Overal Accuracy**
الگوریتم حداکثر احتمال **Maximum likelihood Algorithm**	1998	0.98	98.45
	2010	0.97	97.87
	2022	0.98	98.67

۲-۳- شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور

شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور از یک شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، رطوبت سطح زمین (LSM)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDBSI) تشکیل شده است که به ترتیب چهار مؤلفه اکولوژیکی سبزی، رطوبت، گرما و خشکی را منعکس می‌کنند و ارتباط نزدیکی با بقای انسان دارند. آب می‌تواند بر بار تجزیه مؤلفه اصلی و ارزیابی کیفیت محیط‌زیست منطقه تأثیر بگذارد؛ بنابراین، شاخص تغییر نرمال شده آب اصلاح شده (mNDWI[1]) (رابطه ۱) برای پوشاندن بدنه آبی (دریاچه زریبار) قبل از محاسبه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور استفاده شد تا رطوبت واقعاً نشان‌دهنده رطوبت محدوده موردمطالعه باشد (Xiong et al., 2021) .

$$mNDWI = (\rho_{Green} - \rho_{SWIR1})/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})$$ رابطه (۱)

که در آن ρ_{Green} باند سبز و ρ_{SWIR1} باند مادون‌قرمز میانی می‌باشد.

۲-۳-۱- شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی

این شاخص بر پایه ارتباط جذب انرژی در محدوده طیفی قرمز توسط کلروفیل و افزایش انعکاس در طیف مادون‌قرمز نزدیک برای پوشش گیاهی سالم استوار است و از رابطه (۲) به‌دست آمد.

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red})/(\rho_{NIR} + \rho_{Red})$$ رابطه (۲)

که در آن ρ_{NIR} باند مادون‌قرمز نزدیک و ρ_{Red} باند قرمز می‌باشد. محدوده عددی رابطه (۲) از ۱- تا ۱+ است. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، این شاخص به ۱+ تمایل دارد، درحالی‌که در مناطق با تراکم گیاهی کم به ۱- کاهش می‌یابد (Karbalaei Saleh et al., 2021).

[1]. Modified Normalized Difference Water Index

۲-۳-۲- شاخص رطوبت سطح زمین

شاخص رطوبت سطح زمین معمولاً برای تعیین کیفیت محیط‌زیست یک منطقه به‌دلیل ارتباط مستقیم بین اجزای تبدیل کلاهک منگوله‌ای (TCT[1]) از جمله روشنایی، رطوبت و سبزی با ویژگی‌های سطح زمین استفاده می‌شود (Zawadzki, Przeździecki & Miatkowski, 2016). شاخص LSM برای لندست ۵ (TM) و لندست ۸ (OLI) به ترتیب به‌صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه شد:

رابطه (۳)
$$LSM_{TM} = 0.03151\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$$

رابطه (۴)
$$LSM_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$$

که در آن‌ها ρ_{Blue} باند آبی، ρ_{Green} باند سبز، ρ_{Red} باند قرمز، ρ_{NIR} باند مادون‌قرمز نزدیک، ρ_{SWIR1} باند مادون‌قرمز میانی اول و ρ_{SWIR2} باند مادون‌قرمز میانی دوم را نشان می‌دهد.

۲-۳-۳- شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر

ساختمان‌ها بخش مهمی از بوم‌سازگان شهری هستند و سطوح نفوذناپذیر ساختمان‌ها، جایگزین بوم-سازگان طبیعی اولیه و منجر به «خشکی» سطح زمین شده است؛ بنابراین، شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر برای نشان دادن «خشکی» استفاده شد (Hu & Xu, 2018). برای تعیین این شاخص از شاخص مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته شده (IBI) و شاخص خاک برهنه (BI[2]) استفاده شد که نتیجه آن را شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDBSI) می‌نامند و به کمک رابطه (۵) الی (۷) به‌دست آمد:

رابطه (۵)
$$NDBSI = (IBI + BI)/2$$

رابطه (۶)
$$BI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]/[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]$$

رابطه (۷)
$$IBI = \frac{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + [\rho_{Green}/\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\}}{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + [\rho_{Green}/\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\}}$$

[1]. Tasseled Cap Transformation
[2]. Bare Soil Index

که در آن‌ها ρ_{Blue} باند آبی، ρ_{Green} باند سبز، ρ_{Red} باند قرمز، ρ_{NIR} باند مادون‌قرمز نزدیک و ρ_{SWIR1} باند مادون‌قرمز میانی اول را نشان می‌دهد.

۲-۳-۴- شاخص دمای سطح زمین

به‌منظور استخراج دمای سطح زمین از الگوریتم سبال استفاده شد. در این روش دمای سطح زمین با استفاده از اطلاعات مربوط به باندهای حرارتی ماهواره لندست ۵ (باند ۶) و ماهواره لندست ۸ (باند ۱۰) بر اساس رابطه (۸) برآورد شد (Allen, Tasumi, Mors & Terzza, 2002):

$$T_s = \frac{k_2}{\ln \frac{\varepsilon_{NB} \times k_1}{R_C}} + 1$$ رابطه (۸)

که در آن k_1 و k_2 ضرایب کالیبراسیون، R_C رادیانس حرارتی تصحیح شده و ε_{NB} گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی می‌باشد. رادیانس حرارتی تصحیح شده، رادیانس واقعی گسیل شده از سطح زمین است که برای محاسبه آن نیاز به گسیلمندی در باند حرارتی می‌باشد (رابطه ۹) (Allen et al., 2002):

$$R_c = \frac{L_\lambda - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon_{NB}) R_{sky}$$ رابطه (۹)

که در آن L_λ رادیانس طیفی در بالای اتمسفر، R_p رادیانس مسیر در باند حرارتی، τ_{NB} قابلیت عبور اتمسفری در باند حرارتی، ε_{NB} گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی و R_{sky} تابش آسمان صاف در باند حرارتی می‌باشد. کلیه اجسامی که دمای آن‌ها زیادتر از صفر مطلق باشد از خود حرارت گسیل می‌کنند. بر این اساس، داده‌های رسیده به سنجنده می‌توانند با استفاده از رابطه (۱۰) به تابش طیفی در سطح سنجنده تبدیل شوند (Allen et al., 2002):

$$L_\lambda = M_L \times Q_{CAL} + A_L$$ رابطه (۱۰)

که در آن M_L عامل مقیاس‌سازی ضربی اختصاصی باند، Q_{CAL} عدد رقومی و A_L عامل مقیاس‌سازی افزایشی اختصاصی باند می‌باشد. گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی با توجه به تراکم پوشش گیاهی و روابط ارائه شده در جدول ۳ به‌دست آمد.

جدول ۳- گسیلمندی سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی و سطح برگ (Allen et al., 2002)

Table 3- Land surface emissivity and vegetation and leaf surface indices

NDVI	LAI<4	ε_{NB}=0.97+0.0037LAI
NDVI>0	LAI≥3	ε_{NB}=0.98
(Water) NDVI<0	α<0.47	ε_{NB}=0.99
(Snow) NDVI<0	α≥0.47	ε_{NB}=0.99

پس از محاسبه شاخص‌ها، به‌منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرها و تولید نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، از تجزیه مؤلفه‌های اصلی در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی یک روش مهم برای فشرده‌سازی داده‌های چندبعدی است که می‌تواند به حذف اثر هم‌خطی بین متغیرها کمک کند (Mishra, Taraphder, Swain & Laishram, 2017). ازآنجایی‌که محدوده مقادیر در شاخص‌های مختلف متفاوت است، همه شاخص‌ها باید قبل از اعمال تجزیه مؤلفه‌های اصلی نرمال شوند تا محدوده اعداد بین ۰ تا ۱ باشد (Jolliffe & Cadima, 2016). نرمال‌سازی شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار Terrset2020 انجام شد. در نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، مقدار پیکسل نزدیک‌تر به ۱ منجر به وضعیت محیط‌زیستی بهتر، درحالی‌که مقدار نزدیک‌تر به ۰ منجر به وضعیت محیط‌زیستی ضعیف‌تر می‌شود. علاوه بر این، مقادیر شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور به پنج طبقه با فواصل ۰/۲ طبقه‌بندی و به‌عنوان خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی نام‌گذاری شدند تا کیفیت محیط‌زیست محدوده موردمطالعه را با جزئیات بیشتری نشان دهد. به‌منظور استخراج شاخص RSEI از اولین مؤلفه PCA که بیشترین درصد تغییرات را دارد، استفاده شد (رابطه ۱۱).

$$RSEI_0 = PC1[f(NDVI; LSM; NDBSI; LST)]$$ رابطه (۱۱)

در مواردی که نقشه شاخص‌های مثبت (پوشش گیاهی و رطوبت سطح زمین) در مؤلفه اول منفی باشد، شاخص RSEI با استفاده از رابطه (۱۲) اصلاح می‌شود، تا مقادیر بالاتر نشان‌دهنده وضعیت محیط‌زیستی بهتری باشد (Hu & Xu, 2018).

$$RSEI = 1 - RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI; LSM; NDBSI; LST)]$$ رابطه (۱۲)

۲-۴- خودهمبستگی فضایی

شاخص خودهمبستگی فضایی جهانی موران (Moran's I) و شاخص محلی تحلیل فضایی (LISA[1]) برای تجزیه‌وتحلیل همبستگی فضایی کیفیت محیط‌زیست استفاده شد. هرچه قدر مطلق Moran's I به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی فضایی قوی‌تر است. شاخص LISA می‌تواند مقدار Moran's I را در هر واحد فضایی تجزیه‌وتحلیل و به‌طور مؤثر ارتباط فضایی محلی را منعکس کند. هنگامی‌که خودهمبستگی فضایی جهانی وجود داشته باشد، می‌تواند تجزیه‌وتحلیل کند که آیا ناهمگنی فضایی وجود دارد یا خیر (Jing et al., 2020). شاخص جهانی موران و شاخص محلی تحلیل فضایی به ترتیب با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) (Karbalaei Saleh et al., 2021) و خودهمبستگی فضایی با استفاده از نرم‌افزار Geoda محاسبه شد.

[1]. Local Indicator of Spatial Analysis

درنهایت، نقشه‌ای به‌دست آمد که نقشه RSEI را به پنج طبقه خوشه‌بندی، یعنی بالا–بالا (نقاط داغ)، پایین–پایین (نقاط سرد)، پایین–بالا، بالا–پایین و غیرقابل توجه تقسیم می‌کند.

$$I_g = N\sum_i\sum_j W_{ij}(x_i-\mu)(x_j-\mu)\Big/\left(\sum_i\sum_j W_{ij}\right)\sum_i(x_i-\mu)^2$$ رابطه (۱۳)

$$I_l = (x_i-\mu)\Big/\sum_i(x_i-\mu)^2\sum_j W_{ij}(x_j-\mu)$$ رابطه (۱۴)

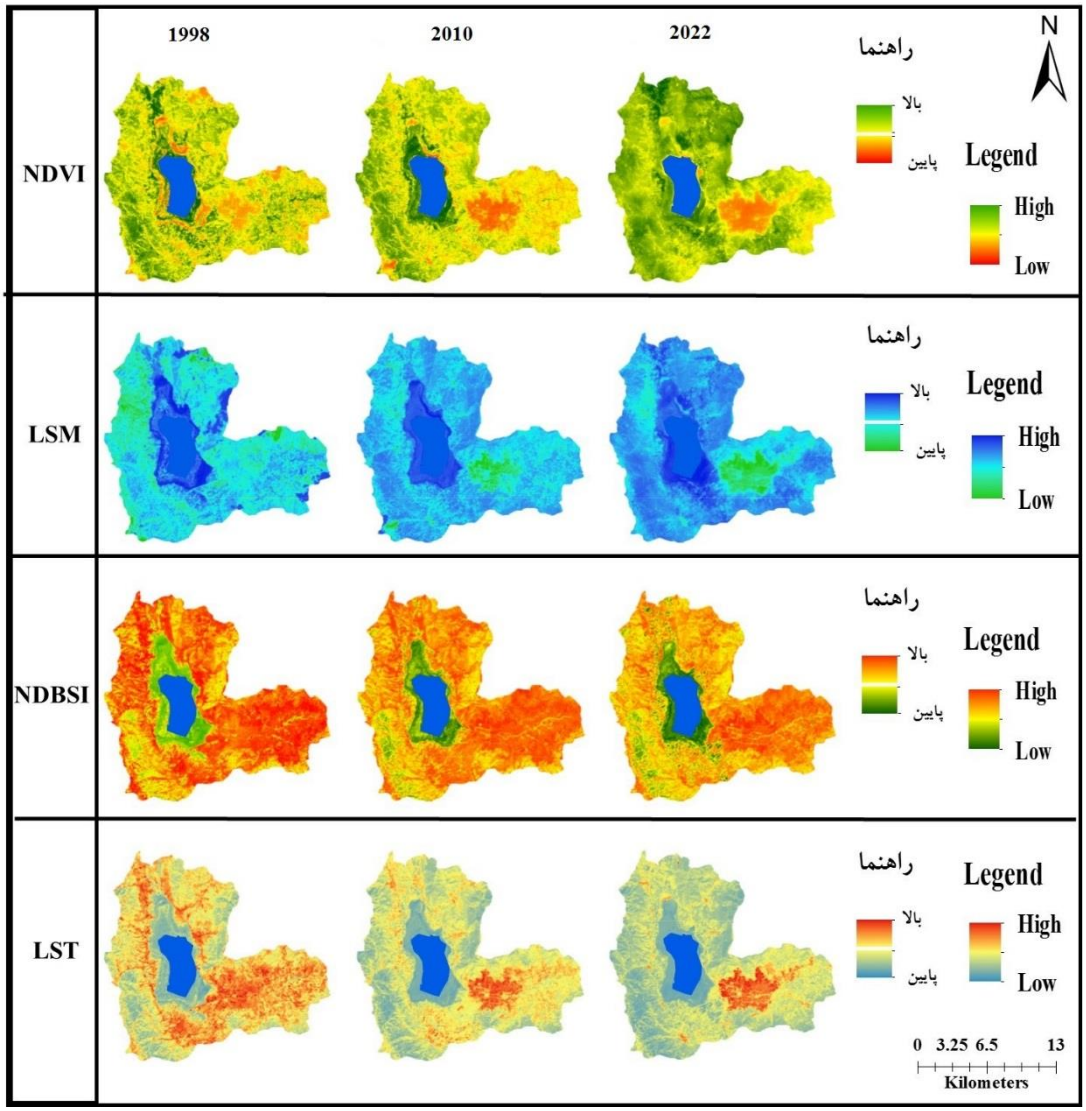
که در آن‌ها W_{ij}، x_i، x_j، μ و N به ترتیب وزن‌های نرمال شده، مقدار RSEI در پیکسل i، مقدار RSEI در پیکسل j، میانگین مقدار RSEI محدوده موردمطالعه و تعداد کل پیکسل‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات مکانی–زمانی کیفیت محیط‌زیست

با در نظر گرفتن تأثیر یک منطقه بزرگ از آب (دریاچه زریبار) بر نتایج محاسباتی، محدوده دریاچه پوشانده شد. در این مطالعه از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور برای شناسایی تغییرات مکانی–زمانی کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ با امتیازدهی مؤلفه اصلی اول (PC1) از چهار شاخص (NDVI، LSM، NDBSI و LST) استفاده شد (شکل ۳). همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقادیر ویژه PC1 در هرسال بیش از ۶۰ درصد (از ۶۳/۷۸ تا ۷۱/۳۵ درصد) است. دو گروه متضاد از شاخص‌ها بر اساس سهم آن‌ها در کیفیت محیط‌زیست مشاهده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های NDVI و LSM در یک گروه و شاخص‌های LST و NDBSI در گروه دیگری برای ایجاد شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور قرار دارند. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار در سال‌های مذکور، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور و چهار شاخص موردمطالعه محاسبه شد (جدول ۵). بر اساس نتایج، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۳۸ و ۰/۳۷ بوده است و روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور کم‌تر از ۰/۴۰ به‌دست آمد که نشان‌دهنده وضعیت نه‌چندان مناسب حوضه دریاچه زریبار است. هرچه مقدار سبزی و پوشش گیاهی و مقدار رطوبت و محتوای آب سطحی بیشتر باشد، کیفیت محیط‌زیست بهتر است و بالعکس. هرچه مقدار NDBSI بالاتر باشد، تخریب خاک در منطقه جدی‌تر و کیفیت محیط‌زیست بدتر می‌شود. هرچه ارزش حرارتی بالاتر باشد، کیفیت محیط‌زیست در منطقه بدتر است (Liu, Yu & Mu, 2022) . NDVI و LSM که تأثیر مثبتی بر کیفیت محیط‌زیست دارند، بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ به ترتیب از ۰/۵۶ به ۰/۴۵ و از ۰/۶۴ به ۰/۶۲ کاهش و NDBSI و LST، که

اثر منفی بر کیفیت محیط‌زیست تحمیل می‌کنند، به ترتیب از ۰/۶۳ به ۰/۶۵ و از ۰/۷۷ به ۰/۸۷ افزایش یافتند. شاخص NDBSI منعکس‌کننده تغییر ساخت‌وساز در منطقه موردمطالعه است. این پدیده نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی شهری و ساخت‌وساز در حوضه دریاچه زریبار تأثیرات آشکاری بر کیفیت محیط‌زیست شهری دارد.



شکل ۳- شاخص‌های NDVI، LSM، NDBSI و LST در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

Fig. 3. NDVI, LSM, NDBSI and LST indices in 1998, 2010 and 202

جدول ۴- مشارکت چهار شاخص در مؤلفه اصلی اول (PC1)

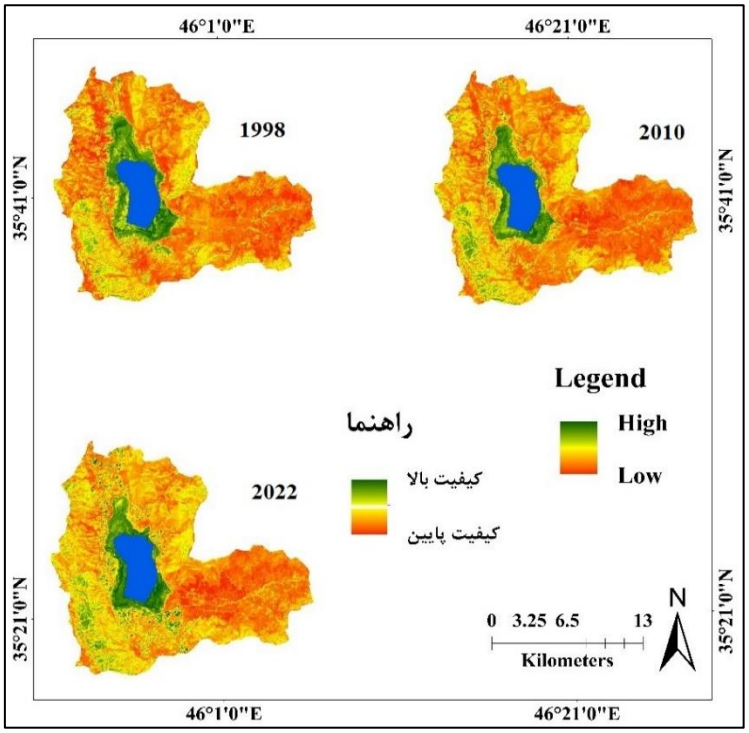
Table 4- Participation of four indicators in the first principal component (PC1)

2020	2010	1998	شاخص/مؤلفه اصلی اول PC1
-0.32	-0.25	-0.22	NDVI
-0.54	-0.55	-0.55	LSM
0.58	0.58	0.58	NDBSI
0.50	0.52	0.54	LST
71.35	67.33	63.78	مقادیر ویژه (درصد) Eign Value (%)

جدول ۵- میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور و چهار شاخص (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Table 5- Average RSEI and four indices (1998, 2010 and 2022)

2020	2010	1998	شاخص‌ها Indices
0.45	0.53	0.56	NDVI
0.62	0.63	0.64	LSM
0.65	0.64	0.63	NDBSI
0.87	0.82	0.77	LST
0.37	0.38	0.39	RSEI



شکل ۴- نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 4. RSEI map of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

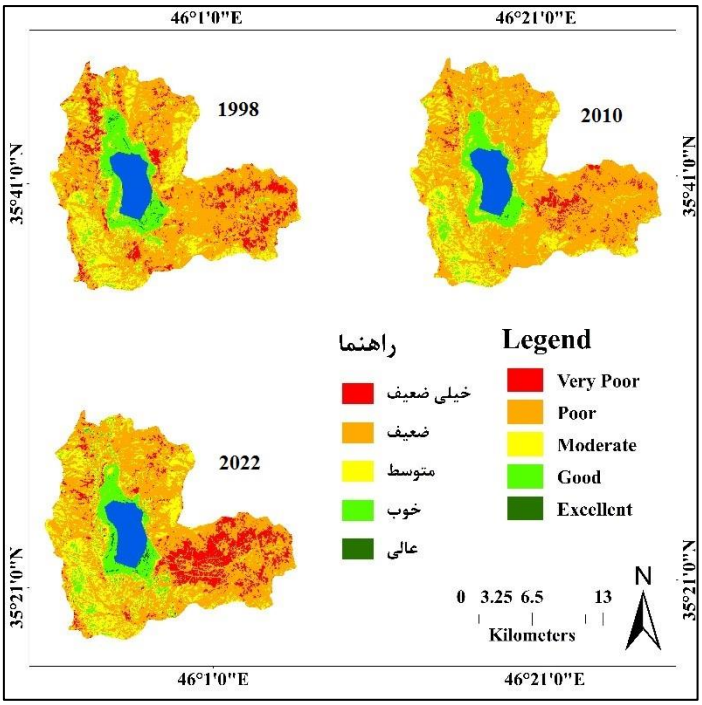
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مناطق خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی که به ترتیب با رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، سبز روشن و سبز ارائه شده است، نشان‌دهنده تفاوت در سطوح کیفیت محیط‌زیست مناطق مختلف حوضه دریاچه زریبار است. جدول ۶ مقادیر عددی مربوط به پنج طبقه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور را نشان می‌دهد. مساحت طبقه با کیفیت محیط‌زیست ضعیف در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۵۹/۳۶، ۶۵/۴۹ و ۵۶/۰۲ درصد به‌دست آمد. علاوه بر این، بدیهی است که مناطق با کیفیت محیط‌زیست خیلی ضعیف در سال‌های موردمطالعه تنها بخش کوچکی از محدوده موردمطالعه را نسبت به طبقه ضعیف به خود اختصاص داده‌اند، به‌استثنای سال ۲۰۲۲ که وسعت این طبقه به ۱۲/۱۳ درصد از محدوده موردمطالعه رسید. در طبقه با کیفیت محیط‌زیست متوسط از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ روند افزایشی مشاهده شد. بر اساس نتایج طبقه‌بندی شده (جدول ۶ و شکل ۵)، تقریباً بیش از ۸۰ درصد از کل محدوده موردمطالعه متعلق به طبقات ضعیف و متوسط بوده است. برای مناطق با سطح شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور ضعیف و متوسط، حفاظت از خاک و جلوگیری از تبدیل مساحت زیادی از اراضی کشاورزی به مناطق ساخته شده در طول توسعه شهری ضروری است. لین و همکاران (Lin et al., 2020) گزارش دادند که مناطق ساخته شده از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ به میزان ۱۶/۲۰ درصد افزایش یافته است، و بسیاری از اراضی زیر کشت به مناطق ساخته شده در جزیره هایتان[1] تبدیل شده است. در پژوهش حاضر طبقه با کیفیت محیط‌زیست خوب تا سال ۲۰۱۰ روند کاهشی را تجربه کرد، سپس در سال ۲۰۲۲ روند افزایشی نشان داد. این روند برای طبقه عالی نیز مشاهده شد (جدول ۶). منطقه با سطوح عالی و خوب شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور عمدتاً متعلق به اراضی جنگلی و نیزار است که در آن باید از مزاحمت انسانی به‌ویژه در مناطق اطراف دریاچه زریبار اجتناب شود.

جدول ۶- طبقه‌بندی حوضه دریاچه زریبار در سال‌های موردمطالعه بر اساس شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور

Table 6- Classification of Zaribar lake basin in the studied years Based on RSEI

عالی Exellent		خوب Good		متوسط Moderate		ضعیف Poor		خیلی ضعیف Very Poor		سال/کیفیت اکولوژیکی طبقه Class of Ecological Quality
درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	
0.69	105.98	10.04	1529.46	20.19	3047.22	59.36	9036.27	9.69	1475.64	1998
0.24	37.68	8.68	1322.10	21.47	3268.35	65.49	9968.58	4.09	623.97	2010
0.75	114.36	9.51	1448.01	21.56	3283.02	56.02	8527.86	12.13	1847.43	2022

[1] Haitan



شکل ۵- نقشه‌های طبقه‌بندی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 5. Classification maps of RSEI of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۳-۲- مقایسه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور با نقشه کاربری اراضی

ازآنجایی‌که کاربری اراضی و تغییرات آن‌ها می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت محیط‌زیست داشته باشد (Kafy, Rahman, Faisal, Hasan & Islam, 2020)، به‌منظور تفسیر بهتر وضعیت کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار، نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ تهیه شد (شکل ۶). بر اساس بوم‌سازگان حوضه دریاچه زریبار، پنج نوع کاربری (مناطق ساخته شده، اراضی کشاورزی، دریاچه، جنگل و نیزار) برای طبقه‌بندی در سه سال موردمطالعه انتخاب شدند. جدول ۷ تغییرات مساحت هر کاربری را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که انواع کاربری اراضی و مقادیر شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های مختلف سازگاری خوبی دارند، همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۷ ارائه شده است، بیشتر تغییرات مربوط به اراضی کشاورزی است. مساحت اراضی کشاورزی در سال ۲۰۲۲، ۱۰/۴۷ درصد کاهش یافت. همچنین تغییر اراضی جنگلی به‌عنوان شاخصی مثبت برای کیفیت محیط‌زیست حدود ۸/۵۷ درصد در سال ۲۰۲۲ نسبت به ۲۰۱۰ افزایش نشان داد. مناطق ساخته شده با کیفیت محیط‌زیست رابطه معکوس دارند و تغییرات آن بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۰، ۲/۳۳ درصد می‌باشد. با توسعه شهرنشینی، سطح غیرقابل نفوذ در حوضه دریاچه زریبار افزایش و تا حدودی بر روند بهبود کیفیت محیط‌زیست تأثیر گذاشته است، به این معنی که ارزش شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در منطقه روند کاهشی نشان داده است. این موارد نشان

می‌دهد که روند کیفیت محیط‌زیست در محدوده موردمطالعه به انواع کاربری اراضی مرتبط است. لین و همکاران (Lin et al., 2020) از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور برای ارزیابی تغییرات اکولوژیکی شهرستان پینگتان[1](یک شهر ساحلی در چین) استفاده کردند و روند کاهشی در این شاخص را گزارش دادند. آن‌ها ادعا نمودند که روند کاهشی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور عمدتاً به کاهش پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی مربوط می‌شود. ژو و همکاران (Zhu, Chen, Zhen & Niu, 2020) تغییرات کاربری اراضی ناشی از گسترش شهری را عامل اصلی بدتر شدن شرایط اکولوژیکی شهر ژنگچو[2] در چین معرفی کردند. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور تحت مدل مفهومی فشار-حالت-پاسخ، که یکی از متداول‌ترین مدل‌های مفهومی محیطی است، توسعه یافته است. در میان چهار شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، NDBSI برای نشان دادن فشار ناشی از فعالیت‌های انسانی بر روی یک بوم‌سازگان استفاده می‌شود، NDVI حالت اکولوژیکی سطح زمین را قبل و بعد از تغییرات اندازه‌گیری می‌کند، LST و LSM پاسخ بوم‌سازگان به آب و هوا را منعکس می‌کنند (Wu et al., 2023). تجزیه‌وتحلیل بیشتر شاخص‌های موردمطالعه برای شناسایی علل اصلی تغییرات ضروری است. شاخص NDVI که نمایانگر پوشش گیاهی است در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۳ و ۰/۴۵ به‌دست آمد. همان‌طور که در نقشه کاربری اراضی (شکل ۶ و جدول ۷) نشان داده شده است، درصد پوشش گیاهی (اراضی کشاورزی، جنگل و به ویژه نیزار) در برخی از این سال‌ها با NDVI رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، درصد اراضی کشاورزی در سال ۲۰۲۲ و جنگل در سال ۲۰۱۰ به ترتیب حدود ۱۰/۴۷ و ۷/۶۹ درصد کاهش نشان داد. میانگین شاخص NDBSI در منطقه نشان داد که فشارهای انسانی در منطقه در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۶۴ و ۰/۶۵ بوده است. این شاخص در طی دوره موردمطالعه افزایش یافت. بین این شاخص با مناطق ساخته شده رابطه مستقیم مشاهده شد. ازاین‌رو، تغییرات کاربری اراضی، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تغییر کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار شناخته شد که با یافته‌های سایر پژوهشگران همسو است (Karbalaei Saleh et al., 2021; Hang, Luo, Cao & Li, 2020).

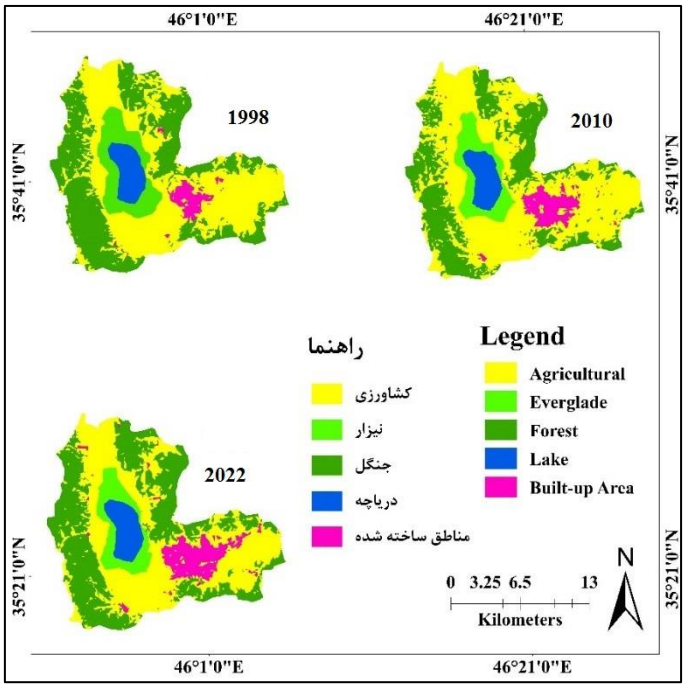
جدول ۷- تغییرات مساحت کاربری اراضی حوضه دریاچه زریبار در سال ۲۰۲۲-۱۹۹۸

Table 7- Changes in the land use area of Zaribar lake basin in 1998-2022

سال/نوع کاربری اراضی	مناطق ساخته شده		اراضی کشاورزی		جنگل		نیزار	
	Built-up Area		**Agricultural Area**		**Forest**		**Everglade**	
Land use Type	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)
1998	486.83	3.03	7365.91	45.86	5859.82	36.49	1554.84	9.68
تغییرات (۲۰۱۰-۱۹۹۸)	309.30	1.91	1300.36	8.01	-1226.15	-7.69	-355.29	-2.23

[1] Pingtan
[2] Zhengzhou

7.45	1199.51	28.80	4633.47	53.87	8666.27	4.94	796.13	Changes (1998-2010) 2010
-0.33	-55.62	8.75	1367.53	-10.47	-1740.39	2.33	371.99	تغییرات (۲۰۱۰-۲۰۲۲)
7.12	1143.89	37.37	6001.20	43.13	6925.29	7.27	1168.12	Changes (2010-2022) 2022



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

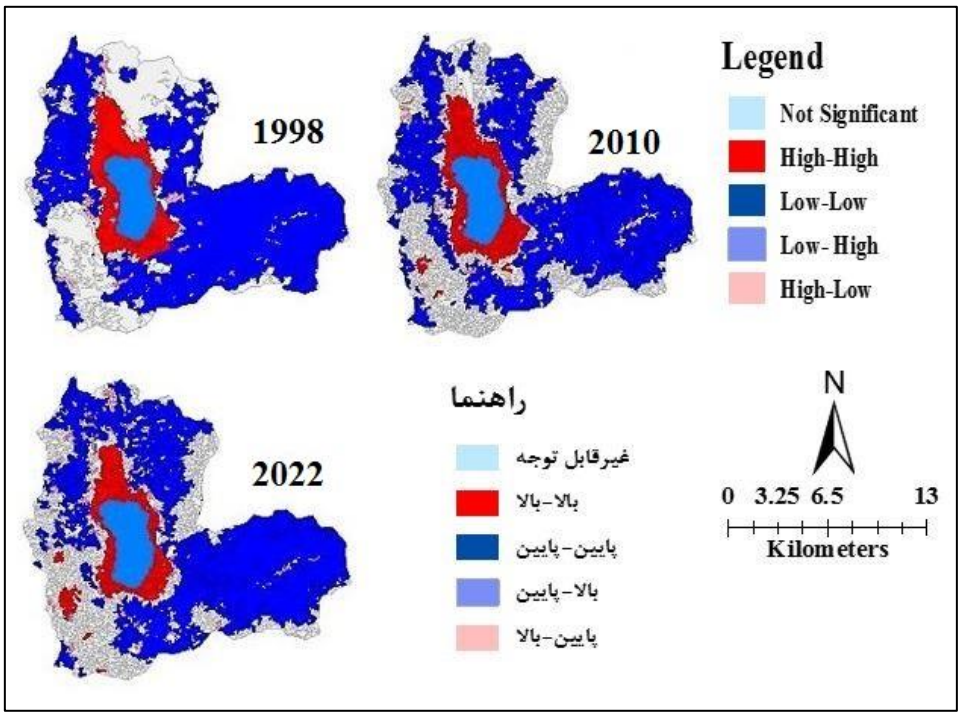
Fig. 6. Land use map of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۳-۳- تحلیل خودهمبستگی فضایی

به‌منظور درک توزیع مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست، الگوی همبستگی فضایی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور با استفاده از نقشه خوشه‌بندی شاخص محلی تحلیل فضایی (LISA) به‌دست آمد (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود، منطقه خوشه‌بندی بالا-بالا (نقاط داغ) در مناطقی از حوضه دریاچه زریبار که از پوشش گیاهی متراکم (جنگل و نیزار) برخوردار می‌باشد توزیع شده است. علاوه بر این، منطقه خوشه-بندی پایین-پایین (نقاط سرد)، در مناطقی با کمبود پوشش گیاهی یا مناطقی که بیشتر توسط انسان تخریب شده‌اند مانند مناطق ساخته شده شایع‌تر است. منطقه خوشه‌بندی پایین-پایین (نقاط سرد) به‌طور مداوم از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ افزایش یافته است، که نشان دهنده توسعه شهرنشینی می‌باشد و منجر به بدتر شدن کیفیت محیط‌زیست شده است. در پژوهش ژیونگ و همکاران (Xiong et al., 2021) توزیع منطقه خوشه-بندی پایین-پایین (نقاط سرد) عمدتاً در نواحی اطراف دریاچه ارهای[1] مشاهده شد. این مناطق پرجمعیت با

[1] Erhai

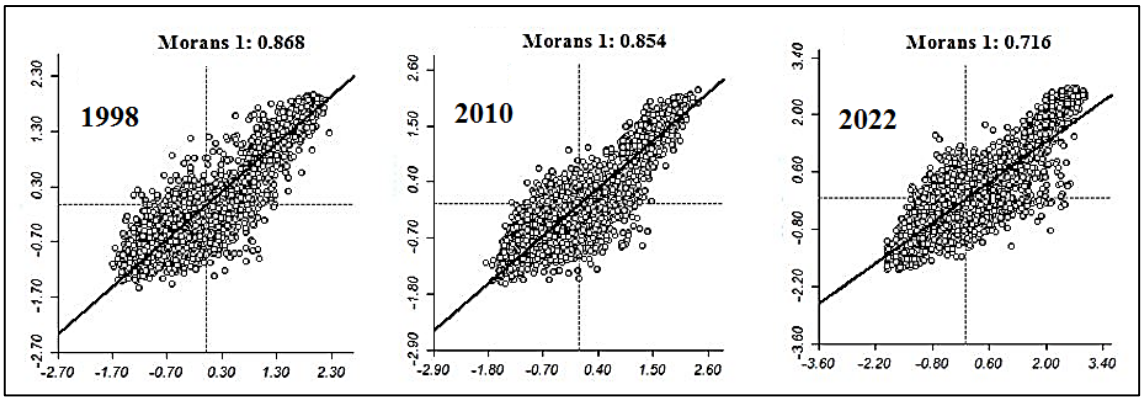
فعالیت‌های مکرر انسانی بودند. مساحت مناطق ساخته شده در نواحی اطراف دریاچه ارهای از ۹۳/۳۸ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به ۱۰۳/۵۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۵ افزایش یافت. بر اساس نتایج پژوهش لی و همکاران (Li, Bai & Alatalo, 2020) در برخی از مناطق توسعه اقتصادی (به‌عنوان‌مثال تیانجینگ[1] و مانجیانگ[2]) منطقه خوشه‌بندی پایین-پایین (نقاط سرد) به‌طور مداوم از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹ افزایش یافت. این افزایش سطح عمدتاً ناشی از تبدیل اراضی کشاورزی و علفزار به مناطق ساخته شده بود. نتایج نمودارهای پراکندگی شاخص جهانی موران، کاهش پیوسته همبستگی را از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد، زیرا از حدود ۰/۸۶ در سال ۱۹۹۸ به ۰/۷۱ در سال ۲۰۲۲ تغییر کرد (شکل ۸). کاهش شاخص جهانی موران نشان دهنده کاهش همگنی در سال‌های موردمطالعه بود. با کاهش همگنی، نقاط با کیفیت محیط‌زیست بالا از یکدیگر جدا و تکه تکه شده‌اند. توسعه سریع اقتصادی و گسترش شهری، سطوح غیرقابل نفوذ، اراضی اکولوژیکی بیشتری را در مقیاس شهری اشغال کرده‌اند که منجر به کیفیت محیط‌زیست ضعیف‌تر و درنهایت کاهش ارزش شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در حوضه دریاچه زریبار شده است.



شکل ۷- نقشه شاخص محلی تحلیل فضایی حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 7. Local index map of spatial analysis of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

[1] Tianjing
[2] Manjiang



شکل ۸- نمودار پراکندگی شاخص موران در حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 8. Scatter diagram of Moran index in Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۴- جمع‌بندی

بوم‌سازگان آبی در معرض تأثیرات قابل‌توجه افزایش فعالیت‌های انسانی، بازسازی سیمای سرزمین و گسترش شهری هستند که منجر به تغییرات در کیفیت محیط‌زیست و مسائل امنیتی اکولوژیکی شهری می‌شود.

فناوری سنجش‌ازدور برای تعیین توزیع فضایی وضعیت محیط‌زیستی دارای ارزش است و معیارهای اندازه‌گیری فرآیندهای محیط‌زیستی را فراهم می‌کند. در این مطالعه از تصاویر لندست ۵ و ۸ برای استخراج سبزی، رطوبت، گرما و خشکی استفاده شد. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور نه‌تنها یک مقدار عددی واحد برای توصیف وضعیت کلی محیط‌زیستی فراهم می‌کند، بلکه یک تصویر محیط‌زیستی قابل‌مشاهده نیز دارد که موقعیت و میزان شرایط مختلف محیط‌زیستی را نشان می‌دهد. چنین اطلاعاتی برای فرآیند تصمیم‌گیری در مورد مدیریت و بازیابی کیفیت محیط‌زیستی منطقه از جمله اقدامات کنترل تخریب اراضی جنگلی از اهمیت بالایی برخوردار است. تجزیه‌وتحلیل تغییرات کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار برای سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور انجام شد. علاوه بر این، ویژگی‌های تمایز مکانی کیفیت محیط‌زیست موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرسبزی و رطوبت اثرات مثبت و گرما و خشکی اثرات منفی بر کیفیت محیط‌زیست دارند. اثر بازدارندگی NDBSI و LST به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از اثر ترویجی NDVI و LSM بر محیط‌زیست محدوده موردمطالعه بود. طبقه ضعیف شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور بیشترین مساحت را به خود اختصاص داد. سطوح عالی و خوب شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور عمدتاً مربوط به اراضی جنگلی و نیزار اطراف دریاچه زریبار بود. یافته‌ها حاکی از آن است که کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار کاهش چشمگیری داشته به‌صورتی که میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال ۱۹۹۸ مقدار ۰/۳۹ بوده اما در سال ۲۰۲۲ این مقدار به

۰/۳۷ رسیده است. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه نقشه کاربری اراضی با شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار شناسایی شد. نتایج حاصل از شاخص موران نشان داد که میزان خودهمبستگی فضایی در سال ۲۰۲۲ در مقایسه با سال ۱۹۹۸ نسبتاً ضعیف بوده و توزیع فضایی تصادفی و پراکنده‌ای در محدوده موردمطالعه مشاهده شد که می‌توان آن را به مداخلات انسانی نسبت داد. محیط‌زیست محیطی پیچیده است، بنابراین با استفاده از چهار شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور می‌توان وضعیت آن را تخمین زد. در مطالعات آینده می‌توان از داده‌های مکانی متنوع‌تری مانند بهره‌وری خالص اولیه و ذرات معلق در هوا استفاده شود.

Refrences

Allen, R. G., Tasumi, M., Mors, A., & Terzza, R. (2002). Satellite-Based Evapotranspiration by Energy Balance for Western States Water Management. *US Bureau Reclamation Evapotranspiration workshop*. https://doi.org/10.1061/40792(173)556

Arekhi, S., Mahmoudian, A., & Emadaddian, S. (2022). Forest Degradation using GIS and Logistic Regression (Case Study: Forests of Sardasht). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(4), 69-92. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.70743.1070

Ariken, M., Zhang, F., Liu, K., Fang, C., & Kung, H. T. (2020). Coupling coordination analysis of urbanization and ecoenvironment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data. *Ecological Indicators*, *114*, 106331. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106331

Esmaeili, H., Mirmousavi, S., & Soheili, E. (2022). Investigation of Agricultural Drought Time Series in Darab City using Remote Sensing and Google Earth Engine System. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(4), 185-203. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.69186.1029

Hang, X., Li, Y., Luo, X., Xu, M., & Han, X. (2020). Assessing the ecological quality of Nanjing during its urbanization process by using satellite, meteorological, and socioeconomic data. *Journal of Meteorological Research*, *34*(2), 280-293. https://doi.org/10.1007/s13351-020-9150-6

Hang, X., Luo, X. C., Cao, Y., & Li, Y. C. (2020). Ecological quality assessment and urbanization impact based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, *31*, 219-229. https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202001.030

Hu, X., & Xu, H. (2018). A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, *89*, 11-21. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.006

Jalilian, Z., & Amanollahi, J. (2023). Evaluating Ecological Degradation of Kosalan Protected Area using Remote Sensing and GIS. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(1), 41-61. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75467.1184

Jing, Y., Zhang, F., He, Y., Kung, H., Johnson, V. C., & Arikena, M. (2020). Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, *110*, 105874. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105874

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *374*(2065), 20150202. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Kafy, A. A., Rahman, M. S., Faisal, A. A., Hasan, M. M., & Islam, M. (2020). Modelling future land use land cover changes and their impacts on land surface temperatures in Rajshahi, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *18*, 100314. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100314

Karbalaei Saleh, S., Amoushahi, A., & Gholipour, M. (2021). Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: a case study of central Iran. *Environmental Monitoring Assessment, 193*(5), 305. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09082-2

Li, J., Bai, Y., & Alatalo, J. M. (2020). Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystem Services, 42*, 101081. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101081

Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., & Mikhailova, E. A. (2022). Monitoring Ecological Changes on a Rapidly Urbanizing Island Using a Remote Sensing-Based Ecological Index Produced Time Series. *Remote Sensing, 14*(22), 5773. https://doi.org/10.3390/rs14225773

Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Yu, K., Yang, L., & Liu, J. (2020). Monitoring land cover change on a rapidly urbanizing island using Google Earth Engine. *Applied Sciences, 10*(20), 7336. https://doi.org/10.3390/app10207336

Liu, Q., Yu, F., & Mu, X. (2022). Evaluation of the Ecological Environment Quality of the Kuye River Source Basin Using the Remote Sensing Ecological Index. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(19), 12500. https://doi.org/10.3390/ijerph191912500

Mishra, S. P., Taraphder, S., Swain, D., & Laishram, M. (2017). Multivariate statistical data analysis-principal component analysis (PCA). *International Journal of Livestoke Research, 7*(5), 60-78. http://dx.doi.org/10.5455/ijlr.20170415115235

Sadeghi, A., Khaledi, J., & Nyman, P. (2018). Rainfall Variability and Land-Use Change in Arid Basins with Traditional Agricultural Practices; Insight from Ground Water Monitoring in Northwestern Iran. *Journal of Earth Science and Climatic Change, 9*(11), 2-7. https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000498

Wang, S., Zhang, M., & Xi, X. (2022). Ecological Environment Evaluation Based on Remote Sensing Ecological Index: A Case Study in East China over the Past 20 Years. *Sustainability, 14*(23), 15771. https://doi.org/10.3390/su142315771

Wu, A., Zhao, Y., Qin, Y., Liu, X, & Shen, H. (2023). Analysis of Ecological Environment Quality and Its Driving Factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China. *Sustainability, 15*(10), 7898. https://doi.org/10.3390/su15107898

Xiong, Y., Xu, W., Lu, N., Huang, S., Wu, C., Wang, L., … & Kou, W. (2021). Assessment of spatial–temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China. *Ecological Indicators, 125*, 107518. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107518

Xu, H. Q. (2013). A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. *China Environmental Science, 33*(5), 889-897.

Yang, Z., Tian, J., Su, W., Wu, J., Liu, J., Liu, W., & Guo, R. (2022). Analysis of ecological environmental quality change in the yellow river basin using the remote-sensing-based ecological index. *Sustainability, 14*(17), 10726. https://doi.org/10.3390/su141710726

Zawadzki, J., Przeździecki, K., & Miatkowski, Z. (2016). Determining the area of influence of depression cone in the vicinity of lignite mine by means of triangle method and LANDSAT TM/ETM+ satellite images. *Journal of Environmental Management, 166*, 605-614. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.010

Zhai, H., Xie, W., Li, S., & Zhang, Q. (2019). Urban Ecological Environment Construction Based on Remote Sensing Ecological Index. *Ekoloji Dergisi*, (108), 1583-1588.

Zhang, Z., Cai, Z., Yang, J., & Guo, X. (2022). Ecological environmental quality assessment of Chinese estuarine wetlands during 2000–2020 based on a remote sensing ecological index. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 981139. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.981139

Zhu, D., Chen, T., Zhen, N., & Niu, R. (2020). Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(13), 15716-15728. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08054-2

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.291-313 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.87528.1476 Open access

Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province)

Peyman Madanchi[a], Hamzeh Saeediyan[b*], Mahmood Damizadeh[c]

[a] *Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.*

[b] *Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.*

[c] *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran*

Received: 8 April 2024 ***Revised: 6 July 2024*** ***Accepted: 7 July 2024***

Extended Abstract

Introduction

Dust storms have become a serious problem in Iran, and the scope of this issue **is** increasing steadily. The country of Iran, due to its geographical location and climatic conditions, is particularly susceptible to dust storms. Dust storms and the spread of haze in various regions of the country have been some of the most significant environmental challenges in recent years, affecting not only Iran but also the Middle East and Western Asia. These challenges have had adverse social, economic, environmental**,** and commercial effects on the people of this region, severely disrupting their daily lives. Additionally, dust is considered a significant source of heavy metals in the environment**.** The aim of the present research is to examine meteorological codes and evaluate the performance of detection algorithms in identifying dust storms in Kerman Province. This study aims to provide a better understanding of dust phenomena in this province and assesses the accuracy and efficiency of various algorithms in detecting dust storms. Furthermore, it identifies the most effective algorithm for this purpose.

* .Corresponding author: Hamzeh Saeediyan Email: Hamzah.4900@yahoo.com Tel:09163900827

How to cite this Article: Madanchi, P. , Saeediyan, H. , & Damizadeh, M. (2024). Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4),291-313

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Material and Methods

Kerman Province, with an area of 182,301 km², is located in the southern part of Iran between 53°26' to 59°29' east longitude and 25°55' to 32° north latitude. It is the largest province in terms of area. The northern boundary of the province is bordered by the provinces of Khorasan and Yazd, the southern boundary by Hormozgan Province, the eastern boundary by Sistan and Baluchestan Province, and the western boundary by Fars Province. The average annual rainfall in the province is 145 millimeters, which is approximately 58% of the national average and 19% of the global average rainfall.

To evaluate meteorological data and satellite images in detecting dust phenomena in Kerman Province, data from thirteen synoptic stations covering a period of 20 years (2000 to 2020) were obtained from IRIMO. MODIS images were used to analyze the dust phenomenon. To detect dust, codes 06 and 07 were applied, along with algorithms such as Ackerman, TDI, TIIDI, Roskovensky and Liou, NDDI, and Miller.

Results and Discussion

Dust storms are common phenomena in arid and semi-arid regions of the world. In recent years, the occurrence of frequent and intense dust storms has become one of the most destructive environmental disasters in the Middle East, with Kerman Province being one of the regions most severely affected. This province has been given particular focus in this research.

The results showed that Sirjan station has the highest occurrence of dust storms with both local and regional origins, while Golbaf station has the lowest occurrence. Bam station recorded the highest annual frequency, while the least occurrence was observed in Babak city, with only two days of dust per year. Among the studied algorithms, the TIIDI and TDI algorithms demonstrated better performance compared to others. Overall, the annual frequency data with a horizontal visibility of 1,000 meters or less indicates an increasing trend in dust storm occurrence from 2000 to 2011, followed by a decline until 2020.

Conclusion

Although the Ackerman algorithm showed relatively acceptable performance in detecting dust, it performed poorly in northern regions and near dust source areas. Studies on other algorithms indicate inadequate performance in detecting dust phenomena in the studied area. Therefore, it is recommended that, considering the specific conditions of Kerman Province, serious attention should be given to identifying dust source areas and planning strategies to control and mitigate the negative effects of dust storms. This is essential for future research projects to prevent potential damage to industrial and agricultural facilities and other vital infrastructure.

Keywords: Dust Storms, MODIS Data, Meteorological Codes, Detection Algorithms, Kerman Province Dust.

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۳۱۳-۲۹۱

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/geoeh.2024.87528.1476 مقاله پژوهشی

ارزیابی داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در شناسایی پدیده گردوغبار مناطق بیابانی (مطالعه موردی: استان کرمان)

پیمان معدنچی – استادیار گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

حمزه سعیدیان[1]– استادیار گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

محمود دمی زاده – پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، تهران، ایران.

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۱/۲۰ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۱۶ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۴/۱۷

چکیده

توفان گردوغبار به یک معضل جدی در ایران تبدیل شده است و روزبه‌روز بر دامنه این معضل افزوده می‌شود. به‌منظور ارزیابی داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در آشکارسازی بررسی وضعیت رخداد پدیده گردوغبار در استان کرمان، داده‌های ایستگاه‌های سیزده ایستگاه سینوپتیک استان برای یک دوره ۲۰ ساله از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ هجری شمسی مختلف از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) دریافت شد و تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) مورداستفاده قرار گرفت. به‌منظور آشکارسازی گردوغبار کدهای ۰۶، ۰۷ و الگوریتم‌های Ackerman، TDI، TIIDI، Roskovensky and Liou,NDDI و Miller استفاده شد. نتایج نشان داد ایستگاه سیرجان بیشترین وقوع گردوغبار با منشأ محلی و منطقه‌ای را دارد و گلباف کمترین وقوع رخداد را دارد. ایستگاه بم بیشترین فراوانی سالانه را داراست و کمترین وقوع، شهر بابک با ۲ روز گردوغباری است. از میان الگوریتم‌های موردبررسی الگوریتم‌های TIIDI و TDI دارای عملکرد مناسب‌تری در میان سایر الگوریتم‌ها است. درمجموع بررسی داده‌های فراوانی سالانه دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر بیانگر روند افزایشی وقوع طوفان‌های گردوغبار از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ است و بعدازآن تا سال ۱۳۹۹ روند کاهشی را طی کرده است.

کلیدواژه‌ها: طوفان‌های گرد و غبار ، داده‌های MODIS ، کدهای هواشناسی ، الگوریتم‌های شناسایی ، گرد و غبار استان کرمان.

[1]. نویسنده مسئول : ۰۹۱۶۳۹۰۰۸۲۷

Email: h.saeediyan@areeo.ac.ir

۱- مقدمه

کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی درگیر توفان گردوغبار است (Nabavi, Moradi & Sharifi Kia, 2019). توفان‌های گردوغبار و انتشار ریز گردها در مناطق مختلف کشور یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سالیان اخیر در کشور و همچنین منطقه خاورمیانه و غرب آسیا بوده که اثرات نامطلوب اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و تجاری را برای مردم این منطقه به همراه داشته است و باعث اختلال در زندگی روزمره آن‌ها گردیده است. گردوغبار حتی یکی از منابع مهم فلزات سنگین در محیط‌زیست هم محسوب می‌شود (Makhfi, Karimi, Solgi & Bagherpor, 2022). پدیده‌های اقلیمی در مناطق مختلف جهان در ارتباط با ویژگی جغرافیایی هر منطقه متفاوت‌اند (Cheki Forak, Doostan & Minaei, 2023). بدون تردید دستیابی به مدیریت جامع سرزمین، نیازمند ارتباط مؤثر و هماهنگ، همکاری و هم‌افزایی تمام دست‌اندرکاران کلیدی است که دارای اهدافی مشترک ولی وظایف متمایزی هستند (Ghasemi Aryan, Sayed Akhlaghi, Farajollahi, Faiaz & Ganjali, 2021). تغییرات وسیع کاربری اراضی و تخریب مراتع و جنگل‌ها، استفاده نامطلوب از منابع طبیعی و محیط‌زیست و افزایش بیش‌ازحد فرسایش خاک در مناطق مختلف کشور را از علل افزایش و تشدید رخداد پدیده توفان‌های گردوغبار می‌توان دانست. با پیشرفت علم، ایجاد داده‌های ماهواره‌ای و همچنین مدل‌های انتقال ریزگرد و داده‌های جو بالا، شرایط طوری فراهم می‌باشد که در سطح جهانی امکان مطالعات علمی مختلف با دقت مناسب فراهم می‌باشد (Wald, Kaufman, Tanré & Gao, 1998; Gupta et al., 2006; Miller, 2003; Alam, Qureshi & Blaschke, 2011; Rashki et al., 2014). مطالعات مختلفی در سطح دنیا با توجه به اهمیت بالای شناسایی و کنترل غلظت گردوغبار که در سال‌های اخیر به یک بحران بین‌المللی تبدیل شده است، انجام شده و یا در حال انجام می‌باشد که هرکدام روش‌های مختلفی را در این زمینه مورد ارزیابی قرار داده‌اند و به نتایج مناسبی نیز رسیدند. همچنین ارزیابی عملکرد توده‌های گردوغبار و تکنیک‌های آشکارسازی تصویر نیز با استفاده الگوریتم‌های مختلف آشکارکننده در تمام دنیا در حال انجام می‌باشد که با توجه به وسعت مناطق موردمطالعه می‌توانند نقش مهمی در شناسایی و ارزیابی توده‌های مختلف گردوغبار ایجاد کنند. از دهه ۱۹۷۰ میلادی و با شروع عرضه تصاویر ماهواره‌ای به جوامع علمی و دانشگاهی، پژوهش در زمینه استفاده از دانش سنجش‌ازدور در زمینه شناسایی توده‌های گردوغبار انجام گرفته است و افراد مختلفی نظیر روسکونسکی و لئو (Roskovensky & Liou, 2003)، میلر (Miller, 2003)، کیو و همکاران (Qu, Hao, Kafatos & Wang, 2006)، ژائو و همکاران (Zhao, Ackerman & Guo, 2010) با ابداع شاخص‌ها و الگوریتم‌های مختلف نسبت به بررسی پدیده گردوغبار از طریق تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای پرداختند. اژدری مقدم و رئیس پور (Azhdari Moghadam & Raispoor, 2011) نیز در پژوهش خود با عنوان تحلیل آماری و شناسایی منشأ

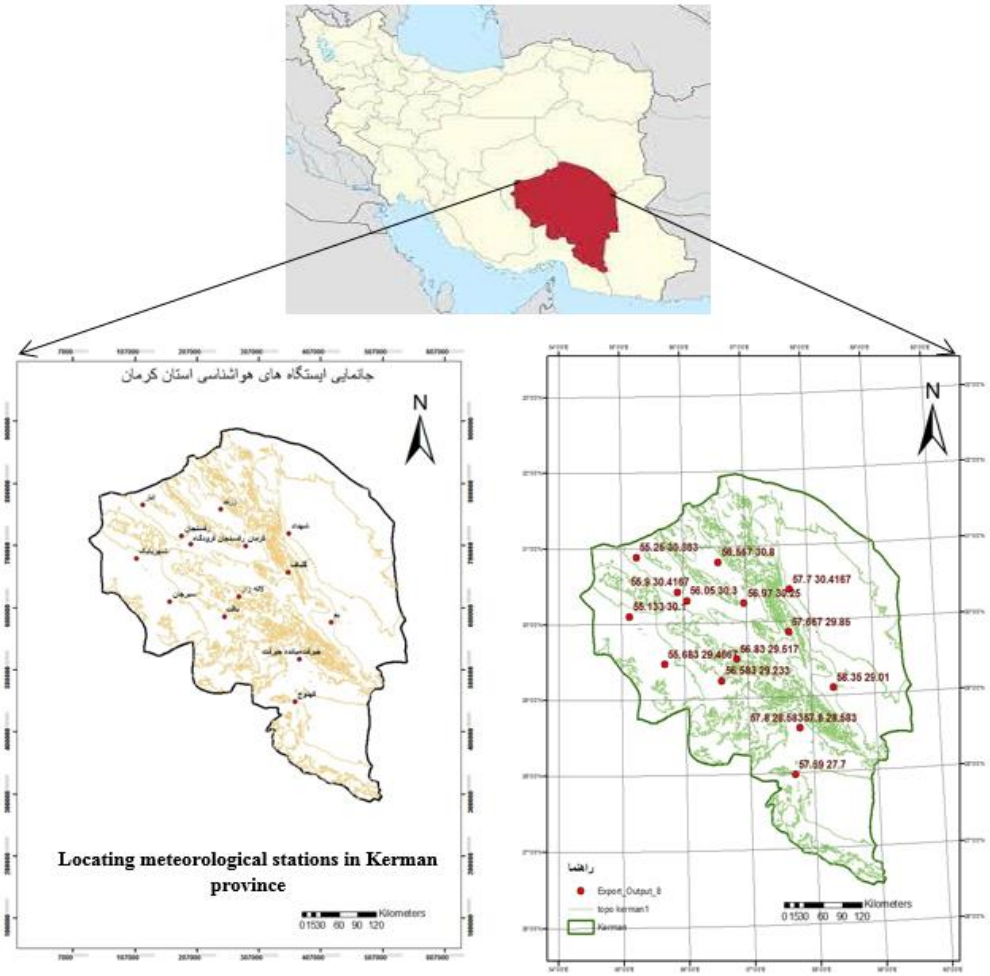
پدیده‌ی گردوغبار با استفاده از کدهای هواشناسی به بررسی رخدادهای گردوغبار استان خوزستان طی دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر متفاوت بودن منشأ، دوره تداوم و همچنین روند افزایشی امواج گردوغباری طی دوره آماری فوق در استان خوزستان بوده است. پور اصغریان و همکاران (Pour Asgharian, Nekoamal Kermani, Sisipour & Ranjbar Saadat abadi, 2014) در مطالعه خود با عنوان ارزیابی پدیده گردوغبار در استان هرمزگان به بررسی فراوانی این پدیده در استان هرمزگان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده بالا بودن تعداد روزهای گردوخاکی دهنده با منشأ داخلی می‌باشد؛ به‌طوری‌که از بین کدهای موردمطالعه در تمام ایستگاه‌ها به جزء جاسک کد ۰۵ فراوانی بیشتری را داشته است. ساریخانی و همکاران (Sarikhani, Dehghani, Karimi-Jashni & Saadat, 2021) در مطالعه‌ای بر اساس تصاویر ماهواره‌ای مودیس، الگوریتمی جدید برای شناسایی خودکار طوفان‌های گردوغبار بر روی سطوح آب و زمین توسعه دادند. نتایج نشان داد که روش تشخیص توفان گردوغبار در مناطق تحت پوشش با ویژگی‌هایی مانند سطح زمین روشن و ابرهایی که رفتار طیفی آن‌ها شبیه به گردوغبار است، عملکرد خوبی دارد. زند کریمی و همکاران (Zandkarimi, Fatehi & Shah-Hoseini, 2020) نسبت به توسعه یک الگوریتم آشکارسازی گردوغبار با عنوان IDII[۲] بر روی تصاویر سنجنده مودیس پرداختند. آن‌ها از شاخص خود بر روی ۱۲۹ رخداد گردوغبار در غرب آسیا بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ استفاده نمودند و بیان نمودند نتایج پژوهش می‌تواند جهت شناسایی گردوغبار روی سطوح خشکی و آب، تغییرات فصول، تشخیص مناطق گردوغباری از مناطق ابری مورداستفاده قرار گیرد. پدیده گردوغبار همواره یکی از بلایای طبیعی در مناطق خشک ازجمله در آفریقا، چین، استرالیا و ایران بوده است. برای کنترل پدیده گردوغبار نیاز به ایجاد مؤسسات و قوانین منطقه‌ای و بین‌المللی می‌باشد که مدیریت درست و علمی برای به حداقل رساندن بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از آن را ایجاد کنند. ضمناً تأکید بر رویکرد سیاست‌گذاری و مدیریت کردن از سطوح بالا به پایین در منابع طبیعی جهت حل کردن بحران‌های سیاستی در سطوح منطقه‌ای و بالاتر مناسب نیست (Ghorbani, 2014; Naderi, Ghorbani & Yavari, 2014; Salari, 2014; Rasekhi, 2014) و نیاز به مدیریت علمی با در نظر گرفتن کلیه عوامل ایجاد پدیده گردوغبار در سطوح منطقه‌ای و بین‌المللی می‌باشد. هدف تحقیق حاضر بررسی کدهای هواشناسی و عملکرد الگوریتم‌های آشکارساز در شناسایی توفان‌های گردوغبار در استان کرمان می‌باشد که می‌تواند باعث درک بهتر پدیده‌های گردوغبار در این استان شود و همچنین میزان دقت و کارایی الگوریتم‌های مختلف در شناسایی توفان‌های گردوغبار در استان کرمان را نیز ارزیابی می‌نماید و بهترین الگوریتم را نیز از نظر میزان کارایی معرفی می‌نماید.

2 Improved dust identification index (IDII)

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه موردمطالعه

استان کرمان با مساحت ۱۸۲۳۰۱ کیلومترمربع، در جنوب شوقی ایران بین ۵۳ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۲۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض شمالی قرار دارد که پهناورترین استان از نظر وسعت است حد شمالی استان به استان‌های خراسان، یزد و حد جنوبی آن به استان هرمزگان و حد شرقی به استان سیستان و بلوچستان و حد غربی آن به فارس محدود است (شکل۱). متوسط باران سالانه استان ۱۴۵ میلی‌متر می‌باشد که حدود ۵۸٪ متوسط بارش سالانه کشور و حدود ۱۹٪ میانگین بارش کره زمین می‌باشد. به‌طورکلی بادهای کرمان در فصول مختلف شامل باد شمالی، باد غربی، باد شرقی و باد جنوبی می‌باشد.



شکل ۱- مشخصات منطقه و ایستگاه‌های موردمطالعه

Fig.1. Characteristics of the study area and stations

بیشترین میزان باد مربوط به فصل بهار و پس‌ازآن مربوط به تابستان است و بادهای بسیار شدید با سرعت زیاد در دو فصل بهار و تابستان می‌وزد، جهت حاکم و غالب این بادها از جنوب غرب به طرف شمال شرق و مشرق می‌باشد. میانگین سرعت باد در استان کرمان دارای تغییرات متفاوتی در سال‌های مختلف می‌باشد به‌طوری‌که ۱۲/۸ متر در ثانیه در سال ۱۳۹۹ تا ۱۳/۹ متر بر ثانیه در سال ۱۳۹۸ نیز گزارش شده است. نواحی داخلی ایران که غالباً خشک و بیابانی است دارای پوشش گیاهی بسیار ضعیف و پراکنده می‌باشد. در منطقه کرمان به علت جنس خاک، اختلاف شدید درجه حرارت، کمبود ریزش باران و بادهای شدید منطقه‌ای فقدان پوشش گیاهی به‌طور گسترده نمایان است.

۲-۲ روش تحقیق

شرح کدهای هواشناسی

در ابتدا به‌منظور بررسی وضعیت رخداد پدیده گردوغبار در استان کرمان، داده‌های ایستگاه‌های مختلف از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردیدند. جهت مطالعه رخدادهای گردوغبار استان کرمان، تعداد سیزده ایستگاه سینوپتیک استان برای یک دوره ۲۰ ساله از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ هجری شمسی انتخاب شدند. در این پژوهش در ابتدا با استفاده از کدهای هواشناسی روزهای گردوغبار مشخص شدند. روز گردوغبار در این پژوهش روزی است که در طی یک شبانه‌روز حداقل یک‌بار در طی ۸ بار دیده‌بانی عناصر جوی در ساعات دیده‌بانی اصلی (۰۰، ۰۶، ۱۲، ۱۸) و فرعی (۰۳، ۰۹، ۱۵، ۲۱) گردوغبار گزارش شده باشد. کدهای هواشناسی مورداستفاده در جدول ۱، برای تعیین روزهای گردوغبار در این تحقیق شامل کدهای ۰۶ و ۰۷ می‌باشند.

جدول ۱- شرح کدهای مربوط به توفان‌های گردوغبار

Table 1- Description of the codes related to dust storms (Zangeneh, 2014)

کد Code	تعریف Definition
06	گردوغبار معلق در هوا که در اثر توفان شن و خاک که از نقاط دور به ایستگاه آمده است. Dust suspended in the air caused by a sand storm and dust that came to the station from far away.
07	گردوخاک یا شنی که به‌وسیله باد در ایستگاه و یا نزدیکی آن در ساعت دیده‌بانی بلند شده است. Dust or sand that has been lifted by the wind at or near the station during the watch.
08	گردبادهای تکامل یافته در خود ایستگاه و یا اطراف آن مشاهده شده است. Evolved tornadoes have been observed in or around the station itself.
09	توفان گردوخاک در ساعت دیده‌بانی در اطراف ایستگاه. Dust storms watched around the station.
30	توفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن که طی ساعت گذشته شدت آن کم شده است. A mild or moderate storm of dust or sand that has decreased in intensity over the

past hour.	
توفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن که طی ساعت گذشته شدت آن تغییر نکرده است.	31
A mild or moderate storm of dust or sand whose intensity has not changed over the past hour.	
توفان ملایم یا متوسط گردوخاک که طی ساعت گذشته شدت توفان افزایش یافته است.	32
A mild or moderately dusty storm that has increased in intensity over the past hour.	
توفان شدید گردوخاک یا شن که طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است.	33
The severe dust storm or sand, which has reduced the intensity of the storm over the past hour.	
توفان شدید گردوخاک یا شن که طی ساعت گذشته، شدت توفان تغییر نکرده است.	34
Severe dust or sand storm that the intensity of the storm has not changed over the past hour.	
توفان شدید گردوخاک یا شن که طی ساعت گذشته از شدت توفان افزایش یافته است.	35
Severe dust or sand storm that has increased in intensity over the past hour.	

شرح استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

پس از بررسی‌های آماری، بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی کشور، تاریخ رخدادهای شدید گردوغبار که دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش پیدا نموده بود استخراج گردیدند و آشکارسازی توده گردوغبار بر روی آن‌ها انجام گردید. برای آشکارسازی پدیده گردوغبار از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) در سطح پردازشی ۲ استفاده گردید.

همچنین تصاویر این سنجنده از طریق وب‌سایت https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov به‌صورت رایگان دانلود شد.

جدول ۲- مشخصات و کاربرد تصاویر ماهواره مودیس

Table 2 - Specifications and Application of MODIS Satellite Images

نسبت سیگنال به نویز SNR[3]) Signal-to-Noise Ratio	بازتاب طیفی[2] Spectral reflection	پهنای باند[1] Bandwidth	شمارهٔ باند Band	کاربرد اصلی Main Application
128	21/8	620-670	1	تعیین محدوده‌های ابرها و زمین‌ها Determining the boundaries of clouds and terrain
201	24/7	841-874	2	
243	35/3	459-479	3	شناخت ویژگی‌های ابرها و یا زمین‌ها Understanding the characteristics of clouds or terrain
228	29/0	545-565	4	
74	5/4	1240-1250	5	
275	7/3	1628-1652	6	
110	1/0	2105-2155	7	

880	44/9	405-420	8	
838	41/9	438-448	9	
802	32/1	483-493	10	رنگ اقیانوس‌ها، فیتوپلانکتونها و
754	27/9	526-536	11	بیوژئوشیمیایی
750	21/0	546-556	12	Ocean Color, Phytoplankton and
910	9/5	662-672	13	Biogeochemical
1087	8/7	673-683	14	
586	10/2	743-753	15	
516	6/2	862-877	16	
167	10/0	890-920	17	تعیین میزان بخارآب موجود در جو
57	3/6	931-941	18	Determining the amount of water
250	15/0	915-965	19	vapor in the atmosphere
0/05	0/45	3/660-3/840	20	تعیین درجهٔ حرارت سطح زمین و ابر
2/00	2/38	3/929-3/989	21	Determining the temperature of
0/07	0/67	3/929-3/989	22	the earth's surface and clouds
0/07	0/79	4/020-4/080	23	
0/25	0/17	4/433-4/498	24	تعیین درجهٔ حرارت جو
0/25	0/59	4/482-4/549	25	Determination of atmospheric temperature
1504	6/00	1/360-1/390	26	مطالعه ابرهای سیروس Study of cirrus clouds
0/25	1/16	6-535-6/895	27	تعیین میزان بخارآب
0/25	2/18	7/175-7/475	28	Determining the amount of water
0/05	9/58	8/400-8/700	29	vapor
0/25	3/69	9/580-9/880	30	ازن Ozone
0/05	9/55	10/780-11/280	31	تعیین درجه حرارت
0/05	8/94	11/770-12/270	32	Temperature Determination
0/25	4/52	13/185-13/485	33	
0/25	3/76	13/485-13/785	34	تعیین ارتفاع نوک ابر
0/25	3/11	13/785-14/085	35	Determining the height of the cloud tip
0/25	2/08	14/085-14/385	36	

*** در باندهای ۱ تا ۱۹، پهنای باند برحسب نانومتر و در باندهای ۳۶-۲۰، پهنای باند برحسب میکرومتر می‌باشد.**

بدین منظور از تعداد شش الگوریتم آشکارساز گردوغبار استفاده گردید. تصاویر تهیه شده پس از تصحیح هندسی و اعمال حدهای مناسب با توجه به ویژگی‌های دمای درخشایی موردبررسی و پردازش قرار گرفتند. سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره ترا و اکوا نصب گردیده است و فعالیت خود را به ترتیب در دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ و در ۳۶ باند طیفی شروع نموده است (جدول۲). این ماهواره به‌صورت روزانه سطح کره زمین را در تصاویری با دقت مکانی۲۵۰ متر برای باندهای یک و دو، ۵۰۰ متر برای باندهای سه تا هفت و یک کیلومتر برای سایر باندها تصویربرداری می‌کند و به همین دلیل از قابلیت بالایی جهت پایش پدیده

گردوغبار برخوردار می‌باشد. داده‌های مورداستفاده از جدیدترین مجموعه داده سنجنده مودیس (نسخه۶/۱) ماهواره‌های ترا (Terra) و در برخی موارد آکوا (Aqua) بودند که در فرمت HDF دریافت گردیدند که درنهایت جهت انجام پیش‌پردازش‌های لازم بر روی آن‌ها از افزونه MCTK و در محیط نرم‌افزارENVI5.3 استفاده گردید. به‌منظور انجام این پژوهش از الگوریتم‌های آشکارسازی گردوغبار Ackerman , TDI[3], Roskovensky and Liou, NDDI[5] TIIDI[4] و Miller استفاده شد. همچنین جهت درک بهتری از وضعیت شدت و پراکنش توده گردوغبار از محصول AOD[6] این ماهواره نیز بهره‌گیری شد. عمق اپتیکی هواویزها (AOD) یک کمیت بی‌بعد وابسته به طول‌موج می‌باشد که به معنای کاهش عبور نور در واحد طول و بر روی یک مسیر مشخص می‌باشد به‌عبارت‌دیگر نشان‌دهنده میزان آئروسل در امتداد ستونی عمودی هوا و میزان دید در امتداد این ستون می‌باشد. ضمناً تصاویر روزانه سنجنده مودیس (MODIS) محصول AOD با استفاده از الگوریتم ترکیبی (Deep Blue, Dark Target) استفاده شد و برای بررسی غلظت و شدت گردوغبار نیز از محصول AOD تصاویر سنجند مودیس استفاده گردید (جدول۳). ضمناً جهت بررسی‌های اولیه و تفسیر چشمی در زمینه پراکنش گردوغبار در یک منطقه استفاده از ترکیب‌های رنگی متفاوت یکی از رایج‌ترین روش‌های تشخیص گردوغبار در یک منطقه می‌باشد که دو تا از مهم‌ترین آن‌ها که در این پژوهش نیز بکار برده شده ترکیب رنگی واقعی یک، چهار، سه (RGB143) سنجنده مودیس بوده و همچنین ترکیب رنگی کاذب یک، دو، هفت (RGB721) می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای قابل‌استفاده از داده‌های عمق اپتیکی هواویزهای سنجنده مودیس

Table 3- Applicable Parameters of Optical Depth Data of MODIS Sensor Aerosols

Optical Depth Land And Ocean	**عمق اپتیکی هواویزها در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از الگوریتم اهداف تیره**
Aerosol Type Land	**نوع ذرات معلق بر روی خشکی**
Mass Concentration Land	**غلظت ذرات معلق بر روی خشکی**
Deep Blue Aerosol Optical Depth Land	**عمق اپتیکی هواویزها در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از الگوریتم دیپ بلو**
Deep Blue Angstrom Exponent Land	**نمای آنگستروم ذرات با استفاده از الگوریتم دیپ بلو**
Dark Target Deep Blue Combined	**عمق اپتیکی هواویزها در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از ترکیب دو الگوریتم**

3 Thermal-infrared Dust Index
4 Thermal Infrared Integrated Dust Index
5 Normalized Differences Dust Index
6 Aerosol Optical Depth

۳-نتایج و بحث

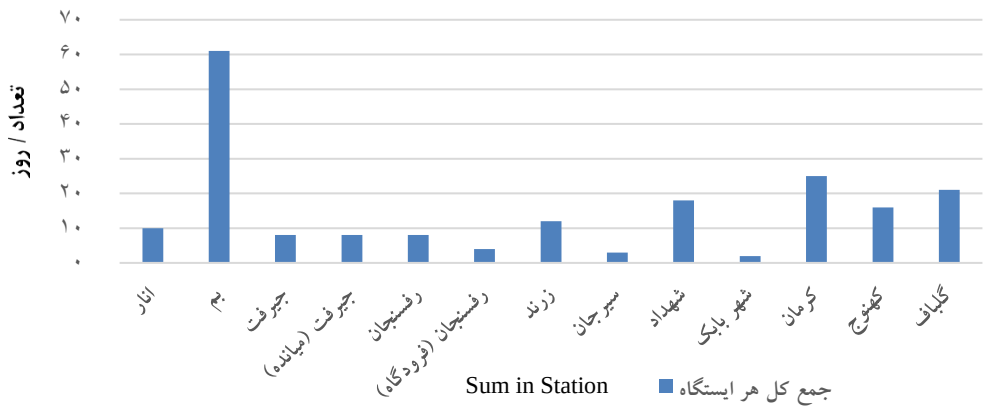
کرمان با توجه به اینکه پهناورترین استان ایران است طبیعی است بیشترین مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی را نیز دارا باشد بنابراین لازم که تحقیقات مختلفی در ارتباط با فرسایش بادی در آن صورت گیرد. از مجموع ۱۹۶ روز همراه با گردوغبار در همه ایستگاه‌های استان کرمان، ۱۰۶ روز دارای کد ۰۶ می‌باشند که نشان می‌دهد منشأ گردوغبار خارج از ایستگاه‌ها و به عبارتی فرا منطقه‌ای می‌باشد که حدود ۵۰ درصد گردوغبارها را شامل می‌شود و ۹۰ روز نیز دارای کد ۰۷ می‌باشد که نشان می‌دهد منشأ گردوغبار در اطراف ایستگاه‌ها و به عبارتی محلی و منطقه‌ای می‌باشد و حدود ۴۹/۹۵ درصد گردوغبار را شامل می‌شوند. در بین همه ایستگاه‌های موردمطالعه استان کرمان، ایستگاه‌های گلباف دارای بیشترین درصد وقوع روزهای گردوغباری با کد ۰۶ می‌باشد که ۹۰/۴۷ درصد وقوع رخدادهای فرا منطقه‌ای را شامل می‌شود و ایستگاه سیرجان روز گردوغباری با کد ۰۶ نداشته است و درصد وقوع رخداد فرا منطقه‌ای صفر داشته است. در بین همه ایستگاه‌های موردمطالعه استان کرمان، ایستگاه‌های سیرجان دارای بیشترین درصد وقوع روزهای گردوغباری با کد ۰۷ می‌باشد که ۱۰۰ درصد وقوع رخدادهای محلی و منطقه‌ای را شامل می‌شود و ایستگاه گلباف دارای درصد وقوع رخداد محلی ۹/۵۲ می‌باشد که کمترین درصد وقوع رخدادهای محلی و منطقه‌ای در بین همه ایستگاه‌های استان کرمان را دارد (جدول ۴).

جدول ۴- فراوانی روزهای همراه با گردوغبار (۱۳۷۹-۱۳۹۹)

Table 4- Frequency of days with dust (2000-2020)

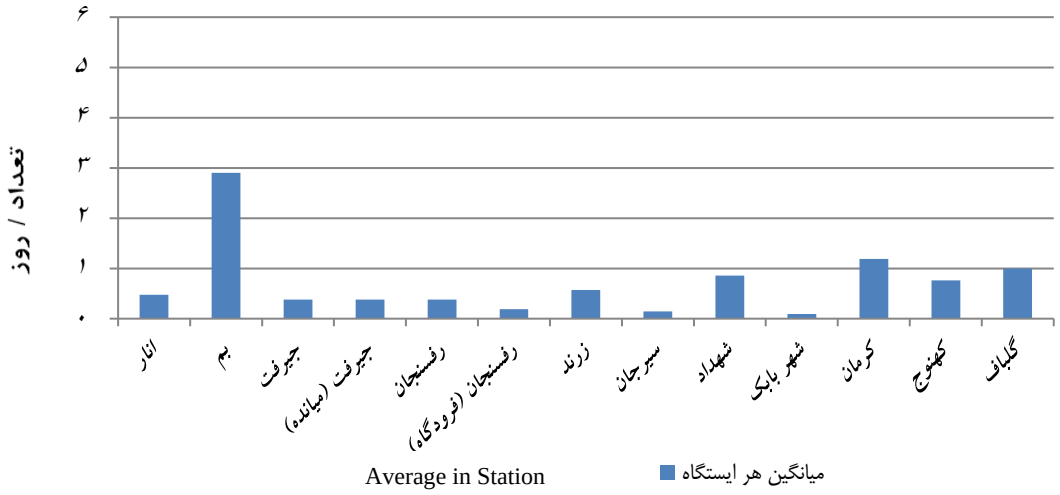
ایستگاه Station	کد ۶ Code 6		کد ۷ Code 7		جمع Sum
	جمع Sum	درصد Percentage	جمع Sum	درصد Percentage	
انار Anar	4	40	6	60	10
بم Bam	29	47	32	53	61
جیرفت Jiroft	6	75	2	25	8
جیرفت (میانده) Jiroft (Miandeh)	5	62.5	3	37.5	8
رفسنجان Rafsanjan	2	25	6	75	8
رفسنجان (فرودگاه) Rafsanjan(Airport)	2	50	2	50	4
زرند Zarand	6	50	6	50	12
سیرجان	0	0	3	100	3

					Sirjan
18	72.2	13	27.7	5	شهداد Shahdad
2	50	1	50	1	شهر بابک Sharehbabak
25	36	9	64	16	کرمان Kerman
16	31.25	5	68.75	11	کهنوج Kahnouj
21	9.52	2	90.47	19	گلباف Golbaft
196	49.95	90	50	106	جمع Plural
61	100	32	90.47	29	حداکثر Maximum
1	9.52	1	0	0	حداقل Minimum



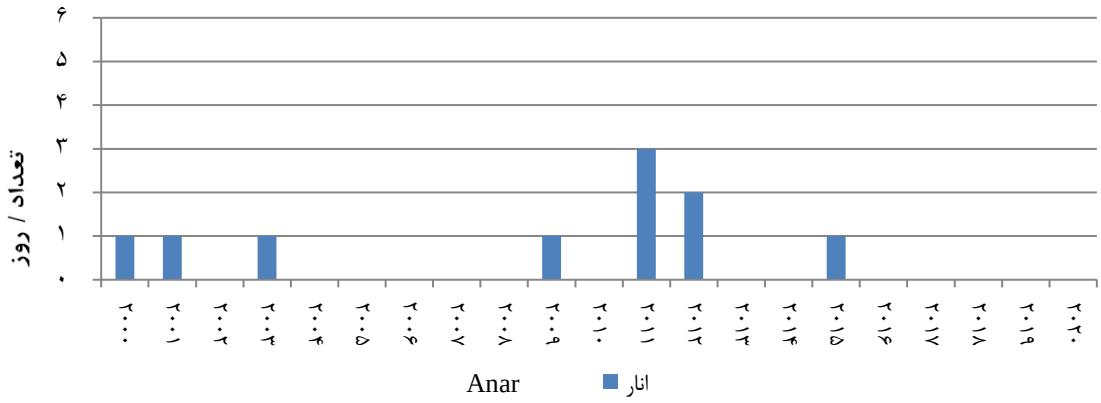
شکل ۲- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه‌های استان کرمان طی دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۹

Fig. 2. The total annual frequency of dust occurrence for stations in Kerman province during the statistical period of 2000-2020



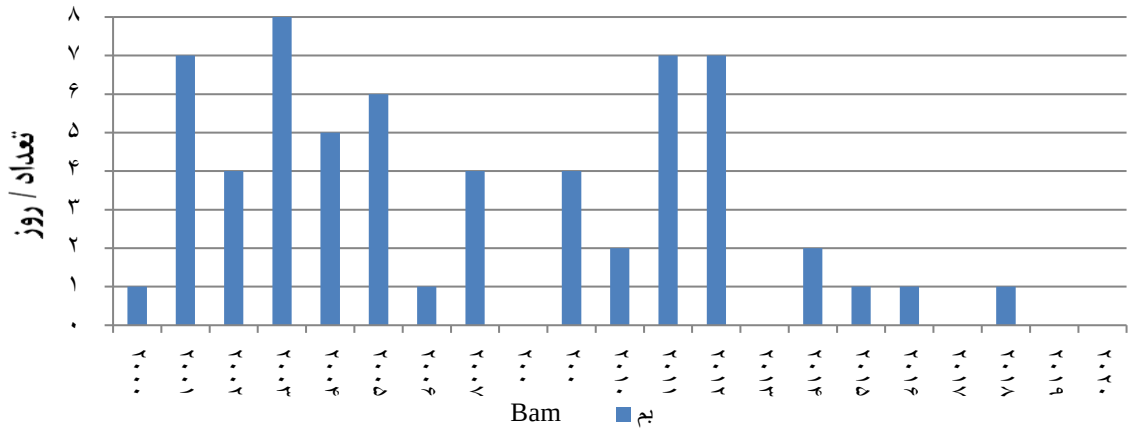
شکل ۳- میانگین سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه‌های استان کرمان طی دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۹

Fig. 3. The annual average of the frequency of dust occurrence for stations in Kerman province during the statistical period of 2000 -2020



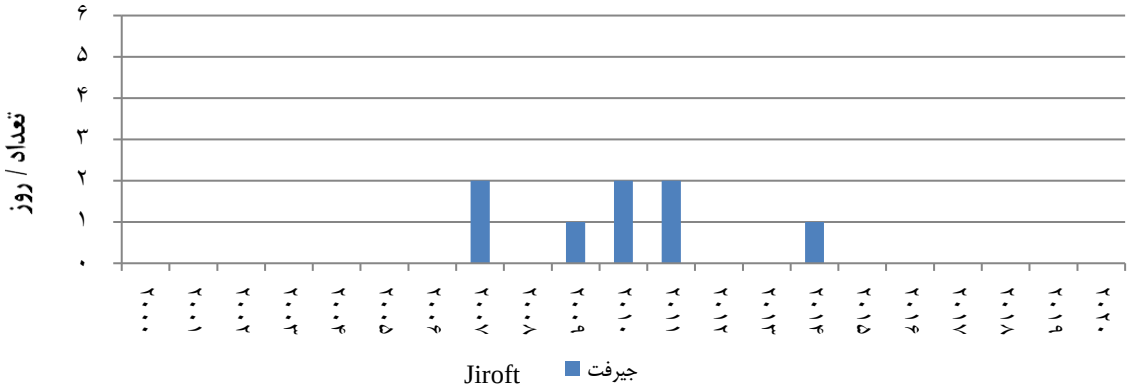
شکل ۴- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه انار طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig. 4. The total annual frequency of dust occurrence for Anar station during the statistical period of 2000-2020



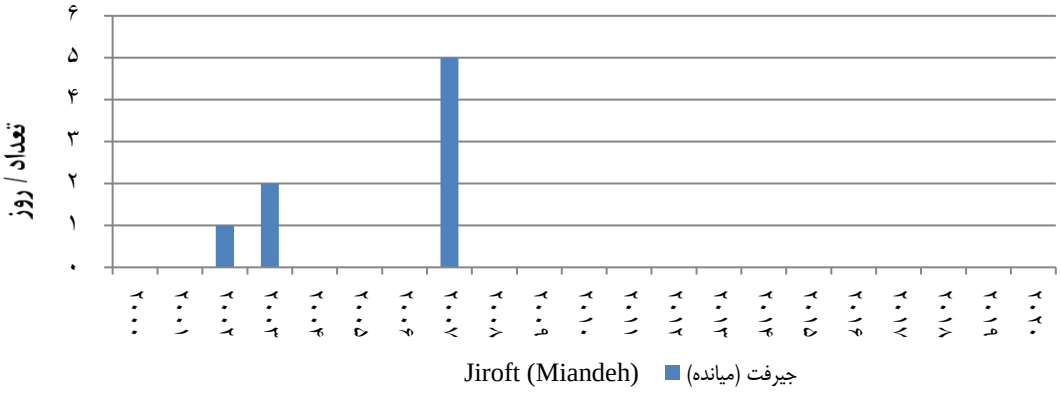
شکل ۵- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه بم طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig. 5. The total annual frequency of dust occurrence for Bam station during the statistical period of 2000-2020



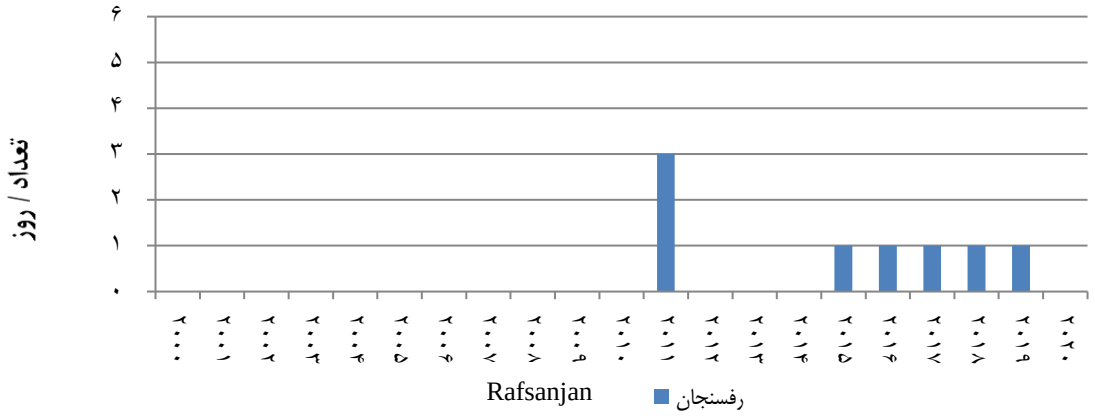
شکل ۶- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه جیرفت طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig. 6. The total annual frequency of dust occurrence for Jiroft station during the statistical period of 2000-2020



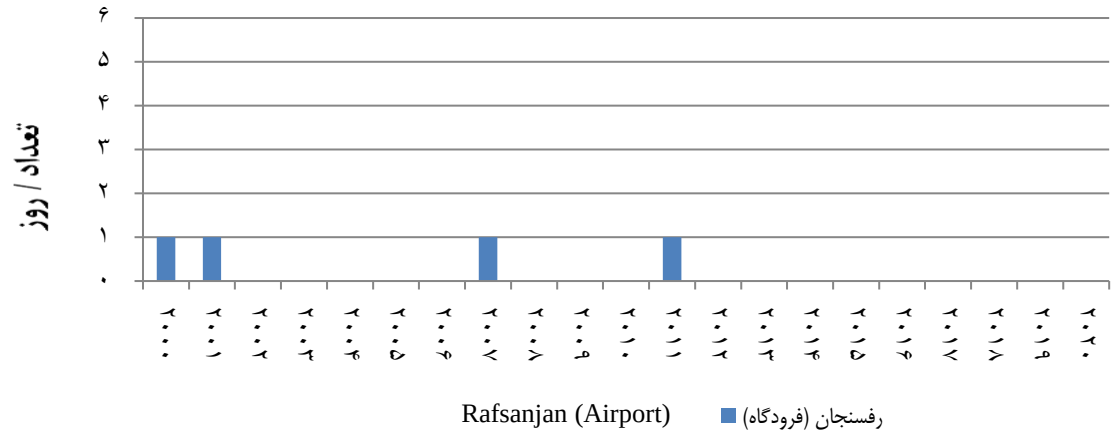
شکل ۷- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه جیرفت (میانده) طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.7. The total annual frequency of dust occurrence for Jiroft (Miyandeh) station during the statistical period of 2000-2020



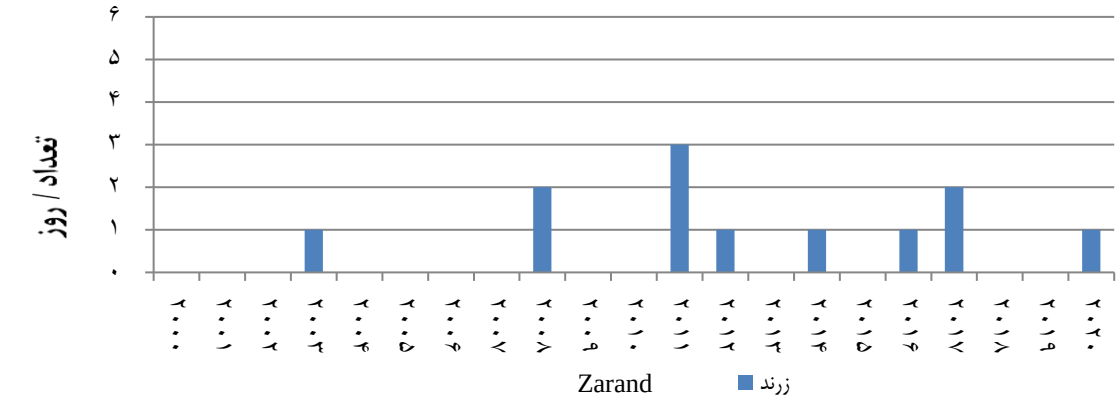
شکل ۸- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه رفسنجان طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig. 8. The total annual frequency of dust occurrence for Rafsanjan station during the statistical period of 2000-2020



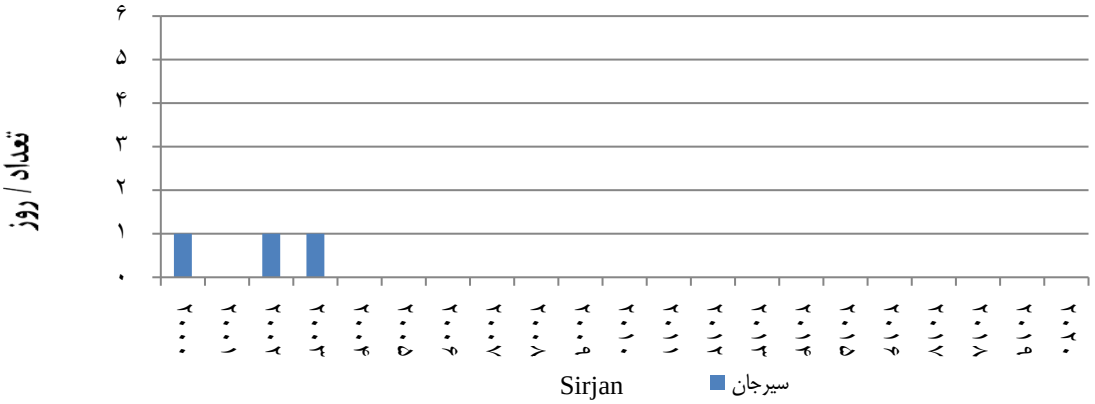
شکل ۹- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه رفسنجان (فرودگاه) طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.9. The total annual frequency of dust occurrence for Rafsanjan station (airport) during the statistical period of 2000-2020



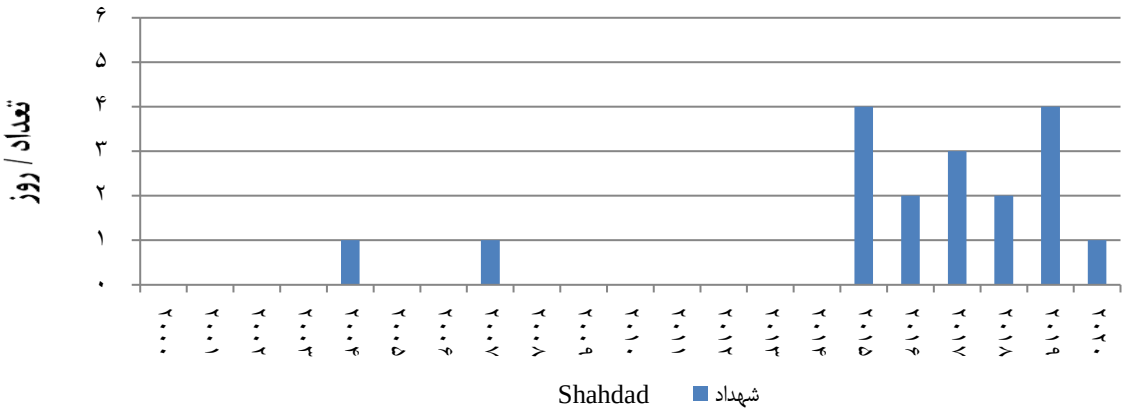
شکل ۱۰- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه زرند طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.10. The total annual frequency of dust occurrence for Zarand station during the statistical period of 2000-2020



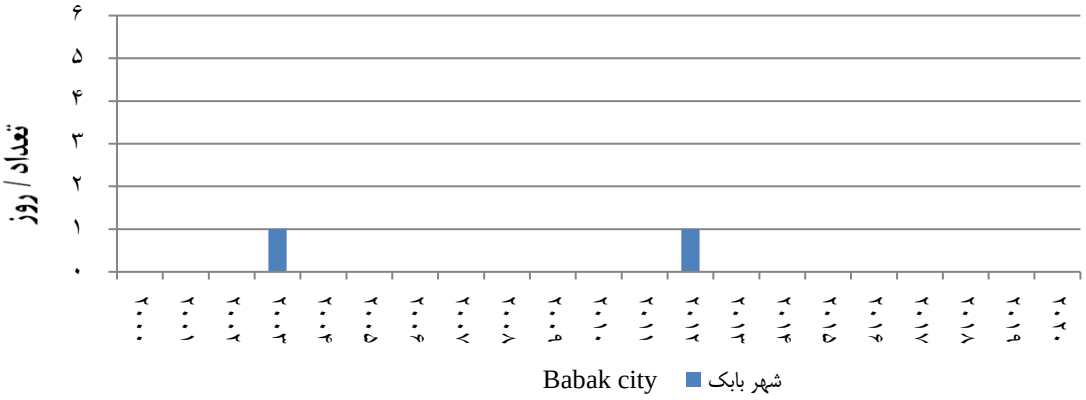
شکل ۱۱- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه سیرجان طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.11. The total annual frequency of dust occurrence for Sirjan station during the statistical period of 2000-2020



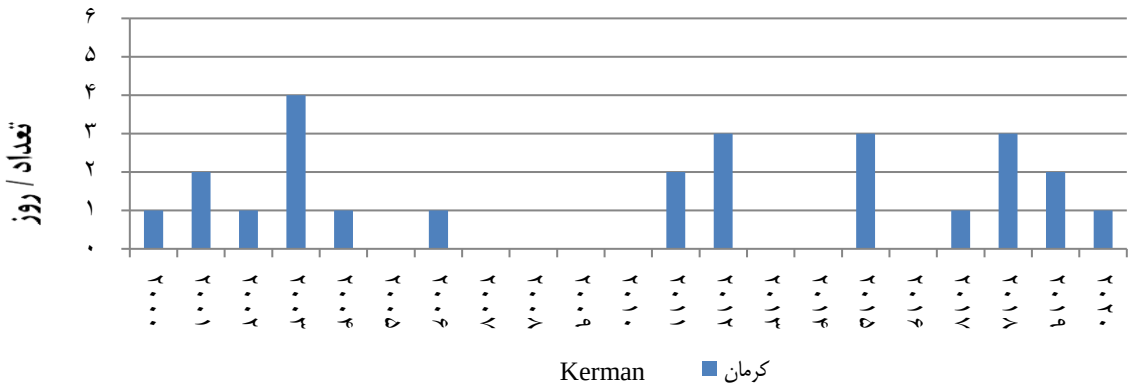
شکل ۱۲- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه شهداد طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig. 12. The total annual frequency of dust occurrence for Shahdad station during the statistical period of 2000-2020



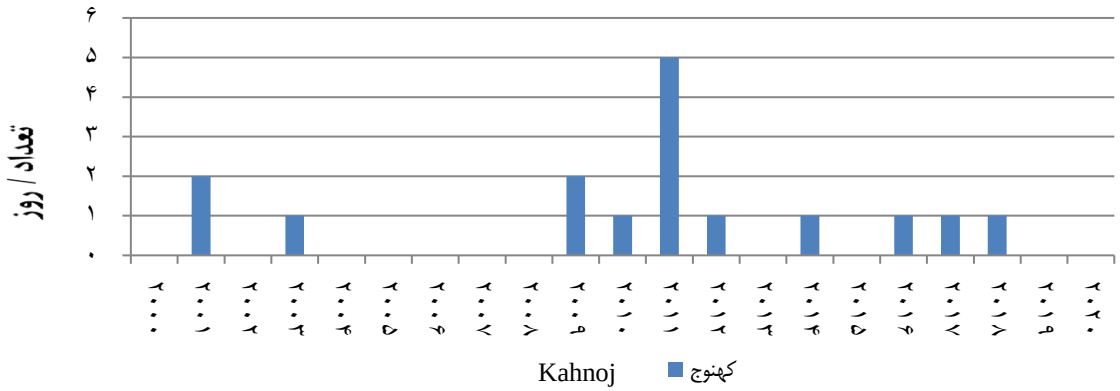
شکل ۱۳- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه شهر بابک طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.13. The total annual frequency of dust occurrence for Shahre Babak station during the statistical period of 2000-2020



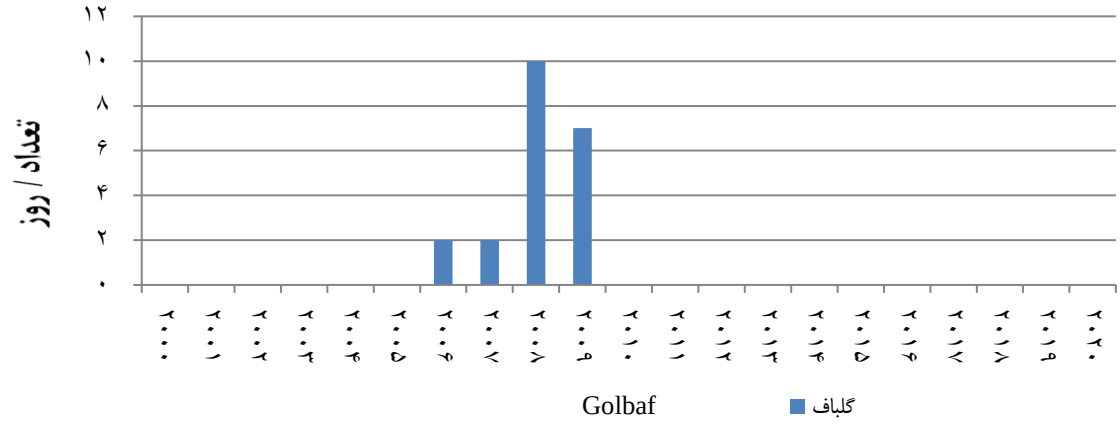
شکل ۱۴- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه کرمان طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.14. The total annual frequency of dust occurrence for Kerman station during the statistical period of 2000-2020



شکل ۱۵- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه کهنوج طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.15. The total annual frequency of dust occurrence for Kahnouj station during the statistical period of 2000-2020

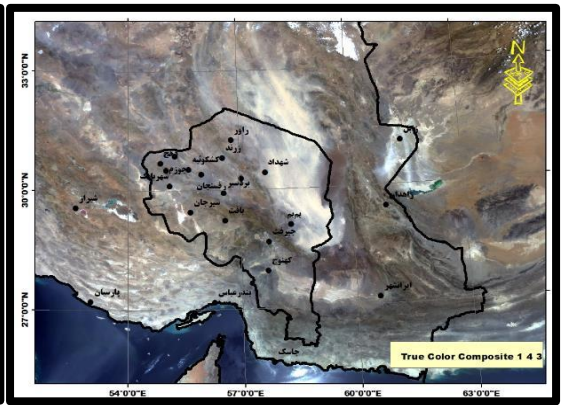


شکل ۱۶- مجموع سالانه فراوانی رخداد گردوغبار برای ایستگاه گلباف طی دوره آماری ۱۳۷۹- ۱۳۹۹

Fig.16. The total annual frequency of dust occurrence for Golbaf station during the statistical period of 2000-2020

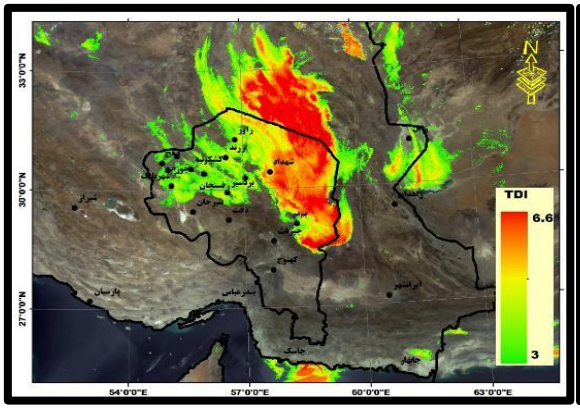
نتایج نشان داد که ایستگاه بم بیشترین فراوانی وقوع پدیده گردوغبار سالانه را در استان با ۶۱ روز دارا می‌باشد و همچنین کمترین فراوانی وقوع این پدیده در ایستگاه شهر بابک با ۲ روز گردوغباری در استان می‌باشد (شکل ۲). همچنین بررسی سالانه نشان داد که بدون در نظر گرفتن شدت وقوع این پدیده، سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۰ بیشترین رخداد این پدیده را در بین سال‌های موردمطالعه دارا می‌باشد و همچنین سال ۱۳۹۲ به‌عنوان سال بدون روز گردوغبار در استان ثبت شده است. بررسی میانگین سالانه رخداد گردوغبار در استان بیانگر بالا بودن وقوع این پدیده در شهرهای نظیر بم، کرمان، گلباف، شهداد و کهنوج می‌باشد و کمترین میانگین سالانه رخداد گردوغبار در استان مربوط به شهرهای رفسنجان (فرودگاه)، سیرجان و شهر بابک می‌باشد (شکل۳). درمجموع بررسی داده‌های فراوانی سالانه بیانگر روند افزایشی وقوع طوفان‌های گردوغبار از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ می‌باشد و بعدازآن تا سال ۱۳۹۹ روند کاهشی را طی کرده است. در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹، در ایستگاه انار سال ۱۳۹۰ با ۳ روز (شکل۴) و در ایستگاه بم در سال ۱۳۸۲ با ۸ روز (شکل۵) و در ایستگاه جیرفت در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ با ۲ روز (شکل۶) و ایستگاه جیرفت میانه در سال ۱۳۸۶ با ۵ روز (شکل۷) و ایستگاه رفسنجان در سال ۱۳۹۰ با ۳ روز (شکل۸) و ایستگاه رفسنجان (فرودگاه) در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۶، ۱۳۹۰ با ۱ روز (شکل۹) و ایستگاه زرند در سال ۱۳۹۰ با ۳ روز (شکل۱۰) و ایستگاه سیرجان در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ با ۱ روز (شکل۱۱) و ایستگاه شهداد در سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ با ۴ روز (شکل۱۲) و ایستگاه شهر بابک در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۱ با ۱ روز (شکل۱۳) و ایستگاه کرمان در سال ۱۳۸۲ با ۴ روز (شکل۱۴) و ایستگاه کهنوج در سال ۱۳۹۰ با ۵ روز (شکل۱۵) و ایستگاه گلباف در سال ۱۳۸۷ با ۱۰ روز (شکل۱۶)، بیشترین روزهای گردوغباری را در سال موردنظر داشته‌اند و روزهای بدون گردوغبار در تمام ایستگاه‌ها در سال‌های متعدد مختلف وجود داشته است. با توجه به اینکه بیشتر مشکلات ناشی از پدیده گردوغبار در دیدهای ۱۰۰۰ متر و کمتر می‌باشد بنابراین موردبررسی قرار گرفتند. قابل‌ذکر است زمانی که شدت گردوغبار با اندازه‌ای باشد که دید افقی به ۱۰۰۰ متر و کمتر برسد مشکلات زیادی چون تعطیلی مدارس، ادارات دولتی، لغو فرودگاه‌ها و غیره به وجود می‌آید. در ایستگاه‌های استان کرمان در همه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک داده‌های به دست آمده دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر می‌باشند. در ایستگاه بم، ۶۱ روز دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر می‌باشد که بیشترین میزان در میان ایستگاه‌های مختلف استان کرمان است و همچنین ایستگاه شهر بابک با ۲ روز دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر دارای کمترین میزان در ایستگاه‌های مختلف استان کرمان می‌باشد. بررسی میانگین سالانه رخداد گردوغبار دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر در استان بیانگر بالا بودن وقوع این پدیده در شهرهای نظیر بم، کرمان، گلباف، شهداد و کهنوج می‌باشد و کمترین میانگین سالانه رخداد گردوغبار در استان مربوط به

شهرهای رفسنجان (فرودگاه)، سیرجان و شهر بابک می‌باشد. درمجموع بررسی داده‌های فراوانی سالانه دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر بیانگر روند افزایشی وقوع طوفان‌های گردوغبار از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ می‌باشد و بعدازآن تا سال ۱۳۹۹ روند کاهشی را طی کرده است.



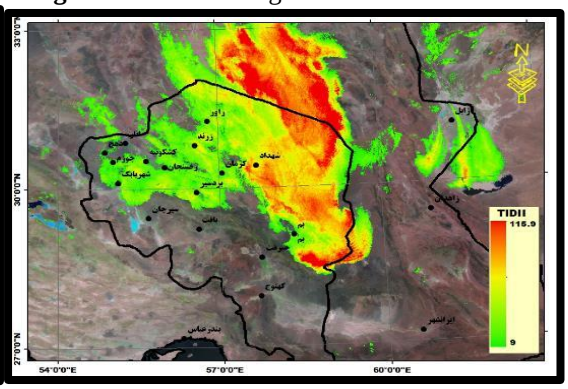
شکل ۱۷- آشکارسازی با استفاده از روش ترکیب رنگی

Fig.17. Detection using color combination method



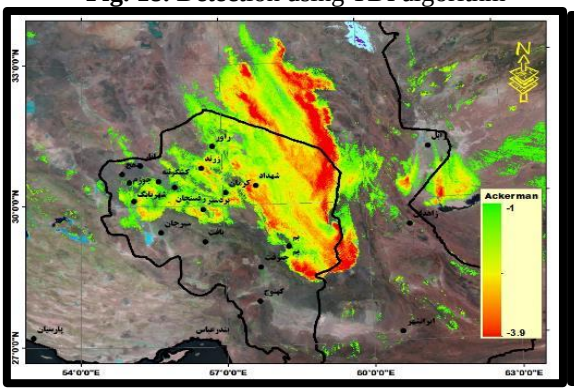
شکل ۱۸- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم TDI

Fig. 18. Detection using TDI algorithm



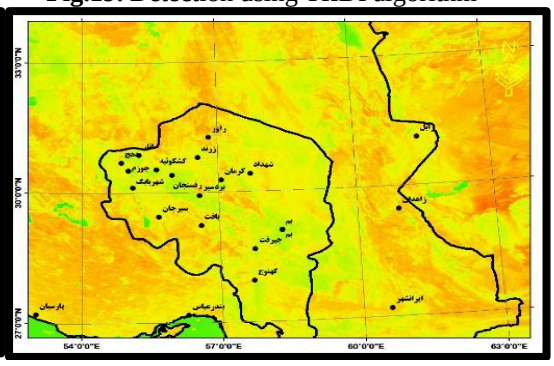
شکل ۱۹- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم TIIDI

Fig.19. Detection using TIIDI algorithm



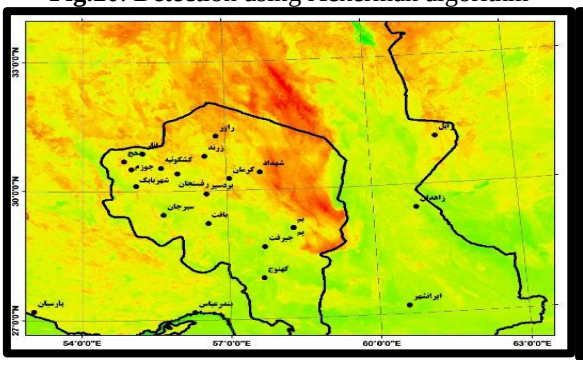
شکل ۲۰- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم Ackerman

Fig.20. Detection using Ackerman algorithm



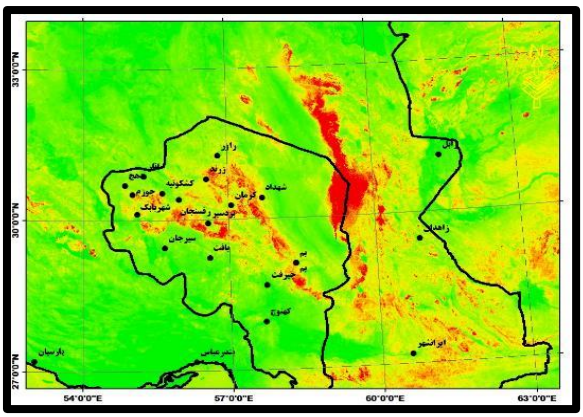
شکل ۲۱- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم NDDI

Fig. 21. Detection using NDDI algorithm



شکل ۲۲- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم Miller

Fig.22. Detection using Miller algorithm



شکل۲۳- آشکارسازی با استفاده از الگوریتم Roskovensky

Fig. 23. Detection using Roskovensky's algorithm

الگوریتم اکرمن از اختلاف دمای درخشایی باند ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس جهت تشخیص و آشکارسازی پدیده گردوغبار استفاده می‌کند. اساس الگوریتم TIDI بر پایه چهار باند طیفی در محدوده ۳/۷، ۸/۶، ۱۱ و ۱۲ میکرومتر معادل باندهای ۲۰، ۲۹، ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس بوده و مقادیر بالای صفر معرف وجود گردوغبار در تصویر می‌باشد (Liu & Liu, 2011). شاخص TDI از باندهای ۲۰،۲۹، ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس و ضرایبی که در این خصوص طراحی شده‌اند استفاده می‌نماید. شاخص NDDI بر اساس استفاده از اختلاف طیف‌های ۰/۴۶۹ و ۲/۱۳ میکرومتر سنجنده مودیس حاصل می‌گردد؛ به‌طوری‌که از نسبت اختلاف باندهای انعکاسی سه و هفت این سنجنده آشکارسازی گردوغبار فراهم می‌شود. شاخص روسکونسکی و لئو یکی از معروف‌ترین شاخص‌های آشکارسازی گردوغبار بوده که بر پایه اختلاف دمای درخشندگی طول‌موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر نسبت به طول‌موج‌های ۱/۳۸ و ۰/۶۵ میکرومتر می‌باشد. الگوریتم Miller بر پایهٔ تفاوت ویژگی‌های بازتابش ذرات گردوغبار و ابر و اختلاف دمای درخشندگی معکوس بنا نهاده شده است. نتایج به‌کارگیری از الگوریتم‌های استفاده شده در این پژوهش نشان می‌دهد از میان الگوریتم‌های موردبررسی الگوریتم‌های TIIDI و TDI دارای عملکرد مناسب‌تری در میان سایر الگوریتم‌های موردبررسی برخوردار بوده است (شکل‌های ۱۹ و ۱۸)، که با نتایج تحقیق جبالی و همکاران (Jebali, Zare, Ekhtesasi & Jafari, 2022) که معتقد است الگوریتم‌های TIIDI و TDI قادر به آشکارسازی تمامی رخدادهای گردوغبار در استان یزد نخواهد بود، مغایرت دارد و با نتایج تحقیق قادری نسب و راهنما (Qaderi Nasab & Rahnama, 2018) که معتقد است الگوریتم TIIDI عملکرد مناسبی در شناسایی پیکسل‌های آلوده به گردوغبار در حوزه آبریز جازموریان داشته است، مطابقت دارد و همچنین با نتایج تحقیق خیراندیش و همکاران (Kheirandish, Jamali & Rayegani, 2018) که معتقد است روش TIIDI قابلیت تفکیک گردوغبار از سایر پدیده‌ها را بر روی زمین دارا می‌باشد، مطابقت دارد و همچنین با نتایج تحقیق شمشیری و همکاران (Shamshiri, Jafari, Soltani & Ramazani, 2014) که معتقد است کارایی شاخص‌های موردبررسی از

رویدادی به رویداد دیگر متفاوت بوده و شاخص آکرمن بهترین کارایی را داشته ولی بعد از آن شاخص TDIمی‌باشد، مطابقت دارد.

۴-نتیجه‌گیری

توفان‌های گردوغبار یکی از پدیده‌هایی است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهد. طی سال‌های اخیر وقوع توفان‌های گردوغبار با تعداد بالا ازجمله مخرب‌ترین بلایای زیست‌محیطی در منطقه خاورمیانه است که یکی از مناطقی که به‌شدت تحت تأثیر آن می‌باشد استان کرمان است که در این پژوهش موردتوجه جدی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد ایستگاه سیرجان بیشترین وقوع گردوغبار با منشأ محلی و منطقه‌ای را دارد و گلباف کمترین وقوع رخداد را دارد. ایستگاه بم بیشترین فراوانی سالانه را دارا می‌باشد و کمترین وقوع، شهر بابک با ۲ روز گردوغباری می‌باشد. از میان الگوریتم‌های موردبررسی الگوریتم‌های TIIDI و TDI دارای عملکرد مناسب‌تری در میان سایر الگوریتم‌ها است. درمجموع بررسی داده‌های فراوانی سالانه دارای دید افقی ۱۰۰۰ متر و کمتر بیانگر روند افزایشی وقوع طوفان‌های گردوغبار از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ می‌باشد و بعد از آن تا سال ۱۳۹۹ روند کاهشی را طی کرده است. الگوریتم اکرمن اگرچه دارای عملکرد نسبتاً قابل قبولی در آشکارسازی گردوغبار بوده ولی در مناطق شمالی منطقه و محدوده چشمه‌های گردوغبار دارای عملکرد نامناسبی بوده است. بررسی‌های انجام شده بر روی سایر الگوریتم‌ها بیانگر عملکرد نامناسب آن‌ها در زمینه آشکارسازی پدیده گردوغبار در منطقه موردمطالعه می‌باشد؛ بنابراین توصیه می‌شود که با توجه به شرایط استان کرمان لزوم توجه جدی به شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار و برنامه‌ریزی جهت کنترل و کاهش اثرات منفی وقوع توفان‌های منطقه ازجمله ضروریات طرح‌های تحقیقاتی در آینده – باشد تا از خسارات احتمالی به تأسیسات صنعتی و کشاورزی و غیره جلوگیری شود.

References

Alam, K., Qureshi, S., & Blaschke, T. (2011). Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmospheric Environment, 45*(27), 4641-4651. https://doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.055

Azhdari Moghadam, M., & Raispoor, K. (2011). *Statistical Analysis and Identification of the Origin of Dust Phenomenon Using Meteorological Codes (Case Study: Khuzestan Province)*. Paper presented at the 11th Iranian Congress of Geographers, Tehran. [In Persian] https://civilica.com/doc/336497/

Cheki Forak, M., Doostan, R., & Minaei, M. (2023). Identification of Dust Centers in Birjand City. *Geography and Territorial Spatial Arrangement, 13*(46), 61-84. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gaij.2023.42530.3034

Ghasemi Aryan, Y., Sayed Akhlaghi, S. J., Farajollahi, A., Faiaz, M., & Ganjali, M. (2021). Challenges and strategies towards combating dust storm in Sistan based on the institutional stakeholders viewpoint. *Water and Soil Management and Modelling*, *1*(4), 48-56. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9436.1044

Ghorbani, M. (2014). *National social network analysis project; modeling, policy making and implementation of participatory management of natural resources* (First phase). Final report of a national project, University of Tehran. [In Persian]

Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, *40*(30), 5880-5892. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016

Jebali, A., Zare, M., Ekhtesasi, M. R., & Jafari, R. (2022). Performance Evaluation of Detector Algorithms of Dust Storms in Arid Lands (Case Study: Yazd Province). *Desert Ecosystem Engineering*, *8*(23), 85-105. [In Persian] https://deej.kashanu.ac.ir/article_112676.html?

Kheirandish, Z., Jamali, J., & Rayegani, B. (2018). Identification of the best algorithm for dust detection using MODIS data. *Journal of Natural Environment Hazards*, *7*(15), 207- 220. [In Persian] https://doi. 10.22111/jneh.2017.3363

Liu, Y., & Liu, R. (2011). *A thermal index from MODIS data for dust detection*. Paper presented at the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 3783-3786. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050054

Makhfi, G., Karimi, A., Solgi, E., & Bagherpor, S. (2022). Evaluation and determination of the ecological risk of lead, zinc and cadmium in the atmospheric dust of Isfahan city. *Journal of Environmental Health Enginering*, *9*(4), 485-501. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jehe.9.4.485

Miller, S. D. (2003). A consolidated technique for enhancing desert dust storms with MODIS. *Geophysical Research Letters*, *30*(20). https://doi.org/10.1029/2003GL018279

Nabavi, S., Moradi, H. M., & Sharifi Kia, M. (2019). Evaluation of dust storm temporal distribution and the relation of the effective factors with the frequency of occurrence in Khuzestan Province from 2000 to 2015. *Quarterly of Geographical Data*, *28*(111), 191-203. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25883860.1398.28.111.13.4

Naderi, M., Ghorbani, M., & Yavari, A. (2014). Network Analysis of Information Exchange and Key Actors in Policy-making and Sustainable Management of Sarkeh-Hesar National Park. *Researches in Earth Sciences*, *5*(4), 16-28. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1393.5.4.2.5

Pour Asgharian, A., Nekoamal Kermani, M., Sisipour, M., & Ranjbar Saadat abadi, A. (2014). *Assessment of Dust Phenomenon Frequency in Hormozgan Province.* Paper presented at the Second National Conference on Deserts with Approach of Management of Arid and Desert Areas. [In Persian] https://civilica.com/doc/329506/

Qaderi Nasab, F., & Rahnama, M. B. (2018). Detection of dust storms in Jazmoriyan drainage basin using multispectral techniques and MODIS image. *Physical Geography Research*, *50*(3), 545-562. https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.248345.1007159

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

Rasekhi, S. (2014). *Social network analysis in range management and participatory management planning (Case study: Fars Province*). Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran. [In Persian]

Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Eriksson, P. G., de W. Rautenbach, C. J., Flamant, C., & Abdi Vishkaee, F. (2014). Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations. *Natural Hazards, 71*, 563-585. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0927-0

Roskovensky, J. K., & Liou, K. N. (2003). Detection of thin cirrus from 1.38 μm/0.65 μm reflectance ratio combined with 8.6 –11 μm brightness temperature difference. *Geophysical Research Letters, 30*(19). https://doi.org/10.1029/2003GL018135

Salari, F. (2014). *Modeling and analysis of water resources management network in the watershed (Case study: Kermanshah resin watershed)*. Master's thesis, University of Tehran. [In Persian]

Sarikhani, A., Dehghani, M., Karimi-Jashni, A., & Saadat, S. (2021). A New Approach for Dust Storm Detection Using MODIS Data. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45*, 963-969. https://doi.org/10.1007/s40996-020-00508-4

Shamshiri, S., Jafari, R., Soltani, S., & Ramazani, N. (2014). Identification and zonation of dust storms in Kermanshah Province by using MODIS images. *Applied Ecology, 3*(8),23-35. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763128.1393.3.8.3.3

Wald, A. E., Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Gao, B. C. (1998). Daytime and nighttime detection of mineral dust over desert using infrared spectral contrast. Journal of Geophysical Research: *Atmospheres, 103*, 32307-32313. https://doi:10.1029/98JD01454

Zandkarimi, A., Fatehi, P., & Shah-Hoseini, R. (2020). An improved dust identification index (IDII) based on MODIS observation. *International Journal of Remote Sensing, 41*(20), 8048-8068. https: doi:10.1080/01431161.2020.1770366

Zangeneh, M. (2014). Climatological Analysis of Dust Storms in Iran. *Journal of Applied Climatology, 1*(1), 1-12. [In Persian] https://jac.ui.ac.ir/article_15593.html

Zhao, T. X. P., Ackerman, S., & Guo, W. (2010). Dust and smoke detection for multi-channel imagers. *Remote Sensing, 2*(10), 2347-2368. https://doi.org/10.3390/rs2102347

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.314-343 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2023.82181.1358 Open access

Spatial-Temporal behavior of the reactivation of the paleolandslide in Hossein abad Village, Kalpush, Northeast of Iran

Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan[a], Seyed Reza Hosseinzadeh[b*], Gholam Reza Lashkaripour[c], Masoud Minaei[d], Hakimeh Morabbi Heravi[e]

[a] *PhD in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[b] *Professor in Geomorpholoy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[c] *Professor in Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[d] *Associate Professor in GIScience, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[e] *Associate Professor Statistics, University of Bojnord, Bojnord, Iran*

Received: 28 April 2024 ***Revised: 3 July 2024*** ***Accepted: 20 July 2024***

Extended Abstract

Introduction

Landslides are natural hazards in mountainous regions that cause significant damage to man-made structures, such as buildings, roads, and power transmission lines. Complex geological, geomorphological, and climatic conditions lead to slope failures, where paleo landslides, formed during the Quaternary period, stabilize over time. These historical landslides often reactivate due to triggers such as earthquakes, heavy rainfall, river erosion, changes in reservoir water levels (RWL), road construction, and deforestation. Additionally, anthropogenic factors, such as construction within the landslide mass or agricultural activities on the crown of the landslide, can further destabilize these areas. The threat to human life and infrastructure is especially high when cities and villages are located on or near old landslides. Examples of this can be seen in the Vajont Dam disaster in Italy and the Three Gorges Dam in China**.**

In Iran, especially in the Alborz and Zagros mountain ranges, numerous ancient landslides exist that reactivate under the influence of earthquakes, heavy rainfall**,** and human activities. Assessing the vulnerability of buildings to such phenomena is critical. Various

[*] .Corresponding author: Seyed Reza Hosseinzadeh Email: srhosszadeh@um.ac.ir Tel:+989153117325

How to cite this Article: Ghayoor Bolorfroshan, M. , Hosseinzadeh, S. . R. , Lashkaripour, G. R. , Minaei, M. , & Morabbi Heravi, H. (2024). Spatial-temporal behaviour of old landslide reactivation (case study: Hossein-Abad Kalpoosh Village landslide). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13(4),314-343*

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

methods, including InSAR radar interferometry and Permanent Scatterer Interferometry (PSI), are employed to monitor slow-moving landslides and evaluate their impact on structures. This study, integrating geomorphological data, landslide kinematics, and building vulnerability assessment, focuses on the reactivation of the Hossein Abad landslide in northern Iran and analyzes its spatial-temporal behavior.

Material and Methods

Hossein Abad village, located in the Kalpush district of Miyami County in Semnan Province**,** is the largest village in the region. Situated on moderate slopes and atop four old landslide terrains with an average slope of 14%, the village has expanded over time. This study was conducted in four stages, involving the collection, production, processing, and interpretation of historical, field, and radar remote sensing data.

Initially, a landslide geomorphological map of the active old landslides in Hossein Abad was produced using aerial photos, geological maps**,** and UAV images**.** Then, the radar interferometry technique was applied to analyze the kinematics of the landslide movement, with displacement rate maps generated from Sentinel-1A/B radar data. Subsequently, the vulnerability of buildings in the village was assessed through field visits and questionnaires, and a vulnerability map was produced using the classification method proposed by Palmisano et al., 2016. Damage to buildings was classified based on various indicators such as material type, structural characteristics, and crack patterns**.** The study also analyzed the spatial relationship between landslide movement and building vulnerability, focusing on the geomorphological context of the landslides.

Results and Discussion

In the village of Hossein Abad, four old landslides were identified, and over time, the development of the village and construction activities mainly expanded on the southern slope, directly over two large, old landslides. In 2013, the Hossein Abad earthen dam was constructed near these landslides, with a capacity of approximately 16 million cubic meters of water**.** Heavy snowfall and rainfall in late 2018 activated these landslides, causing significant damage, including the collapse of more than 160 buildings. The main landslide, covering 22 hectares, exhibited rotational and compound movement over a marl-limestone bedrock**.**

The reactivation of the old landslide was confirmed through spatial analysis using permanent scatterers between 2018 and 2020. Significant horizontal and vertical displacements were observed, especially near the landslide toe and areas with visible groundwater flow. These deformations were largely driven by groundwater fluctuations influenced by the nearby dam reservoir.

In the vulnerability assessment of buildings, 67 structures were evaluated in the region. Approximately 60% of these buildings were constructed with traditional brick masonry and were located in landslide-prone areas. Many of these buildings suffered heavy damage due to ground movements and structural changes. The greatest damage occurred at the landslide toe, where upraising and settlement of the ground were most significant. The study indicates that modern concrete buildings at the toe of the landslide experienced less damage compared to older, masonry structures. Additionally, the results suggest that

using lighter materials and locating buildings away from the center of landslides can mitigate damage. The investigation further emphasizes the effectiveness of integrating ground displacement monitoring with building vulnerability assessment.

Conclusion

This study utilizes Permanent Scatterer InSAR data and building damage analysis across different zones of the Hossein Abad landslide to investigate its spatial behavior. The results show that the vulnerability of buildings in landslide-prone areas can be assessed based on the type of landslide kinematics, building resistance**,** and the geomorphological features of the affected area. The study indicates that the Hossein Abad landslide reactivates with each occurrence of heavy rainfall or changes in groundwater levels, causing significant damage to buildings. Even after reconstruction, similar damage is likely to occur, highlighting the ongoing instability of the region.

Keywords: Paleo Landslide, Building Vulnerability Assessment, Permanent Scatterer Interferometry (PSI) , InSAR Images, Ground Displacement Monitoring, Antropogenic Landslide.

How to cite this Article: Ghayoor Bolorfroshan, M. , Hosseinzadeh, S. . R. , Lashkaripour, G. R. , Minaei, M. , & Morabbi Heravi, H. (2024). Spatial-temporal behaviour of old landslide reactivation (case study: Hossein-Abad Kalpoosh Village landslide). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13(4),314-343*

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۳۴۳-۳۱۴ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI:10.22067/geoeh.2023.82181.1358 دسترسی آزاد

رفتارشناسی فضایی – زمانی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد کالپوش

مهدیه غیور بلورفروشان– دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

سیدرضا حسین زاده[۱] – استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

غلامرضا لشکری پور- استاد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

مسعود مینائی- دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی (GIScience)، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

حکیمه مربی هروی- استادیار آمار، دانشگاه بجنورد، ایران

تاریخ **دریافت:۱۴۰۳/۲/۹** **تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۴/۱۳** **تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۴/۳۰**

چکیده

لغزش‌های قدیمی یکی از عوامل شکست دامنه‌ها و وقوع لغزش‌های جدید در جهان هستند که با فعالیت مجدد خود، تهدید بزرگی را برای زندگی بشر، زیرساخت‌ها و سازه‌های مسکونی در مناطق شهری و روستایی به وجود می‌آورند. در این پژوهش، فعالیت لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد در شمال استان سمنان، با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری PSI در بازه زمانی ۲۰۱۸–۲۰۲۰ ارزیابی شد. سپس با استفاده از مشاهدات میدانی، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA) و ارتباط مکانی آسیب آن‌ها با ژئومورفولوژی لغزش، رفتار فضایی– زمانی فعالیت لغزش قدیمی، مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تکنیک PSI نشان می‌دهد میانگین نرخ جابه‌جایی به ترتیب در مدار صعودی و نزولی ۱۹–۱۲– و ۱۶–۲۲– میلی‌متر در سال است. این لغزش در تابستان حرکت خود را آغاز نموده و در دوره پربارش باران با ۳۵– میلی‌متر بیشترین نشست را در بدنه اصلی و پای لغزش تجربه کرده است. مشاهدات الگوی ترک و ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها نیز نتایج تداخل سنجی راداری را تأیید می‌نماید. بیش از ۷۰ درصد ساختمان‌ها به دلیل بالاآمدگی و نشست خاک در بدنه اصلی و پای لغزش تخریب شده‌اند. همچنین در پنجه لغزش و مرزهای جانبی خسارت کمتری به ساختمان‌ها وارد شده است.

[۱] . نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۱۱۷۳۲۵ Email: srhosszadeh@um.ac.ir

این امر نشان از افزایش تغییرات در داخل توده اصلی لغزش قدیمی و حرکت مجدد آن به‌صورت لغزش چرخشی در دوره پربارش سال ۲۰۱۹ دارد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لغزش قدیمی، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان، تداخل‌سنجی پراکندگی دائمی (PSI)، پایش جابجایی زمین، تصاویر InSAR ، زمین‌لغزش آنتروپوژنیک.

۱- مقدمه

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی است که هرساله در بسیاری از کشورهای جهان، خسارت زیادی را به سازه‌های دست‌ساز انسان مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و ... وارد می‌نماید. محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی و تغییرات آب و هوایی، سبب شکست دامنه‌ها شده است و زمین‌لغزش‌های قدیمی[1] در طی کواترنر تشکیل و درنهایت پایدار شده‌اند (Guo et al., 2020). این لغزش‌های تاریخی معمولاً با حضور محرک‌هایی مانند زلزله، بارندگی شدید و سنگین فصلی، فرسایش رودخانه‌ای، تغییرات تراز آب مخازن، جاده‌سازی، راه‌آهن، گسترش شهرها و جنگل‌زدایی ناپایدار شده و برای چندمین بار فعال خواهند شد(Zhang et al., 2021; Tian et al., 2022). همچنین این لغزش‌ها می‌توانند در اثر عوامل آنتروپوژن مانند ساخت‌وساز در بدنه توده لغزشی و فعالیت کشاورزی در تاج لغزش و یا باربرداری از پای توده آن دوباره فعال گردند. درصورتی‌که شهر و مناطق روستایی، تأسیسات مهندسی و دریاچه سدها بر روی لغزش‌های قدیمی و یا در مجاورت آن‌ها قرار گیرد در درازمدت، زندگی و فعالیت‌های انسانی به خطر خواهد افتاد. لغزش‌های سد وایونت[2] ایتالیا با بیش از ۲۰۰۰ نفر تلفات انسانی (Wolter, Stead, Ward, Clague & Ghirotti, 2016; Dykes & Bromhead, 2018)، مجموعه لغزش‌های بزرگ‌ترین پروژه انرژی آبی در جهان واقع در منطقه سه دره چین[3] (Tang, Wasowski & Juang, 2019; Jian, Wang & Yin, 2009) نمونه‌ای از فعالیت مجدد زمین‌لغزش‌های قدیمی در جهان هستند که براثر بارش، تغییرات تراز آب مخازن سدها و ساختمان‌سازی، فعال شده و خسارات انسانی و مالی بسیاری را به ساختمان‌ها و

[1] Old Landslide
[2] Vaiont
[3] Three Gorges Reservoir

تأسیسات زیربنایی وارد نموده‌اند. در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس ایران نیز لغزش‌های قدیمی زیادی وجود دارد که معمولاً با سه عامل محرک زلزله، بارندگی شدید و مداوم و فعالیت‌های انسانی، حرکت دوباره خود را آغاز نموده‌اند (Rezapour, Jabari & Bahrami, 2022). همچنین دامنه‌های شرقی البرز، دارای بیشترین پتانسیل لغزشی در کشور می‌باشند و وجود لغزش‌های قدیمی در منطقه گواه براین ادعاست.

با توجه به اهمیت آسیب‌پذیری سازه‌های انسانی در برابر مخاطرات طبیعی، مطالعه آن‌ها در جهان در حال گسترش است (Palmisano, Vitone & Cotecchia, 2016) و آسیب‌پذیری سازه‌ها یک موضوع چالش‌برانگیز و اساسی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش است (Van Westen, Van Asch & Soeters, 2006). اصطلاح ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA)[1] توسط دانشمندان به روش‌های مختلفی مطرح می‌گردد. از دیدگاه علوم طبیعی و مهندسی، آسیب‌پذیری به‌عنوان درجه خسارت، برحسب درصد آسیب سازه، به یک عنصر یا مجموعه‌ای از عناصر معین که در معرض یک رویداد لغزشی قرار دارند تعریف می‌شود (Glade, 2003). ارزیابی عملکرد سازه ساختمان به معنای ارزیابی مقدار آسیب، نقش کلیدی در پیشگیری و کاهش خطر دارد. درواقع تجزیه‌وتحلیل مکانی- زمانی تغییر شکل زمین و میزان آسیب ساختمان ابزار مفیدی برای درک تکامل زمین‌لغزش است. رویکردهای مختلفی برای بررسی عملکرد ساختمان تحت تأثیر پدیده‌های ناپایداری زمین در ادبیات علمی شرح داده شده است. بااین‌حال هر رویکرد مخصوص منطقه ویژه‌ای بوده و تفاوت‌هایی را در نتایج نهایی مربوطه نشان می‌دهد؛ بنابراین در دسترس بودن یک طبقه‌بندی استاندارد برای ارزیابی آسیب ساختمان‌ها و تحلیل علل خرابی آن‌ها حائز اهمیت است.

بورلند و همکاران (Burland, Broms & De Mello, 1978) ، با استفاده از مطالعات پیشین، طبقه‌بندی آسیب برای فونداسیون ساختمان را بر اساس خسارات وارده بر دیوارها پیشنهاد کرده و ۶ نوع آسیب را از درجه ۰- ۵ (بدون خسارت تا فروپاشی کامل) طبقه‌بندی نمودند. پس از آن‌ها الکساندر (Alexander, 1986) مقیاس شدت را برای آسیب سازه‌ای که از فرونشست و لغزش به وجود آمده‌اند را پیشنهاد داد. او شرایط ساختمان- ها را با پرسشنامه‌های بازرسی آسیب ساختمان پس از زلزله تطابق داد و تکمیل نمود. در طی زمان، طبقه-

[1] Building Vulnerability Assessment (BVA)

بندی آسیب ساختمان به‌وسیله لئون و همکاران (Leone, Asté & Leroi, 1996) کامل‌تر شد و درجه خسارت بین ۰ و ۱ تعیین گردید. در سال ۱۹۹۸ این روش با استفاده از مقیاس ماکروسیسمیک اروپا EMS[1] توسط گرونتال (Grünthal, 1998) به‌روزرسانی شد و با هدف ارزیابی آسیب ساختمان‌های واقع بر لغزش در مقیاس شهری معرفی شد. پاپاثوما-کول (Papathoma-Köhle, Neuhäuser, Ratzinger, Wenzel & Dominey-Howes, 2007)، مطالعه‌ای را درباره ارتباط آسیب‌پذیری فیزیکی ساختمان‌ها با زمین‌لغزش انجام داده و ۵ شاخص فاصله، شیب، میزان خطر، مصالح و تعداد طبقات ساختمان را بررسی نمودند. در مطالعات بعدی محققانی همچون اوزلی و همکاران (Uzielli, Nadim, Lacasse & Kaynia, 2008)، لی و همکاران (Li, Nadim, Huang, Uzielli & Lacasse, 2010)، کپس و همکاران (Kappes, Papathoma-Kohle & Keiler, 2012)، گودفری و همکاران (Godfrey, Ciurean, Van Westen, Kingma & Glade, 2015)، پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016) و سینق و همکاران (Singh, Kanungo & Pal, 2019)، شاخص‌های آسیب‌پذیری را کامل نمودند و ویژگی‌های معماری ساختمان (تعداد طبقات، شکل ساختمان، زیرزمین و ...)، مشخصات مصالح (جنس پی، اسکلت، سقف و ...) و ویژگی‌های ساختاری سازه (ستون، دیوار، ترک عمودی، مایل با زاویه ۴۵ درجه، افقی و ...) را در لیست شاخص‌های سنجش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها افزودند.

تجربه نشان داده است کهترکیبی از نتایج بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها با داده‌های تغییر شکل زمین، می‌تواند درک بهتری از رفتار زمین‌لغزش را ارائه دهد. امروزه تغییر شکل‌های آهسته زمین را، می‌توان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) در طیف وسیعی از شرایط آب و هوایی و ژئومورفیک پایش نمود (Nishiguchi, Tsuchiya & Imaizumi, 2017). همچنین با استفاده از روش InSAR می‌توان لغزش‌های قدیمی فعال ناشناخته را شناسایی نمود و مرز دقیق پهنه‌های فعالیت آن‌ها را مشخص و میزان حرکت آن‌ها را ارزیابی نمود (Kiseleva et al., 2014). علاوه براین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی پراکنشگر دائمی[2] PSIمی‌توان حرکات آهسته تغییر شکل زمین به میلی‌متر در سال را برای مناطق شهری و روستایی استخراج

[1] European Macroseismic Scale (EMS)

[2] Persistent Scatterer Interferometry

نمود و درک بهتری از هندسه و سینماتیک لغزش را فراهم نمود (Aslan et al., 2020). در این زمینه، لو و همکاران (Lu, Catani, Tofani & Casagli, 2014)، سیامپالینی و همکاران (Ciampalini et al., 2014)، نوتتی و همکاران (Notti et al., 2015)، ماتئوس و همکاران (Mateos et al., 2017)، اینفانته و همکاران (Infante et al., 2019) و فرلیسی و همکاران (Ferlisi, Gullà, Nicodemo & Peduto, 2019) برای بررسی ارتباط بین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و سرعت حرکت زمین‌لغزش از روش‌های تداخل سنجی راداری و سری زمانی PSI در مناطق مسکونی استفاده نمودند. محققان ایرانی، در مطالعه رفتار زمین‌لغزش‌ها بیشتر بر تکنیک‌های سنجش‌ازدور راداری تمرکز داشته‌اند (Shirani, 2018; Afshari, Ghahroudi Tali, Sadough & Ehteshami Moin abadi, 2020; Khodaei Geshlag, Roostaei, Mokhtari & Valizadeh Kamran, 2021) و مطالعات محدودی برای نقش آسیب ساختمان‌ها در ارزیابی فعالیت لغزش انجام داده‌اند.

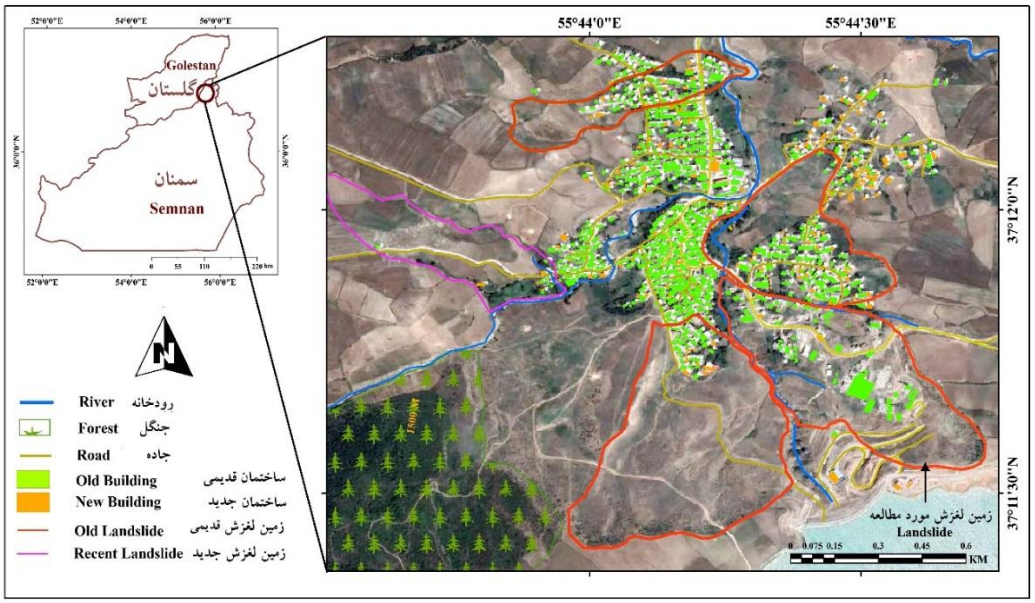
در دامنه‌های شمالی البرز در منطقه کالپوش نیز زمین‌لغزش‌های قدیمی وسیعی در دامنه‌ها گسترده شده‌اند که در گذر زمان و تغییر کاربری، مورفولوژی آن‌ها به‌آسانی قابل‌تشخیص نمی‌باشند. در دهه اخیر روستای حسین‌آباد در منطقه کالپوش بر روی ۴ زمین‌لغزش قدیمی گسترش‌یافته و سد خاکی حسین‌آباد نیز در مجاورت آن آبگیری شده است. پس از بارش شدید اسفندماه ۱۳۹۷ این زمین‌لغزش‌ها ناپایدار شده و به ۱۶۰ ساختمان خسارت شدیدی وارد نموده است. میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های روستای حسین‌آباد به دلیل آبگیری سد بالادست، بارش سنگین، رشد تصاعدی جمعیت، نبود آئین‌نامه‌های ساخت‌وساز و عدم شناخت پهنه لغزشی قدیمی و فعالیت مجدد آن، در طی زمان زیاد شده و فاجعه آفریده است. لذا این پژوهش با تلفیق داده‌های ژئومورفولوژی لغزش، سینماتیک حرکت لغزش با استفاده از داده‌های تکنیک تداخل سنجی پراکنشگر دائمی PSI و میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس روش پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، به مطالعه فعالیت مجدد لغزش حسین‌آباد پرداخته و رفتار فضایی- زمانی آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

روستای حسین‌آباد در بخش کالپوش شهرستان میامی در شمال استان سمنان قرار گرفته است و بر اساس سرشماری مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۵ با ۳۵۱۴ نفر بزرگ‌ترین روستای منطقه می‌باشد. این روستا با وسعت ۶۰ هکتار، از شمال و غرب با جنگل‌ها و ارتفاعات گالیکش، از سمت شرق و شمال شرق با دشت شاد و در جنوب با دریاچه سد و دشت کالپوش محدود می‌شود. بافت قدیمی روستا در مرکز و در مجاورت سرشاخه اصلی رودخانه اوغان تشکیل شده است و در طی زمان روستا به سمت دامنه‌های شیب‌دار جنوبی و غربی بر روی ۴ پهنه لغزش قدیمی با شیب متوسط ۱۴ درصد توسعه یافته است (شکل ۱).

منطقه موردمطالعه در زون زمین‌شناسی کپه‌داغ و روی پی‌سنگ آهک‌های مارن‌دار سازند چمن‌بید و سنگ‌آهک توده‌ای مزدوران واقع شده است. متوسط بارش سالانه در ایستگاه باران‌سنجی حسین‌آباد ۶۸۰ میلی‌متر و مقدار رطوبت هوا ۷۰ درصد است. سد خاکی حسین‌آباد نیز با فاصله ۲۰۰ متری از روستا، جهت جمع‌آوری آب چشمه‌ها و تأمین آب موردنیاز منطقه، در دشت کالپوش ساخته و در سال ۱۳۹۲ آبگیری شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی روستای حسین‌آباد و لغزش‌های قدیمی منطقه

Fig.1. Geographical location of Hossein Abad village and old landslides in the area

۲-۲- روش انجام پژوهش

این مطالعه در چهار مرحله مختلف با جمع‌آوری، تولید، پردازش و تفسیر داده‌های تاریخی، میدانی و سنجش‌ازدور راداری انجام شده است. ابتدا برای تولید نقشه ژئومورفولوژی زمین‌لغزش قدیمی فعال شده حسین‌آباد، از داده‌های موجود همچون عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳۴۷، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دوزین چاپ سازمان زمین‌شناسی کشور و بازدیدهای میدانی استفاده شد. همچنین برای نمایش بهتر پهنه لغزشی از تصاویر پهپاد UAV استفاده گردید و ۴۰۱ تصویر عکسبرداری شد و پس از پردازش‌های نهایی تصویر ارتوفتو پهپاد تهیه گردید و سپس نقشه نهایی، تولید و استخراج گردید.

در ادامه جهت بررسی حرکت سینماتیک زمین‌لغزش، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی PSI، ۶۸ تصویر راداری سنتینل1A/B دانلود و پس از پردازش در نرم‌افزار GMTSAR، در نرم‌افزار StaMPS نقاط پراکنش کننده‌های دائمی PS استخراج شدند و نقشه‌های نرخ جابه‌جایی پهنه لغزشی تهیه گردید. پس از مشخص شدن مرز زمین‌لغزش، در چندین مرحله بازدید میدانی گسترده‌ای جهت بررسی و پرنمودن پرسشنامه‌های میزان آسیب ساختمان‌ها صورت گرفته و با ابزارهایی همچون دوربین عکسبرداری و دستگاه GNSS مستند گردید و پس از طبقه‌بندی بر اساس روش پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، نقشه میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در محیط گوگل ارث تهیه شد. درنهایت با تهیه نقشه میزان جابه‌جایی پهنه لغزشی و ساختمان‌ها، ارتباط مکانی تغییرات لغزش با میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و موقعیت ژئومورفولوژی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۳- نقشه فعالیت زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد

در دهه گذشته، دانش تداخل سنجی راداری و تکنیک مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی PS، به‌عنوان یک ابزار سنجش از راه دور با هدف نظارت بر اثرات حرکت زمین در مناطق مسکونی گسترش یافته است. ترکیب این داده‌ها با نتایج بررسی آسیب ساختمان‌ها، ارزیابی موفقی را از فعالیت زمین‌لغزش‌ها تضمین می‌کند (Palmisano, Vitone & Cotecchia, 2018).

فرتتی و همکاران (Ferretti, Prati & Rocca, 2001) سری زمانی PS را برای اولین بار مطرح کردند. در این روش، بخش‌هایی از ساختمان‌ها، سازه‌های فلزی، سنگ‌های روی زمین و ... که ویژگی‌های الکترومغناطیسی آن‌ها در طول زمان به‌طور محسوسی تغییر نمی‌کنند و همدوس باقی می‌مانند به‌عنوان نقاط کاندید پراکنش-گرهای دائمی PS معرفی می‌شوند.

در این پژوهش با استفاده از روش StaMPS هوپر (Hooper, Segall & Zebker, 2007)، ۶۸ تصویر راداری سنتینل1A/B در دو حالت مداری گذر بالا و پایین، در بازه زمانی یکساله فعالیت لغزش حسین‌آباد مورد بررسی قرار گرفت (شکل۲) و از داده‌های تغییر شکل سری زمانی PS در محاسبه نرخ و سرعت جابه‌جایی سالانه و تجمعی استفاده شد. اطلاعات تصاویر اخذ شده از سایت آلاسکا در جدول ۱ آورده شده است. تصویر اصلی برای تهیه اینترفروگرام‌ها بر اساس کمترین مقدار خطای مبنای زمانی، مکانی و داپلر[1] انتخاب شد و پس از پردازش‌های اولیه، ۶۷ اینترفروگرام بر اساس گراف شکل۳ برای هر دو حالت مداری تهیه و مراحل پردازش مطابق شکل ۴ انجام شد. پس از انجام پردازش‌ها، نقشه‌های جابه‌جایی حوضه موردمطالعه استخراج شدند و سپس مرز زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد با نقشه جابه‌جایی مورد تطبیق قرار گرفت.

جدول۱- ویژگی‌های تصاویر سنتینل مورداستفاده

Table 1-The characteristics of the utilized Sentinel images

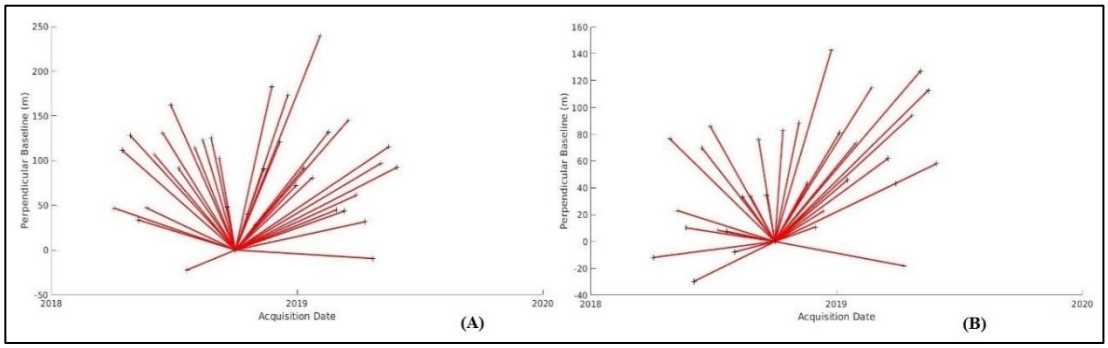
Path	Row	Acquisition Period	No.	Orbit Direction	Satelite
159	119	2018.04-2019.05	36	Ascending	1A/B
64	468	2018.04-2019.05	32	Descending	1A

[1] Doppler



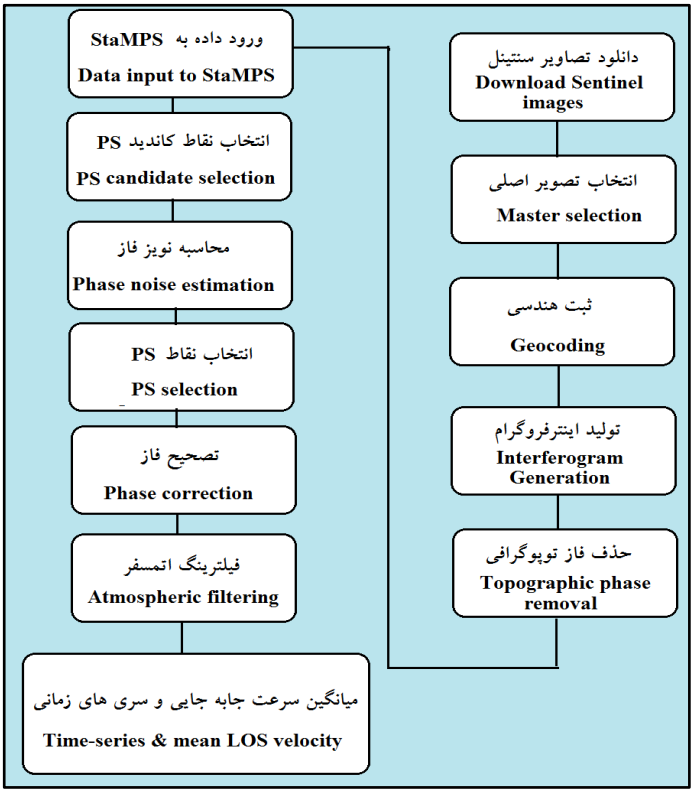
شکل۲- موقعیت تصاویر سنتینل اخذ شده در دو حالت مداری

Fig.2. The spatial location of Sentinel images acquired in two orbital configurations



شکل۳- شبکه گراف ترسیم شده برای اینترفروگرام‌های مسیرهای ۱۵۹ و ۶۴. در دو حالت (A)- مدار بالاگذر و (B)- مدار پایین‌گذر. به‌علاوه نشان‌دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی، اینترفروگرام‌ها تولید شده بین جفت تصاویر است. محور عمودی خط مبنای عمودی تصاویر نسبت به تصویر اصلی و محور افقی زمان ثبت تصاویر است.

Fig.3. The graph network plotted for the interferograms of Pathes 159 and 64 in two configurations: (A) ascending orbit and (B) descending orbit. The figure illustrates the images, their connecting lines, and the interferograms generated between image pairs. The vertical axis represents the perpendicular baseline of the images relative to the reference image, while the horizontal axis represents the acquisition time of the images.



شکل۴- مراحل تهیه سری زمانی PS

Fig.4. The steps for generating a PS time series

۲-۴- طبقه‌بندی آسیب ساختمان

طبقه‌بندی پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، عمدتاً بر اساس روش EMS-98 طراحی شده است، این روش گسترده‌ترین و پرتکرارترین طبقه‌بندی آسیب در زمینه مهندسی سازه می‌باشد. بااین‌حال ازآنجایی‌که طبقه‌بندی مذکور برای آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه محدود شده است، نیازمند تغییرات زیادی می‌باشد. برای نیل این هدف برخی از جزئیات با روش بورلند و همکاران (Burland et al., 1978)، برای زمین‌لغزش ادغام می‌شود؛ بنابراین طبقه‌بندی پیشنهادی از ترکیب اصلی ادبیات لرزه‌ای EMS و ژئوتکنیکی بورلند و همکاران (Burland et al., 1978) به وجود آمده است. جدول۲، مقایسه این دو روش و ارائه روش پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016) را به نمایش می‌گذارد. در طبقه‌بندی پیشنهادی ۶ درجه برای آسیب از ۰-۳C به‌عنوان شدت آسیب تعریف شده است. درجه صفر و ۱ به‌عنوان ساختمان‌های قابل‌استفاده دارای خسارات جزئی، درجه ۲ نیازمند بازسازی و دارای خسارت متوسط و درجه

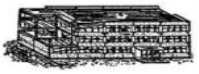
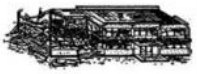
۳ به سه زیرمجموعه 3a,3b,3c به ترتیب با خسارت سنگین، خیلی سنگین و به‌طور کامل تخریب شده طبقه‌بندی گردیدند. بر اساس تنوع ساختمان‌ها، این سازه‌ها به دو نوع ساختمان با مصالح بنایی و بتنی طبقه‌بندی می‌شوند. ساختمان‌هایی که با آجر، سنگ، بلوک سیمانی و یا ترکیبی از آن‌ها ساخته شده‌اند، در گروه ساختمان‌های با مصالح بنایی و ساختمان‌هایی که تیر و ستون آن‌ها از بتن ساخته شده، در گروه ساختمان بتنی قرار می‌گیرند. در جدول۳، مقدار عرض ترک‌های ساختمان برای طبقه‌بندی درجه آسیب شرح داده شده است و در جدول۴، سه سطح گسترش آسیب برای این ساختمان‌ها تعریف شده است. در سطح کم، کمتر از ۱/۳ اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند. در سطح زیاد، بیش از ۱/۳ و کمتر از ۲/۳ از اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند و در سطح خیلی زیاد، بیش از ۲/۳ اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند. لذا تفاوت طبقه‌بندی پیشنهادی با دو روش دیگر در کمی بودن آن است به‌گونه‌ای که، هر درجه آسیب نه‌تنها به سطح آن، بلکه به گستردگی و فراوانی آن نیز بستگی دارد.

جهت شناسایی شاخص‌های آسیب‌پذیری، ابتدا بازدید میدانی گسترده‌ای در منطقه صورت گرفت، سپس ویژگی‌های بومی ساختمان‌ها و همچنین الگوی ترک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به مطالعات الکساندر (Alexander, 1986) و پالمیسانو (Palmisano, 2011) چهار نوع شاخص انتخاب گردید. ویژگی‌های عمومی ساختمان (موقعیت و سن ساختمان، تعداد طبقات)، نوع ساختمان (مصالح بنایی و بتن)، مشخصات مصالح (جنس فونداسیون، اسکلت و سقف)، ویژگی‌های ساختاری سازه (موقعیت ترک بر روی دیوار، نوع ترک افقی، عمودی، مایل) انتخاب و فرم ارزیابی ساختمان‌ها براین اساس طراحی شد، در انتها با بازرسی‌های بصری، مستندات عکاسی و مصاحبه با صاحبان ساختمان‌ها، این فرم برای هر ساختمان پر گردید و عرض ترک ساختمان‌ها اندازه‌گیری و با دوربین عکاسی مستند گردید. در انتها با توجه به جداول ۳ و ۴ درجه خسارت برای هر ساختمان تخصیص داده شد.

جدول۲- مقایسه طبقه‌بندی پیشنهادی با دو طبقه‌بندی مشابه پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016).

Table 2- Comparison of the proposed classification with two similar classifications by Palmisano et al., 2016

Palmisano et al., (2016) Classification		EMS 98 Classification (Gruntal 1998)		Burland, et al., (1978) Classification	
ناچیز	۰	–	–	ناچیز	۰

Negligile			ساختمان با مصالح بنایی	ساختمان بتنی		Negligible damage
	بسیار کم		Masonry	RC		خسارت کم
۱	Very Slight	۱			۱	Negligible to slight damage
۲	Slightکم	۲			۲	خسارت متوسط
۳	Moderate متوسط					Moderate damage
۴	شدید	۳			3a	خسارت سنگین
	Severe	۴			3b	Substantial to heavy damage
						خسارت بسیار سنگین
						Very heavy damage
۵	بسیار شدید	۵			3c	تخریب شده
	Very Severe					Destruction

جدول۳- شرح اندازه‌گیری ترک‌های ساختمان در طبقه‌بندی درجه آسیب

Table 3- Description of measuring building cracks in damage degree classification

درجه خسارت Level of damage	Description توضیحات
0	بدون خسارت: عرض ترک در ساختمان بنایی کوچک‌تر و یا مساوی ۰/۱ میلی‌متر، عرض ترک در تیر و سقف، ستون و دیوارهای ساختمان بتنی کوچک‌تر یا مساوی ۰/۳ میلی‌متر No damage: crack width in masonry elements≤ 0.1 mm; crack width in R.C. beams and floors≤0.3 mm.
1	عرض ترک در ساختمان‌های با مصالح بنایی بین ۰.۱ تا ۱ میلی‌متر، عرض ترک در تیر و سقف ساختمان بتنی بین ۰.۳ تا ۱ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بین ۰.۳ تا ۰.۵ میلی‌متر Crack width in masonry elements >0.1 mm and ≤1 mm; crack width in R.C. beams and floors> 0.3 mm and ≤1 mm; crack width in R.C. columns,wall >0.3 mm and 0.5 mm
2	عرض ترک در ساختمان با مصالح بنایی بین ۱ تا ۵ میلی‌متر، عرض ترک در ساختمان بتنی بین ۱ تا ۴ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بین ۰.۵ تا ۲ میلی‌متر Crack width in masonry elements>1mm≤5mm; crack width in R.C. beams and floors>1mm and ≤4mm; crack width in R.C. columns, walls >0.5 mm and ≤2mm.
3	عرض ترک در ساختمان با مصالح بنایی بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر، عرض ترک در ساختمان بتنی بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر Crack width in masonry elements>5 mm; crack width in R.C. beams and floors>4 mm; crack width in R.C. columns, walls >2mm

جدول۴- شرح طبقه‌بندی پیشنهادی پالمیسانو و همکاران ((Palmisano et al., 2016

Table 4- Proposed damage classification(Palmisano et al., 2016)

درجه خسارت Grade of damage	شرح درجه خسارت برای ساختمان‌های با مصالح بنایی Description of grade of damage for masonry buildings	شرح درجه خسارت برای ساختمان‌های بتن آرمه Description of grade of damage for R.C. building
0	خسارت ناچیز	خسارت ناچیز

درجه خسارت ۱-۰ (در سطح کمی از اجزا ساختمان) Negligible damage Damage of level 0 or damage of level 1 in few elements.	درجه خسارت ۱-۰ (در سطح کمی از اجزا ساختمان) Negligible damage Damage of level 0 or damage of level 1 in few elements.	
خسارت کم خسارت درجه ۱ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۲ در سطح کمی از سازه‌ها Slight damage Damage of level 1 in many elements or damage of level 2 in few elements.	**خسارت کم** خسارت درجه۱ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه ۲ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش قطعات کوچک گچ یا سنگ‌های سست از طبقات فوقانی ساختمانی Slight damage Damage of level 1 in many elements or damage of level 2 in few elements, fall of small pieces of plaster only or fall of loose stones from upper parts of buildings in few cases.	**1**
خسارت متوسط خسارت درجه ۱ در سطح خیلی زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۲ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۳ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش دیوارهای گچی Moderate damage Damage of level 1 in most elements or damage of level 2 in many elements or damage of level 3 in few elements, fall of brittle cladding and plaster of wall.	**خسارت متوسط** خسارت درجه۱ در سطح خیلی زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه ۲ در سطح زیادی از سازه‌ها، یا خسارت درجه ۳ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش قطعات بزرگ گچ Moderate damage Damage of level 1 in most elements or damage of level 2 in many elements or damage of level 3 in few elements, fall of fairly large pieces of plaster.	**2**
خسارت سنگین خسارت درجه۲ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان یا خسارت درجه۳ در سطح زیادی از سازه‌ها یا پوسته‌پوسته شدن بتن به دلیل خم‌شدگی میلگردها Heavy damage Damage of level 2 in most elements or damage of level3 in many elements or spalling of concrete cover due to buckling of reinforced bars.	**خسارت سنگین** خسارت درجه ۲ در سطح خیلی زیادی از سازه یا خسارت درجه ۳ در سطح زیادی از سازه‌ها یا شکست تک تک عناصر غیرساختاری مانند دیوارهای تیغه Heavy damage Damage of level 2 in most elements or damage of level3 in many elements or failure of individual non-structural elements(Partition walls).	**3a**
خسارت بسیار سنگین خسارت درجه۳ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان (ترک در بتن‌آرمه، شکست فشاری در میلگردها و تیرهای تقویت شده، یا کج شدگی ستون‌ها یا ریزش تعداد کمی از ستون‌ها یا ریزش یک طبقه فوقانی) Very heavy damage Damage of level 3 in most elements or cracks in R.C. elements with compression failure of concrete or fracture of bars or bond failure of beam reinforced bars or tilting of columns or collapse of a few columns or collapse of a few columns or collapse of a single upper floor.	**خسارت بسیار سنگین** خسارت درجه۳ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان (شکست جدی دیوارها یا شکست ناقص طبقات و سقف‌ها) Very heavy damage Damage of level 3 in most elements or serious failure of walls or partial structural failure of roots and floors.	**3b**
تخریب شده (ریزش طبقات و اسکلت ساختمان) Destruction Collapse of floors and parts of buildings.	**تخریب شده** (نزدیک به ریزش یا کاملاً تخریب شده) Destruction Total or near total collapse.	**3c**

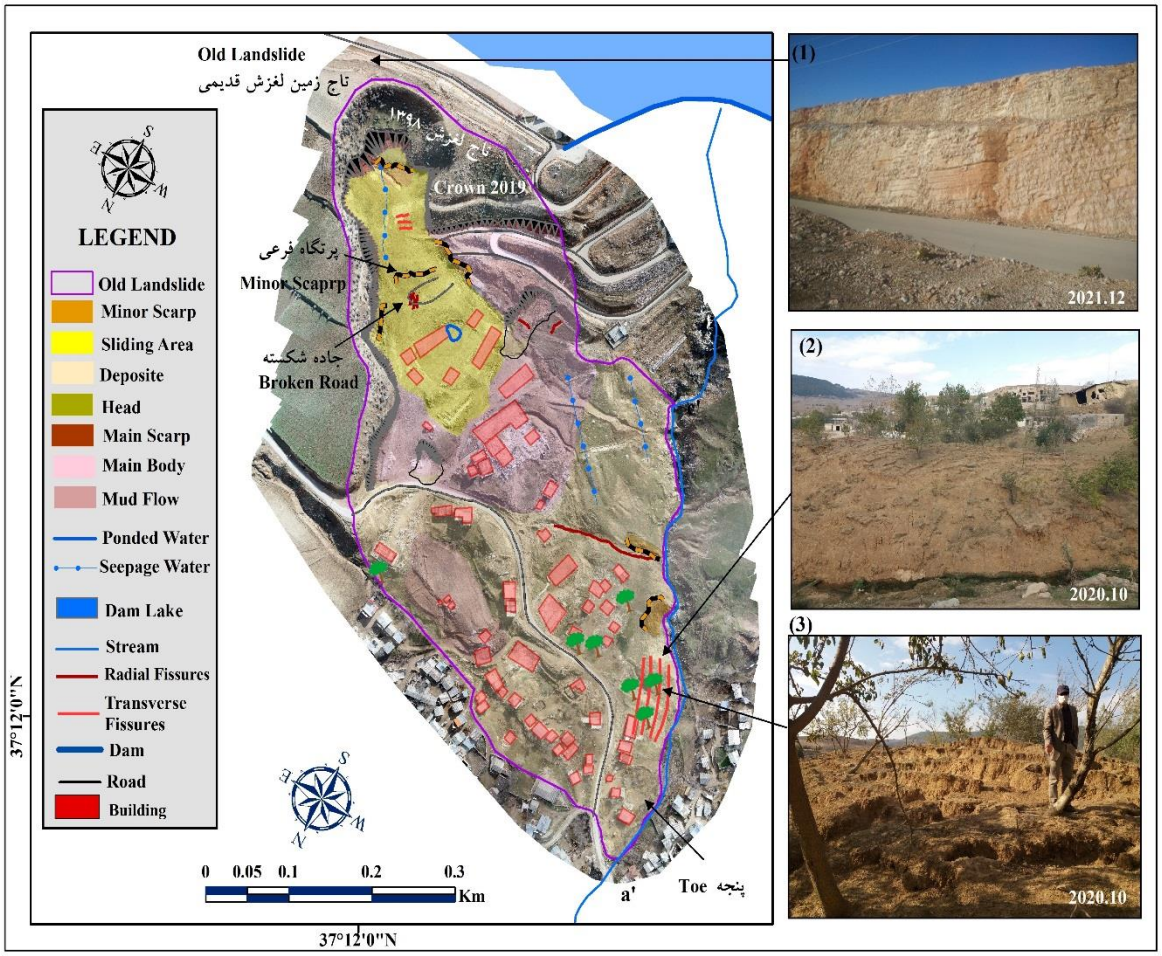
۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی زمین‌لغزش حسین‌آباد

با توجه به عکس هوایی سال ۱۳۴۷، چهار زمین‌لغزش قدیمی در روستای حسین‌آباد شناسایی گردید (شکل۱). در گذر زمان، در پی عدم شناخت این لغزش‌ها، توسعه روستا و ساخت‌وسازها بیشتر بر دامنه جنوبی روستا و بر روی دو زمین‌لغزش بزرگ قدیمی گسترش یافت. در سال ۱۳۹۲ سد خاکی حسین‌آباد با ظرفیت حدود ۱۶ میلیون مترمکعب آب، با اختلاف ارتفاع ۳۰ متر نسبت به روستا و در مجاورت دو توده لغزشی ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفت (Entezam, Rezaei, Vakilzade, Mohammadi & Babazade, 2019). بارش برف و باران سنگین در اواخر سال ۱۳۹۷ این لغزش‌ها را فعال نموده و منجر به ریزش سقف خانه‌ها و خرابی بالغبر ۱۶۰ خانه می‌شود و زمین‌های دامنه لغزشی شکافته و غیرقابل استفاده می‌گردد. زمین‌لغزش اصلی حسین‌آباد با مساحت۲۲ هکتار بیشترین خسارت را در بین لغزش‌های قدیمی در منطقه ثبت نموده است و با طول ۸۷۰ متر و عرض ۴۱۹ متر به‌صورت چرخشی و مرکب فعالیت نموده است. این لغزش بر روی سنگ بستر آهک مارن دار چمن بید به وقوع پیوسته است و چندین گسل کوچک در حدفاصل دریاچه سد و پشت دیواره تاج لغزش، رخنمون دارد (تصویر ۱ در شکل ۵). با توجه به نقشه ژئومورفولوژی لغزش حسین‌آباد در شکل۵، تاج لغزش قدیمی با ارتفاع ۱۳۷۸ متر بر روی پی‌سنگ آهک تثبیت شده است و تاج لغزش جدید با ارتفاع ۱۳۶۰ متری و شیب ۴۶ درجه، در پایین‌دست آن و روی رسوبات رسی قرار گرفته است. شیب در پرتگاه اصلی لغزش ۳۰ درجه بوده و تا پنجه لغزش در نزدیکی رود به ۳ درجه می‌رسد.

بدنه اصلی لغزش و زون برداشت روی رسوبات سطحی رس و لایه‌ای از مارن در عمق ۲۵ متر واقع شده است و سطح آب زیرزمینی در منطقه برداشت به‌صورت چشمه‌هایی در سطح زمین نمایان شده است. کاربری این زون مسکونی بوده و مدرسه شبانه‌روزی، پاسگاه نیروی انتظامی، بخشداری و ساختمان‌ها بیشترین جابه‌جایی و ریزش را متحمل شده‌اند، همچنین جاده اصلی شکسته و ۱۳ متر جابه‌جا شده است. در

زون پای لغزش و محل تجمع رسوبات رسی، بیشترین ترک‌های کششی به وجود آمده است (تصویر ۲ و۳ در شکل۵) و زمین بازی، منازل و دامنه مشرف به رودخانه ناپایدار و گسیخته شده‌اند.

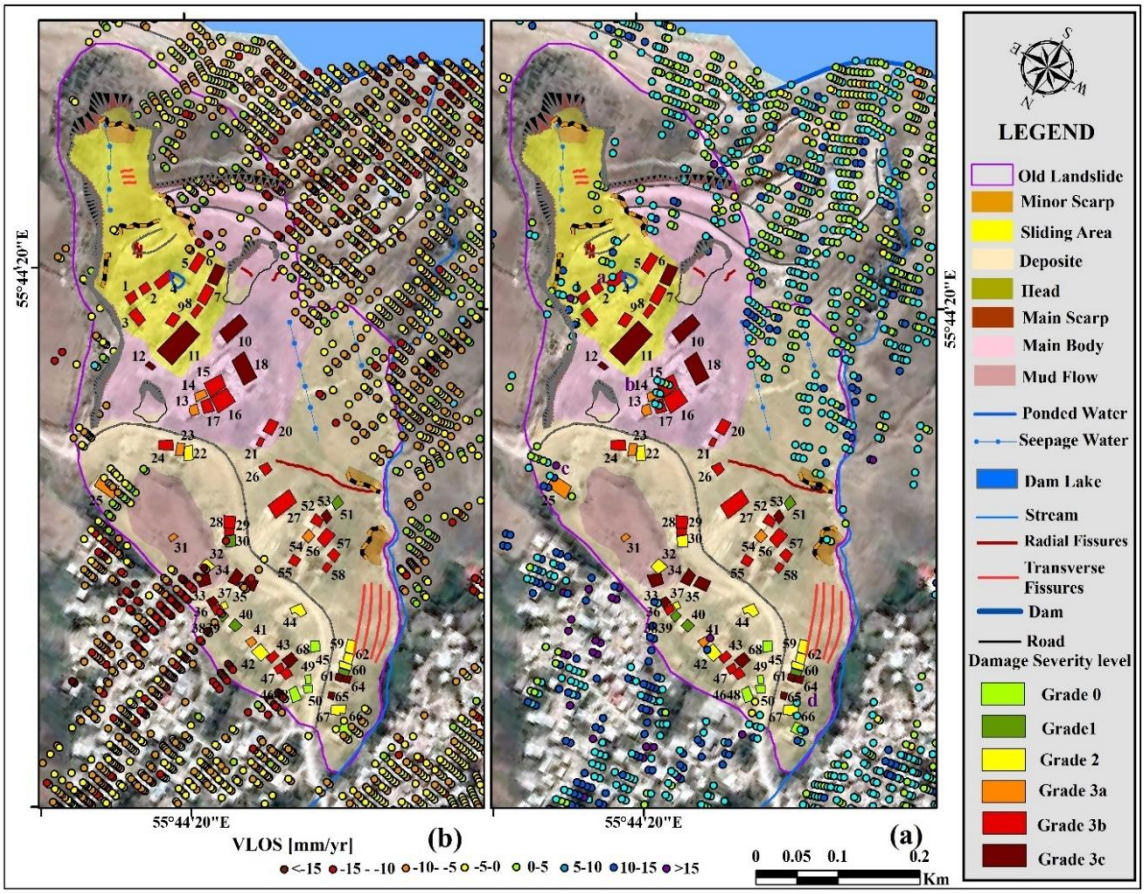


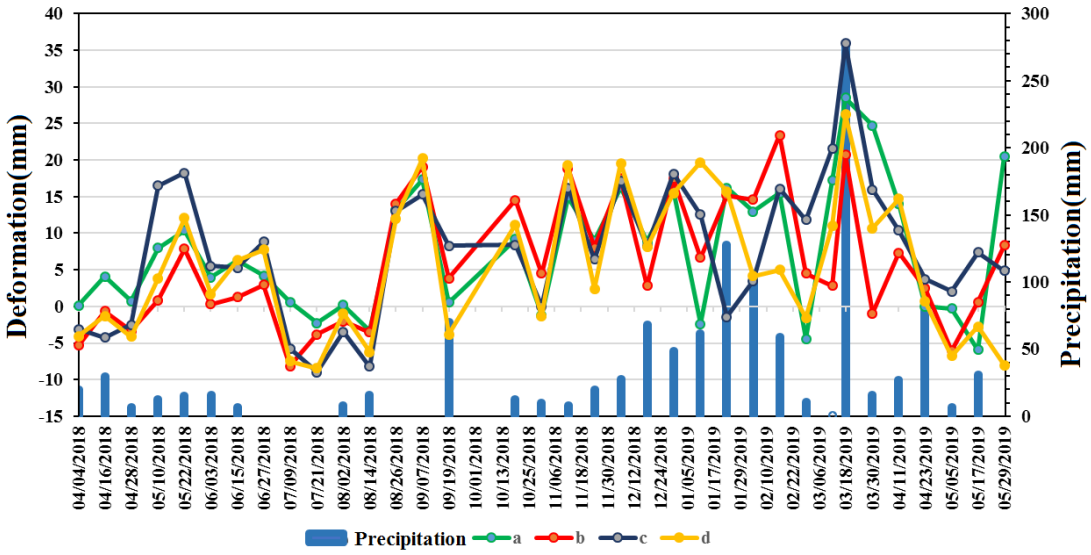
شکل ۵ - نقشه ژئومورفولوژی زمین‌لغزش حسین‌آباد و تصویر ارتوفتو پهپاد UAV در تاریخ ۱۴۰۰/۰۹/۱۸، (۱) تصویر گسل‌ها در سنگ‌آهک چمن بید، جهت دید به سمت شمال (۲) و (۳) تصاویر شکاف‌های عرضی متعدد در پای لغزش و نزدیک رود، جهت دید به سمت شرق

Fig.5. The geomorphological map of the Hossein abad landslide and the UAV orthophoto image dated 2021.12.09, including: (1) the image of faults in the Chaman Bid limestone, with a northward view direction, and (2) and (3) images of multiple transverse cracks at the toe of the landslide near the river, with an eastward view direction

۳-۲ - ارزیابی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد

با توجه به شکل۶، موقعیت فضایی لغزش شناسایی شده از طریق پراکنش‌گرهای دائمی با مرز لغزش قدیمی مطابقت دارد که این امر فعالیت مجدد لغزش قدیمی را در سال ۲۰۱۸-۲۰۲۰ تأیید می‌کند. در نقشه جابه-جائی قائم در شکل ۶(a)، سرعت جابه‌جایی بین ۱۹ میلی‌متر تا ۱۲- میلی‌متر در سال می‌باشد. همچنین در نقشه جابه‌جایی افقی در شکل ۶(b)، میانگین سرعت جابه‌جایی شرقی-غربی بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۰ بین ۱۶ تا ۲۲- میلی‌متر در سال برای این لغزش ثبت شده است و بیشترین جابه‌جایی‌های افقی با اعداد منفی در پای لغزش رخ داده است. در چهار نمودار شکل۷، بیشترین نرخ فرونشست ۳۵- میلی‌متر در پای لغزش و در زون برداشت با ۳۳- میلی‌متر در بستری از رس در ۲ ماه پربارش قابل مشاهده می‌باشد. بیشترین نرخ بالاآمدگی نیز با ۳۸ میلی‌متر در پای لغزش و بدنه اصلی می‌باشد.





شکل۷- نمودار تغییرات جابه‌جایی سری زمانی لغزش همراه با تغییرات بارش بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹، موقعیت نقاط مورد ارزیابی در شکل۶، تصویر (a) قابل مشاهده می‌باشند.
(داده‌های بارش از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت گردیده است.)

Fig.7. The time-series displacement variation chart of the landslide along with precipitation changes between 2018 and 2019. The locations of the evaluated points are shown in Fig. 6, image (a).
(Precipitation data was obtained from the National Meteorological Organization.)

با استناد به نمودارهای شکل ۷، در تابستان ۱۳۹۷ روند لغزشی در پای لغزش به‌صورت فرونشست نمایان است. این تغییرات می‌تواند تحت تأثیر نوسانات دوره‌ای سطح آب دریاچه سد و آب زیرزمینی باشد که به‌صورت خروج آب از زیرزمین منازل و ترک بر روی جاده ثبت شده است. با ارزیابی هیستوگرام بارشی و با ۴۲۰ میلی‌متر بارش تجمعی در منطقه، بیشترین نرخ تغییر شکل عمدتاً در اسفندماه ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ در پرتگاه لغزش جدید، زون برداشت و پای لغزش مشاهده می‌شود. بر اساس یافته‌های میدانی، بیشترین حرکات افقی در زون برداشت و در جاده دسترسی به تأسیسات سد در حدود ۲۰ متر رخ داده است. بیشترین افتادگی در زون برداشت در جاده با ۳ متر افتادگی قائم و پای لغزش (تصویر ۳ در شکل۵) نمایان است و همچنین غالب بالاآمدگی‌ها و تجمع خاک نیز در بدنه اصلی و پای لغزش به سبب حرکت و تورم لایه‌ای از مارن در عمق ۲۵ متری به وقوع پیوسته و منجر به بالاآمدگی کف ساختمان‌ها و تخریب نسبی آن‌ها شده است.

در مطالعه حاضر با ارزیابی فعالیت لغزشی از نقشه ژئومورفولوژی، نقشه سرعت جابه‌جایی زمین، نمودارهای مستخرج از روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی PS و بازدیدهای میدانی مشخص می‌شود که لغزش قدیمی در سال ۱۳۹۷ فعال گردیده و با توجه به سیستم طبقه‌بندی کرودن و وارنس (Cruden & Varnes, 1996) این لغزش با سرعت آهسته در جهت شیب در طی زمان به سمت پایین حرکت نموده و چهره آن از خزش در تابستان به لغزش چرخشی در اواخر زمستان تغییر کرده است و زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد تحت نفوذ بارندگی شدید و سطح اشباع آب زیرزمینی متأثر از دریاچه سد فعال گردیده است.

۳-۳- ارزیابی میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA)

در بررسی‌های میدانی انجام شده، با توجه به خطر ریزش، ۶۷ ساختمان که امکان اندازه‌گیری‌های میدانی در آن‌ها وجود داشت مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس داده‌های بانک اطلاعاتی مستخرج از فرم‌های ارزیابی آسیب ساختمان‌ها، ۶۰ درصد ساختمان‌ها در پهنه لغزشی حسین‌آباد، قدیمی و از جنس مصالح بنایی آجری می‌باشند. این ساختمان‌ها عمدتاً با سقف شیروانی به‌صورت همکف و یک طبقه بنا شده‌اند و با تیرها، اسکلت آهنی و فونداسیون شفته‌ای از شن و آهک بر روی پای لغزش و زون برداشت قرار دارند. ساختمان‌های جدید بتنی نیز با اسکلت و فونداسیون بتنی در پای لغزش متراکم می‌باشند.

با استناد به شکل ۷، نمودار (a) تغییرات ساختمانی همکف با مصالح بنایی در بستری از رس، در نزدیکی تاج لغزش قدیمی و در زون برداشت را به نمایش می‌گذارد که در دوره پربارش، ۳۳ میلی‌متر بالاآمدگی را تجربه کرده و پس از ۲ ماه با ۳۵ میلی‌متر کاهش ارتفاع، فرونشست پیدا کرده و دیوارهای باربر ساختمان شکسته شده است. تمامی ساختمان‌ها در زون برداشت به دلیل بالاآمدگی با خسارت بسیار سنگین مواجه شدند و تخریب گردیدند. در تصویر (a) شکل۸، ساختمان سوله ورزشی با بالاآمدگی فونداسیون، دچار شکست دیوارهای آجری باربر شده و سقف آن شکسته شده است. همچنین تمامی ساختمان‌ها در بدنه اصلی لغزش با خسارت سنگین و بیشتر از آن مواجه شدند. بالاآمدگی فونداسیون در تصویر (b) و (c) شکل۸، نشان می‌دهد که حضور آب سبب تورم مارن و رس بستر در بدنه اصلی لغزش شده است و متعاقب آن با افزایش تنش فشاری بر فونداسیون، دیوارهای اصلی، تیرها و سقف طبقات به سمت بالا حرکت نموده و شکسته

شده و پس از گذشت زمان ریزش نموده‌اند. در این ساختمان‌ها الگوی ترک‌های عمودی مرتبط با فونداسیون می‌باشند و ترک افقی دیوارها که مؤید حرکت افقی خاک می‌باشد نیز در آن‌ها مشهود است. در پای لغزش با توجه به موقعیت جغرافیایی هر سازه نسبت به توده لغزشی، هر ساختمان رفتار مقاومتی ویژه‌ای به نمایش می‌گذارد. الگوسازی ترک‌های این ساختمان‌ها، رفتار آن‌ها را توجیه می‌کند. در ساختمان‌های داخلی پای لغزش در تصاویر (d) و (e) شکل۸، خاک بستر بالاآمده و کمانش در دیوارهای اصلی قابل مشاهده است. در تصویر (f) شکل۸، در نزدیکی مرز جانبی لغزش ساختمان‌های با مصالح بنایی دارای ترک مورب پلکانی می‌باشند و در دیوارهای باربر آجری ساختمان، بر اثر نشست خاک در بستر رسی به وقوع پیوسته‌اند. در تصویر (g) شکل۸، ترک‌های مورب پلکانی و جابه‌جایی پایه بتنی ساختمان، دلالت بر نشست خاک در این منطقه دارد، این ساختمان در چندین ماه حرکت داشته و پایه‌های آن خمیده‌تر شده‌اند. ساختمان شماره ۶۵ در تصویر (h) الگوی ترک متفاوتی را نشان می‌دهد. در این ساختمان با مصالح بنایی ترک‌های عمودی زیادی وجود دارد که حتی پس از مرمت با سیمان دوباره فعال شده‌اند. همچنین ترک افقی بزرگی در دیوار بیرونی باربر و دیوار داخلی گچی آن، حادث شده است که نشان از حرکت افقی و نشست خاک بستر در پنجه لغزش دارد. باقی ساختمان‌ها در پنجه لغزش، سالم مانده و خسارت ناچیزی را تجربه کرده‌اند. نمودار d شکل ۷ و تصاویر (i و j) شکل ۸ ساختمان شماره ۶۴ را با ۳۵ میلی‌متر نشست نشان می‌دهد. این ساختمان با اسکلت و فونداسیون بتنی بر روی بخش پایینی پای لغزش واقع شده است و در اثر نشست خاک، پایه‌های بتن آرمه آن کمانش کرده و ترک‌های مورب با زاویه ۴۵ درجه بر دیوارهای آن به وجود آمده است. این نوع از ترک‌ها دلالت بر نشست فونداسیون بتنی منفرد این ساختمان دارد.

در شکل۹، نمودارهای توزیع خسارت نشان می‌دهد که ۷۰ درصد ساختمان‌ها در برابر لغزش دچار خسارت سنگین، بسیار سنگین و تخریب کامل شده‌اند و امکان مرمت و بازسازی آن‌ها وجود ندارد. با توجه به فراوانی سازه‌ها، ساختمان‌های با مصالح بنایی یک طبقه با ۸۱ درصد آسیب و سپس ساختمان‌های بتنی با ۶۰ درصد آسیب بیشترین خسارت را متحمل شده‌اند. این میزان تخریب بیشتر در زون برداشت، بدنه اصلی و داخل پای لغزش به دلیل بالاآمدگی و نشست خاک به وقوع پیوسته است و نشان از افزایش تغییرات در

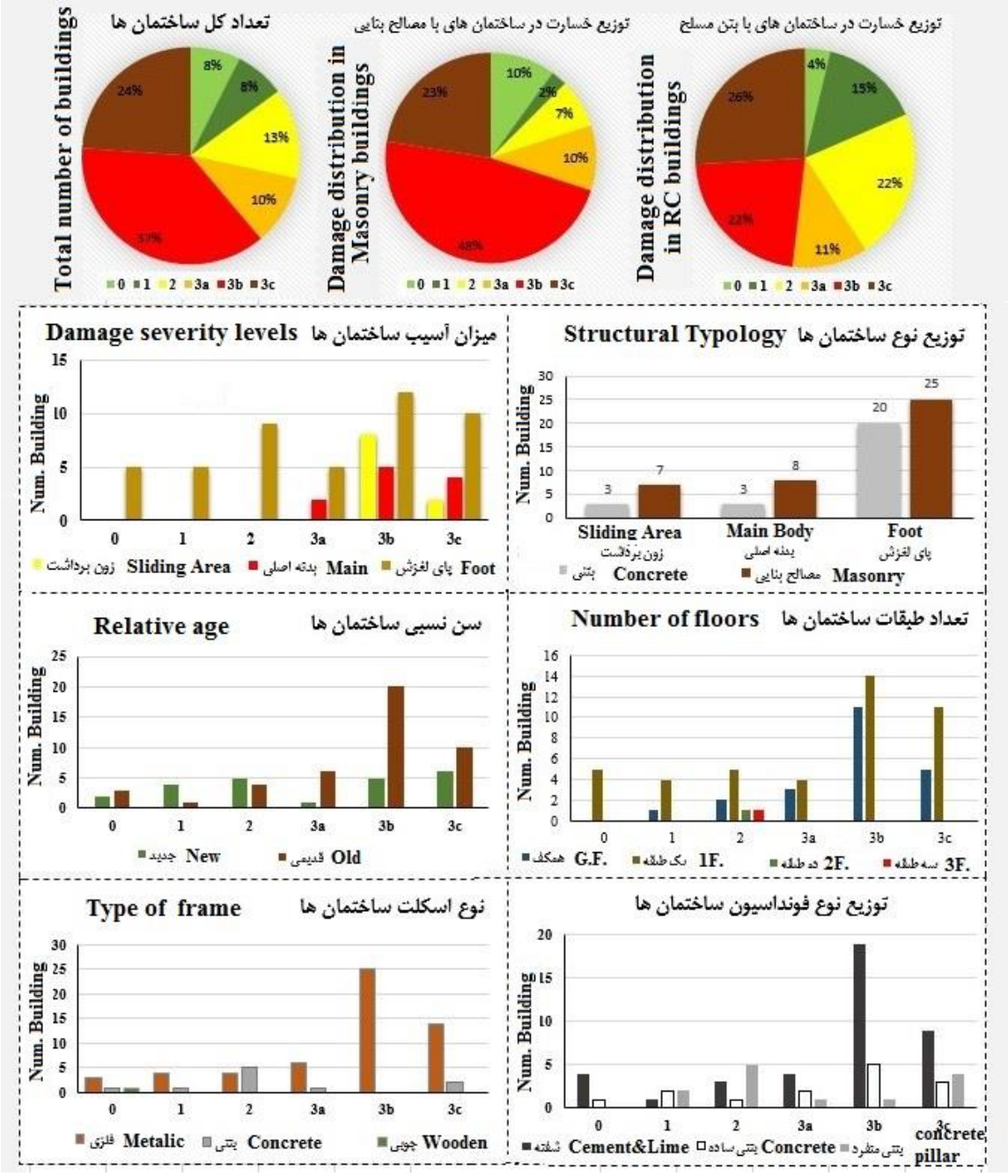
داخل توده اصلی لغزش قدیمی و حرکت مجدد آن به‌صورت لغزش چرخشی در دوره پربارش دارد. ۸ ساختمان یک طبقه، از نوع مصالح بنایی با فونداسیون شفته‌ای، در پنجه و مرز جانبی پایین پای لغزش، بر اساس نقشه حرکت افقی و قائم لغزش و مشاهدات میدانی، حرکت زیادی را ثبت نکرده‌اند و دارای خسارت ناچیز و کم می‌باشند؛ بنابراین دوری از توده اصلی لغزشی بر روی لایه مارنی عمیق در بستر زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد، می‌تواند کاهش خسارت ساختمان‌ها را نشان دهد. همچنین استفاده از مصالح سبک مانند مصالح بنایی، مقاومت ساختمان‌ها را در پای لغزش تضمین می‌کند.

مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با مطالعات مشابه در دیگر نقاط جهان، مؤید کارآمدی ارتباط روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی PSI با ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA) در برابر لغزش را دارد. به‌طوری‌که پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2018)، با مطالعه زمین‌لغزشی در جنوب ایتالیا به این نتیجه رسیدند که اکثر ساختمان‌ها در ناحیه تاج لغزش و در مرزهای جانبی آسیب دیده‌اند و آن‌هایی که در داخل بدنه لغزش قرار دارند الگوی ترک افقی را نشان داده و آسیب کمتری دیده‌اند. همچنین نتایج مطالعات نوتتی و همکاران (Notti et al., 2015)، مشابه این پژوهش بوده و با پایش لغزشی، در منطقه مسکونی-ساحلی در جنوب شرق اسپانیا به این نتیجه رسیدند که در مرزهای جانبی و پنجه لغزش بیشترین آسیب به ساختمان‌ها وارد شده است.



شکل۸ – تصاویر آسیب به ساختمان‌های پهنه لغزشی حسین‌آباد. تصویر (a) ساختمان شماره ۱۱ با میزان خسارت 3C، تصویر (b) ساختمان شماره ۱۶ با میزان خسارت 3B، تصویر (c) ساختمان شماره ۱۸ با میزان خسارت 3C، تصویر (d) ساختمان شماره ۲۲ با میزان خسارت ۲، تصویر (e) ساختمان‌های شماره ۲۸،۲۹ و ۳۰ به ترتیب با میزان خسارت 3B،3B و۲، تصویر (f) ساختمان شماره۴۷ با میزان خسارت 3B، تصویر (g) ساختمان شماره ۶۱ با میزان خسارت 3C، تصویر (h) شماره ۶۵ با میزان خسارت۲، تصویر (i) و (j) ساختمان شماره ۶۴ با میزان خسارت 3C. پیکان قرمزرنگ نیروی فشاری، بالاآمدگی و شکست و پیکان آبی‌رنگ ترک عادی و با زاویه ۴۵ درجه.

Fig.8. Images of damage to buildings in the Hossein abad landslide area. Image (a) shows building number 11 with damage level 3C, image (b) shows building number 16 with damage level 3B, image (c) shows building number 18 with damage level 3C, image (d) shows building number 22 with damage level 2, image (e) shows buildings number 28, 29, and 30 with damage levels 3B, 3B, and 2, respectively, image (f) shows building number 47 with damage level 3B, image (g) shows building number 61 with damage level 3C, image (h) shows building number 65 with damage level 2, and images (i) and (j) show building number 64 with damage level 3C. The red arrows indicate compressive force, uplift, and fracture, while the blue arrows indicate normal cracks with a 45-degree angle.



شکل۹ – نمودارهای دایره‌ای و هیستوگرام توزیع ویژگی‌های ساختاری و جغرافیایی ساختمان‌ها و میزان آسیب آن‌ها

Fig.9. Pie charts and histograms showing the distribution of structural and geographical features of the buildings and their damage levels

۴-نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با یک رویکرد یکپارچه با بهره‌برداری از داده‌های تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی و الگوی آسیب ساختمان‌ها در زون‌های مختلف لغزشی به بررسی رفتار فضایی لغزش قدیمی حسین‌آباد پرداخته است. تکنیک تداخل سنجی راداری InSAR ابزاری قدرتمند برای شناسایی و نظارت بر لغزش‌های قدیمی مدفون در مناطقی که به دلیل تغییر کاربری، پوشش اراضی و سکونت، مرزهای آن مشخص نیست، می‌باشد. همچنین این داده‌ها، پشتیبان مفیدی برای ارزیابی اثرات لغزش بر سازه‌ها می‌باشند. تحلیل تغییرات ساختمان-ها و شواهد میدانی آسیب‌های ثبت شده نیز، نتایج داده‌های راداری را معتبر می‌سازد و ارزیابی خسارت ساختمان‌های موجود بر پهنه لغزش‌های قدیمی به‌عنوان شواهد غیرمستقیم فعالیت لغزش، مفید است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد آسیب‌پذیری یک ساختمان در معرض لغزش را، می‌توان بر اساس نوع سینماتیک لغزش، مقاومت ساختمان و موقعیت ژئومورفولوژی اجزای لغزشی در منطقه آسیب‌دیده، ارزیابی کرد و با توجه به فعالیت مجدد لغزش قدیمی حسین‌آباد می‌توان چنین استنباط کرد که با هر بار حضور عوامل محرکی چون بارش شدید، افزایش سطح آب مخزن سد، زلزله و فعالیت‌های انسانی لغزش قدیمی حسین‌آباد فعال شده و خسارتی سنگین را برای همه ساختمان‌های بتنی و با مصالح بنایی، به بار خواهد آورد و در صورت بازسازی مجدد همواره خسارتی مشابه به وقوع خواهد پیوست و امکان اسکان در این پهنه وجود ندارد.

این روش کاربردی پیشنهادی، در قلمروی ژئومورفولوژی مهندسی قرار گرفته و می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک سیستمی برای تسهیل اقدامات حفاظتی مناسب برای ساختمان‌های در معرض لغزش و ناپایداری معرفی - گردد. در پژوهش‌های آینده می‌توان با پایش بازه زمانی طولانی‌تر، ناپایداری لغزش قدیمی حسین‌آباد و مناطق مجاور را مورد ارزیابی قرار داد و مکانیسم فعالیت مجدد آن‌ها را بررسی نمود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری خانم مهدیه غیور بلورفروشان به راهنمایی اول دکتر سید رضا حسین زاده، راهنمایی دوم دکتر غلامرضا لشکری پور، مشاور اول دکتر مسعود مینائی و مشاور دوم دکتر حکیمه مربی

هروی در دانشگاه فردوسی مشهد است که در ۱۰ مهر ۱۴۰۳ دفاع نهایی شده است. از حمایت‌های انجام شده تشکر و قدردانی می‌شود.

References

Afshari, A., Ghahroudi Tali, M., Sadough, H., & Ehteshami Moin abadi, M. (2020). Assessment slope instability around Lorestan railway by using differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR). *Quantitative Geomorphological Research*, *8*(3), 183-202. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1398.8.3.11.6

Alexander, D. (1986). Landslide damage to buildings. *Environmental Geology and Water Sciences*, *8*(3), 147-151. https://doi.org/10.1007/BF02509902

Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S., & Cakir, Z. (2020). Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French Alps. *Remote Sensing*, *12*(8), 1305. https://doi.org/10.3390/rs12081305

Burland, J. B., Broms, B. B., & De Mello, V. F. (1978). Behaviour of foundations and structures. *Paper presented at the 9th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, 2,495-546 Tokyo, Japan: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *33*, 166-180. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.011

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes, transportation research board, U.S. National Academy of Sciences, *Special Report*, 247: 36-75.

Dykes, A. P., & Bromhead, E. N. (2018). The Vaiont landslide: re-assessment of the evidence leads to rejection of the consensus. *Landslides*, *15*(9), 1815-1832. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0996-y

Entezam, I., Rezaei, A. R., Vakilzade, Y., Mohammadi, Y., & Babazade, N. (2019). *Evaluation and analysis of the Hosein Abad Kalpush landslide.* Report TR040, National Geoscience Database of Iran. [In Persian]

Ferlisi, S., Gullà, G., Nicodemo, G., & Peduto, D. (2019). A multi-scale methodological approach for slow-moving landslide risk mitigation in urban areas, southern Italy. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *4*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s41207-019-0110-4

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(1), 8-20. https://doi.org/10.1109/36.898661

Glade, T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Erde*, *134*(2), 123-146.

Godfrey, A., Ciurean, R. L., Van Westen, C. J., Kingma, N. C., & Glade, T. (2015). Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach–An application in Nehoiu Valley, Romania. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *13*, 229-241. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001

Grünthal, G. (1998). *European macroseismic scale 1998*. Luxembourg: European Seismological Commission (ESC).

Guo, C., Zhang, Y., Li, X., Ren, S., Yang, Z., Wu, R., & Jin, J. (2020). Reactivation of giant Jiangdingya ancient landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China. *Landslides*, *17*, 179-190. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01266-9

Hooper, A., Segall, P. & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis with application to Volcán Alcedo, Galápagos.*Journal of Geophysical Research*, 112. https://doi.org/10.1029/2006JB004763

Infante, D., Di Martire, D., Confuorto, P., Tessitore, S., Tòmas, R., Calcaterra, D., & Ramondini, M. (2019). Assessment of building behavior in slow-moving landslide-affected areas through DInSAR data and structural analysis. *Engineering Structures*, *199*, 109638. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109638

Jian, W., Wang, Z., & Yin, K. (2009). Mechanism of the Anlesi landslide in the three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology*, 108 (1-2), 86–95. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.017

Kappes, M. S., Papathoma-Koehle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, *32*(2), 577-590. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002

Khodaei Geshlag, L., Roostaei, S., Mokhtari, D., & Valizadeh Kamran, K. (2021). Application of the Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) in monitoring and evaluating landslides (case study: Ahar-Varzeghan region). *Journal of Geography and Planning*, *25*(75), 113-126. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gp.2021.10847

Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., ... & Hanssen, R. (2014). PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus. *Procedia Technology*, *16*, 404-413. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.106

Leone, F., Asté, J. P., & Leroi, E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides*, 1,263-270.

Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, *7*, 125-134. https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3

Lu, P., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N. (2014). Quantitative hazard and risk assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry. *Landslides*, *11*, 685-696. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0432-2

Mateos, R. M., Azañón, J. M., Roldán, F. J., Notti, D., Pérez-Peña, V., Galve, J. P., ... & Fernández-Chacón, F. (2017). The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, *14*, 743-754. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0723-5

Nishiguchi, T., Tsuchiya, S., & Imaizumi, F. (2017). Detection and accuracy of landslide movement by InSAR analysis using PALSAR-2 data. *Landslides*, 14, 1483-1490. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0821-z

Notti, D., Galve, J. P., Mateos, R. M., Monserrat, O., Lamas-Fernández, F., Fernández-Chacón, F., ... & Azañón, J. M. (2015). Human-induced coastal landslide reactivation, Monitoring by PSInSAR techniques and urban damage survey (SE Spain). *Landslides*, 12, 1007-1014. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0612-3

Palmisano, F. (2011). *Landslide structural vulnerability of masonry buildings*. PhD Thesis, Italy, Politecnico di Bari.

Palmisano, F., Vitone, C., & Cotecchia, F. (2016). Methodology for landslide damage assessment. *Procedia Engineering*, 161, 511-515. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.679

Palmisano, F., Vitone, C., & Cotecchia, F. (2018). Assessment of landslide damage to buildings at the urban scale. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *32*(4), 04018055. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001201

Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., & Dominey-Howes, D. (2007). Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *7*(6), 765-779. https://doi.org/10.5194/nhess-7-765-2007

Rezapour, A., Jabari, I., & Bahrami, K. (2022). Geomorphological and geological evidences of the old landslide in Mele Kabud. *Quaternary Journal of Iran*, *8*(1, 2), 179-199. [In Persian] https://doi.org/10.22034/irqua.2022.702493

Shirani, K. (2018). Detection, monitoring and mechanism of landslide using persistent scattering ineterferometry (PSI). *Journal of Water and Soil Science*, *22*(3),213-234. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.3.213

Singh, A., Kanungo, D. P., & Pal, S. (2019). Physical vulnerability assessment of buildings exposed to landslides in India. *Natural Hazards*, *96*, 753-790. https://doi.org/10.1007/s11069-018-03568-y

Tang, H. M., Wasowski, J., Juang, C. H. (2019). Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China – Lessons learned from decades of research. *Engineering Geology*, 261, 105267. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267

Tian, J. J., Li, T. T., Pei, X. J., Ding, F., Sun, H., Xie, X. G., & Guo, J. (2022). Formation and reactivation mechanisms of large-scale ancient landslides in the Longwu River basin in the northeast Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1558-1575. https://doi.org/10.1007/s11629-021-7261-x

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3-4), 251-256. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.011

Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65, 167-184. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0

Wolter, A., Stead, D., Ward, B. C., Clague, J. J., & Ghirotti, M. (2016). Engineering geomorphological characterisation of the Vajont Slide, Italy, and a new interpretation of the

chronology and evolution of the landslide. *Landslides*, 13, 1067-1081. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0668-0

Zhang, C., Yin, Y., Dai, Z., Huang, B., Zhang, Z., Jiang, X., Tan, W., & Wang, L. (2021). Reactivation mechanism of a large-scale ancient landslide. *Landslides*, 18, 397-407. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01538-9

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.344-385 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.86899.1466 Open access

The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions（Case Study: Mashhad Township ）

Mehri Jahansoozi[a*], Hossein Farahani [b], Jamshid Einali[b], Behrooz Mohammadi Yeganeh[b]

[a] *PhD Candidate in Geography & Rural Planning, University of Zanjan, Zanjan, Iran*
[b] *Associate Professor in Geography & Rural Planning, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

Received: ***16 February 2024*** ***Revised:*** ***26 May 2024*** ***Accepted:*** ***10 June 2024***

Extended Abstract

Introduction

Over the past few years, the world has faced various climatic anomalies. Climate change poses a significant threat to natural and human systems on a global scale. Natural hazards, as recurring phenomena, can become catastrophic and have devastating impacts in the absence of effective systems to mitigate them. Among natural hazards, drought is one of the most complex, threatening both human life and natural ecosystems. Given the various drought management strategies, the drought risk management approach aims to reduce the loss of life and financial damage caused by droughts. Implementing effective strategies to reduce vulnerability, along with increasing resilience, is considered the primary step in drought risk management.

The key element to improving the condition of rural households during drought conditions is increasing attention to the concept of resilience, which promotes positive adaptation and flexibility in such situations. Social capital is recognized by social science scholars as one of the key components of community resilience. Resilient communities can better cope with shocks, and sudden changes do not disrupt their development to the extent seen in less resilient communities**.** Therefore, development in communities characterized by high levels of social capital and consequently higher resilience is likely to be more sustainable than in communities with lower levels of resilience. Social capital can play an important role in reducing vulnerability to natural disasters and hazards by

[*] .Corresponding author: Mehri Jahansoozi Email: m.jahansoozi@znu.ac.ir Tel:+989194368201

How to cite this Article: Jahansoozi, M., Farahani, H., Einali, J & Mohammadi Yeganeh, B. (2024). The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions, Case Study: Mashhad Township. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 344-385.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

strengthening social systems through cooperation and communication among various organizations, groups, and social networks.
Rural areas in Mashhad Township have been directly and indirectly affected by the impacts of drought. The occurrence of droughts in the region has led to increased vulnerability of rural communities due to their low resilience to this hazard. Therefore, emphasizing rural resilience, where social capital plays a significant role in enhancing it within the framework of drought risk management, is crucial. Since improper drought risk management has been the root of many issues and challenges in the region, enhancing the resilience of rural residents through strengthening social capital plays a critical role in drought risk management. Consequently, this study, relying on social capital, seeks to answer the question of how the social capital and resilience of rural households in Mashhad Township fare against drought. It also investigates how social capital affects the dimensions of household resilience. Therefore, the study first aimed to assess and evaluate the status of social capital and the level of resilience of rural households against drought in Mashhad Township and then to examine the relationship between social capital and the improvement of rural resilience dimensions in Mashhad Township.

Material and Methods

This study is quantitative in nature, with an applied objective, and in terms of data collection, it is a descriptive-correlational research. To gather information, the documentary method was used for the theoretical part, while the survey method, based on field observation and questionnaires, was utilized for the empirical part. Social capital and resilience are measured in various ways. In this study, a set of indicators was used to measure and evaluate resilience and social capital. By reviewing the literature and conducting library studies, 31 items related to social capital were developed within three components, while 79 items in 16 components were designed to evaluate the economic, social, infrastructural, institutional, and environmental dimensions of resilience. The questionnaire items were constructed using a five-point Likert scale**.**
The statistical population of this study consists of 11,706 rural households residing in Mashhad Township. Using the Morgan table, a sample size of 372 households was selected. Multi-stage sampling was employed to ensure representation. The validity (both face and content) of the questionnaire was confirmed by a group of experts in geography and rural planning with experience in similar studies. Additionally, Cronbach's alpha coefficient was used to assess internal consistency among various indicators. After data collection, the results were analyzed using the one-sample T-test, Pearson correlation test**,** and structural equation modeling (SEM). SPSS and AMOS software were employed for data analysis.

Results and Discussion

This study used the T-test to determine the status of social capital components and the resilience components of rural households against drought in the studied Township. The results revealed that rural households in Mashhad Township have a social capital status above average. Therefore, due to all social capital components being above average, it can be concluded that rural households in Mashhad Township are in a relatively good situation in terms of social capital. However, the results also indicate that the **average** resilience index**,**

except for the environmental and physical dimensions, has a score below average, suggesting that the households studied are not in a favorable position in terms of drought resilience.
From the perspective of rural resilience dimensions, environmental and physical resilience have the highest scores**,** while institutional resilience has the lowest**.** The Pearson correlation test results indicate that at a 1% error level, there is a positive and significant relationship between social capital and all dimensions of rural households' resilience to drought. To examine the most influential indicators of social capital on the resilience dimensions of rural households, Structural Equation Modeling (SEM) was utilized. The conceptual model of the research was formed based on the indicators and dimensions of social capital (SCapital) and rural resilience (R).
The results of the standardized model indicate that social capital has a positive effect (0.82 coefficient) on the resilience dimensions of rural households in Mashhad Township against drought. Among the latent factors of social capital, the social networks factor (0.93) played the most significant role in improving the resilience of rural households. Regarding the effects of latent factors of social capital, the greatest impact was observed in the economic dimension of household resilience, while the least impact was related to the physical dimension.

Conclusion

Social capital, as one of the key components of resilience, plays a significant role in improving the various dimensions of resilience in rural communities during drought conditions. Given that individuals and communities increasingly face severe and frequent risks due to climate change, and considering the vulnerability of rural settlements, it can be argued that strengthening social systems and social capital enhances their adaptive capacity and reduces their vulnerability.
Based on the findings of this study and considering the impact of social capital on improving the resilience of rural households, it is recommended that planners and policymakers enhance the resilience of rural households by promoting local grassroots groups with proper government support. Efforts to establish rural organizations such as cooperative funds, microcredit funds, and professional associations are essential. It is also suggested that relevant rural organizations diversify their activities and employ strategies such as forming associations and cooperation groups to ensure broader participation in social fields. Furthermore, increasing farmers' awareness of modern and efficient irrigation methods through suitable training programs is highly recommended.

Keywords: Social Capital, Drought Risk Management,Resilience Dimensions**,** Structural Equation Modeling , Mashhad Township.

Acknowledgments

This paper is extracted from the doctoral dissertation of the first author, Mehri Jahansoozi, in geography and rural planning, University of Zanjan, Zanjan, Iran..

How to cite this Article: Jahansoozi, M., Farahani, H., Einali, J & Mohammadi Yeganeh, B. (2024). The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions, Case Study: Mashhad Township. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 344-385.


©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۳۸۵-۳۴۴ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/geoeh.2024.86899.1466 مقاله پژوهشی

نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی

(مطالعه موردی: شهرستان مشهد)

مهری جهانسوزی[1] – دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

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

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

بهروز محمدی‌یگانه – دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۱/۲۷ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۶ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۳/۲۱

چکیده

امروزه جوامع روستایی بیشترین آسیب را از اثرات خشکسالی دیده‌اند. با توجه به آسیب‌پذیری خانوارهای روستایی توجه به سرمایه اجتماعی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری، می‌تواند بهبود روند برنامه‌ریزی برای توسعه روستایی را تسهیل کند. لذا این پژوهش با هدف کلی بررسی نقش سرمایه اجتماعی در بهبود ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی در سطح شهرستان مشهد انجام گرفت. در این راستا از روش تحقیق پیمایشی با به‌کارگیری پرسشنامه استفاده شده است. جامعه آماری، ۱۱۷۰۶ نفر از خانوارهای روستایی شهرستان مشهد است که بر پایه جدول مورگان، ۳۷۲ خانوار با روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای چندمرحله‌ای با انتساب متناسب انتخاب شد. برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، از مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM)، آزمون t تک نمونه‌ای و همبستگی پیرسون استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد که خانوارهای موردمطالعه از نظر وضعیت سرمایه اجتماعی در وضعیت مطلوبی قرار دارند اما از نظر وضعیت تاب‌آوری در وضعیت مناسبی نیستند. همچنین، نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که بین سرمایه اجتماعی و تمامی ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد. علاوه بر این نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری پژوهش نشان داد که ابعاد سرمایه اجتماعی با ضریب (۰/۸۲) اثر مثبتی بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی شهرستان مشهد دارد. در بین عوامل پنهان سرمایه اجتماعی عامل شبکه‌های اجتماعی (۰/۹۳) بیشترین نقش را در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی ایفا کرده است. همچنین

[1]. نویسنده مسئول: ۰۹۱۹۴۳۶۸۲۰۱

Email: m.jahansoozi86@gmail.com

بیشترین اثر سرمایه اجتماعی مربوط به بعد اقتصادی و کمترین اثر مربوط به بعد کالبدی تاب‌آوری خانوارهای روستایی بوده است.

کلیدواژه‌ها: سرمایه اجتماعی، مدیریت ریسک خشکسالی ،ابعاد تاب‌آوری ،مدل‌سازی معادلات ساختاری ، شهرستان مشهد.

۱- مقدمه

طی چند سال گذشته، جهان شاهد یک سری تغییرات مهم آب‌وهوایی مانند تغییر الگوهای بارندگی، تغییرات دما و افزایش سطح آب دریاها بوده است. گزارش ارزیابی پنجم هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوا (IPCC[1]) پیش‌بینی کرد که این تغییرات در آینده نزدیک، شدیدتر و جدی‌تر شوند (Sertse, Khan, Shah, Liu & Naqvi, 2021). تغییر آب‌وهوا خطراتی را برای سیستم‌های طبیعی و انسانی در مقیاس جهانی ایجاد می‌کند. افزایش فراوانی و بروز سوانح مانند خشکسالی و سیل، مهم‌ترین خطرات مرتبط با تغییرات جهانی هستند(Khan, Qiao, Abid & Gao, 2021). خطرات طبیعی به‌عنوان پدیده تکرار شونده در غیاب سیستم‌های رو به کاهش می‌تواند فاجعه‌بار و اثرات و عواقب مخربی داشته باشد (Wang, Qiao, Wang, Cao & Zhang, 2020). در بین مخاطرات طبیعی، خشکسالی به‌عنوان پیچیده‌ترین مخاطرهٔ طبیعی (Shafeie, Barghi & Ghanbari, 2019)می‌باشد؛ که زندگی انسان و اکوسیستم‌های طبیعی را تهدید می‌کند (Hosseini, Roosta, Zamanipour & Teymouri, 2018) . علاوه بر این، تأثیر پدیده خشکسالی در مناطق روستایی گسترده‌تر است چون می‌تواند منجر به چالش‌های قابل‌توجه در اقتصاد روستایی به‌طورکلی و تولید کشاورزی به‌طور خاص شود (Sharafi, Zarafshani, Keshavarz, Azadi & Van Passel, 2020).

مقابله با خشکسالی بسیار پیچیده است، زیرا ابعاد این خطر به‌طور کامل شناخته نشده است و این یک چالش برای ارزیابی دقیق شروع خشکسالی، مدت‌زمان و وسعت مکانی آن است (Van Loon et al., 2016). با توجه به راهبردهای مختلف مدیریت خشکسالی، رویکرد مدیریت ریسک خشکسالی به‌منظور کاهش تلفات جانی و مالی ناشی از خشکسالی معرفی شده است. به‌کارگیری راهبردهای مؤثر در جهت کاهش آسیب‌پذیری همراه با افزایش تاب‌آوری به‌عنوان اولین گام برای مدیریت خطر خشکسالی در نظر گرفته می‌شود (Nasrnia & Ashktorab, 2021) . بنابراین، عنصر کلیدی بهبود وضعیت خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی توجه روزافزون به مقوله تاب‌آوری است که منعطف کننده سازگاری مثبت و انعطاف‌پذیری در این شرایط است (Savari & Abdeshahi, 2019). به اعتقاد صاحب‌نظران، زیستن در بستر مخاطره‌آمیز طبیعی، لزوماً به معنای خسارت‌بار بودن و آسیب‌پذیری نیست، بلکه فقدان تاب‌آوری و میزان ادراک جوامع از نوع و

1 The Inter-Governmental Panel on Climate Change

شدت مخاطره‌آمیز بودن حوادث طبیعی سبب ایجاد خسارت می‌شود (Zhou, Wang, Wan & Jia, 2010). شدت این اثرات به انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری جوامع بستگی دارد و از جامعه‌ای به جامعه دیگر، از گروهی به گروه دیگر و از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. آسیب‌های وارده بر جوامع انسانی بیانگر فقدان آمادگی و تاب‌آوری در برابر این مخاطره طبیعی و همچنین ناکارآمدی سیستم مدیریت است. برخی از جوامع به دلیل پیشگیری آمادگی بیشتری برای مقابله با خطرات دارند. گاهی اوقات، بسیاری از عملکردهای انسان باعث افزایش اثرات خشکسالی و در نتیجه کاهش تاب‌آوری در برابر آن می‌شود (Javadinejad, Dara & Jafary, 2021).

سرمایه اجتماعی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری جامعه توسط دانشمندان علوم اجتماعی به رسمیت شناخته شده است (Panday, Rushton, Karki, Balen & Barnes, 2021). جوامع تاب‌آور بهتر می‌توانند با شوک‌ها کنار بیایند، تغییرات ناگهانی به اندازه جوامع کمتر تاب‌آور، توسعه آن‌ها را مختل نمی‌کند. ازاین‌رو، توسعه در جوامعی که با سطوح بالای سرمایه اجتماعی و در نتیجه تاب‌آوری بالاتر مشخص می‌شوند، احتمالاً پایدارتر از جوامع با سطوح پایین تاب‌آوری (اجتماعی) است (Minani, Rurema & Lebailly, 2013). هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی (IPCC) در پنجمین گزارش ارزیابی خود، به‌صراحت سرمایه اجتماعی را به‌عنوان دارایی‌ای که ظرفیت سازگاری را تسهیل می‌کند، تصدیق کرد. ازآنجایی‌که افراد و جوامع به‌طور فزاینده‌ای با خطرات شدید و مکرر ناشی از تغییرات آب‌وهوایی مواجه می‌شوند، لازم است بررسی شود که چگونه سرمایه اجتماعی به ظرفیت انطباق آن‌ها کمک می‌کند یا آن را مهار می‌کند. سرمایه اجتماعی می‌تواند به‌ویژه در جوامع روستایی مرتبط باشد، جایی که حمایت‌های رسمی از راه دور یا کم است، و همسایگان اغلب به یکدیگر متکی هستند(Fletcher, Akwen, Hurlbert & Diaz, 2020). با توجه به آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی توجه به سرمایه‌های اجتماعی، می‌تواند بهبود روند برنامه‌ریزی برای توسعه روستایی را تسهیل کند و مشارکت روستاییان در اجرای بهتر برنامه را به همراه داشته باشد. همچنین در تعامل با سایر ابعاد سرمایه‌ها در قالب اعتماد، روابط متقابل، تبادل و همکاری جمعی، نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری روستایی و ارتقای تاب‌آوری اجتماعی، ایفا کند(Sabzehei, Soleimani & Yousefi, 2019). درواقع سرمایه اجتماعی با تقویت سیستم‌های اجتماعی از طریق همکاری و ارتباطات در بین سازمان و گروه‌های مختلف و گروه‌های اجتماعی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری ناشی از سوانح و مخاطرات طبیعی ایفا کند (Fazeli kebria, Shafagat, Bahmani & Karimi, 2021).

بیش از ۸۰ درصد کشور ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر (میلی‌متر) است که کمتر از یک‌سوم متوسط بارندگی سالانه جهانی است. بر اساس

پیش‌بینی‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) دمای هوا تا سال ۲۱۰۰ بین ۱/۵ تا ۴ درجه افزایش می‌یابد و میزان بارندگی بسته به مناطق مختلف ایران بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد (Javadi, Ghahremanzadeh, Sassi, Javanbakht & Hayati, 2023). کشور ما در طول دهه‌های گذشته، خشکسالی‌های گسترده و شدید بیش از ۳۰ سال را تجربه کرده است. در سال‌های اخیر خسارات ناشی از پدیده خشکسالی نیز در استان خراسان رضوی، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک آن افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. براساس شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده[1](SPEI)، در یک دوره ۱۰ ساله تا پایان دی ماه سال ۱۴۰۰، ۰/۱ درصد از مساحت استان خراسان رضوی دچار ترسالی شدید، ۰/۴ درصد دچار ترسالی متوسط، ۱/۵ درصد دچار ترسالی ضعیف، ۱۰/۳ درصد در حد نرمال، ۷/۲ درصد دچار خشکسالی خفیف، ۳۱/۱ درصد دچار خشکسالی متوسط، ۲۵/۶ درصد دچار خشکسالی شدید می‌باشد. در مجموع در یک دوره ده ساله، ۸۷/۷ درصد استان خراسان رضوی را خشکسالی در بر گرفته است. در همین رابطه ۸۹/۸ درصد از شهرستان مشهد نیز دچار خشکسالی شده است (National Meteorological Organization, 2021). روستاهای شهرستان مشهد به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر اثرات خشکسالی قرار داشته‌اند. به‌نحوی‌که این روستاها در طی دو دهه اخیر با کاهش کمی و کیفی تولیدات کشاورزی و محصولات زراعی به دلایل مختلف ازجمله (تغییر در الگوی بارش، الگوی سرما، کمبود آب و خشکسالی، شیوع و گسترش آفات و بیماری‌های مختلف و...)، کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی، بروز ناهنجاری‌های اجتماعی و غیره مواجه بوده‌اند. وقوع خشکسالی در منطقه منجر به افزایش آسیب‌پذیری جوامع روستایی شده است، که این موضوع ناشی از پایین بودن سطح تاب‌آوری آن‌ها در برابر این مخاطره می‌باشد. ازاین‌رو توجه و اهتمام به تاب‌آوری روستایی که سرمایه اجتماعی نقش والایی در بهبود آن در راستای مدیریت ریسک خشکسالی ایفا می‌کند و ازآنجایی‌که عدم مدیریت صحیح مخاطره خشکسالی ریشه بسیاری از مسائل و مشکلات در منطقه بوده است لذا تاب‌آوری روستاییان از طریق تقویت سرمایه اجتماعی که مؤلفه کلیدی تاب‌آوری روستایی می‌باشد، نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در راستای مدیریت ریسک خشکسالی ایفا می‌کند. ازاین‌رو پژوهش حاضر با تکیه بر سرمایه اجتماعی در پی پاسخ به این سؤال است که میزان سرمایه اجتماعی و تاب‌آوری خانوارهای روستایی شهرستان مشهد در برابر خشکسالی چگونه است؟ و سرمایه‌های اجتماعی چه تأثیری بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی می‌گذارد؟ بنابراین ابتدا سعی شد وضعیت سرمایه‌های اجتماعی و میزان تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی در سطح شهرستان مشهد موردسنجش و ارزیابی قرار گیرد و سپس ارتباط بین سرمایه اجتماعی و بهبود ابعاد تاب‌آوری روستایی شهرستان مشهد بررسی گردد.

تاب‌آوری که از علوم فیزیکی سرچشمه می‌گیرد برای توصیف ظرفیت مواد یا سیستم‌ها برای بازگشت به حالت عادی یا تعادل خود پس از جابجایی استفاده می‌شود. در استفاده اصلی از این اصطلاح، به یک ماده

1 Standardized Precipitation Evaoptranspiration Index (SPEI)

گفته می‌شود که در هنگام خم شدن و برگشتن به جای شکستن در هنگام قرار گرفتن در معرض استرس، انعطاف‌پذیر است یا انعطاف‌پذیری دارد(Mngumi, 2021). واژه تاب‌آوری (Resiliense) نشأت گرفته از واژه لاتین Resilire به معنی جهش کردن یا به جای اول برگشتن است. هالینگ[1] در سال ۱۹۷۳ این واژه را برای توصیف ظرفیت یک اکوسیستم طبیعی استفاده کرد (Rus, Kilar & Koren, 2018). هالینگ تاب‌آوری را به‌عنوان «معیار تداوم سیستم‌ها و توانایی آن‌ها برای جذب تغییر و اختلال و همچنان حفظ همان رابطه بین متغیرهای جمعیت یا دولت» (Feldmeyer et al., 2019) توصیف کرد. گیلارد[2] (۲۰۱۰) اشاره می‌کند که تاب‌آوری از ادبیات مربوط به بلایای طبیعی و آب‌وهوا در دهه ۷۰ پدیدار شد و در همان دهه، استفاده از آن توسط بوم‌شناسی، روانشناسی و مهندسی نیز پذیرفته شد (Córdoba Vargas, Hortúa Romero & León Sicard, 2020). بعد از هالینگ در سال ۱۹۷۳ در مورد تاب‌آوری سپس ادگر[3] (۲۰۰۰) در نظام‌های اجتماعی، کارپنتر[4] (۲۰۰۱) در نظام‌های انسانی _محیطی، بریکس[5] (۲۰۰۳) در نظام‌های اجتماعی_ اکولوژیک، برنئو[6] (۲۰۰۳) در مدیریت سوانح کوتاه‌مدت و تیرمن[7] (۱۹۸۱) در پدیده‌های بلندمدت مانند تغییرات اقلیمی به کار گرفتند(Shokri Firoozjah, 2017). درحالی‌که این مفهوم در بسیاری از زمینه‌ها از اکولوژی گرفته تا روانشناسی رواج یافته است، در سال‌های اخیر به مفهومی برجسته در فرهنگ لغات سازگاری با تغییرات آب‌وهوایی، مدیریت ریسک بلایا و توسعه پایدار تبدیل شده است(Tiernan et al., 2019). هدف نهایی تاب‌آوری کمک به توضیح نحوه برخورد جامعه انسانی با تغییرات و خطرات در یک سیستم اجتماعی و بوم‌شناختی به‌هم‌پیوسته و ایجاد ظرفیت‌های سازگار برای مقابله با تغییرات است (Endris, Kibwika, Hassan & Obaa, 2017). تاب‌آوری در یک منطقه نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری برای سازگاری، بازیابی و بازسازی است (Nasrnia & Ashktorab, 2021). تاب‌آوری، ظرفیت و توانایی مقابله با استرس و فشار را افزایش می‌دهد و یک راه‌حل متضاد برای آسیب‌پذیری محسوب می‌شود(Javadinejad et al., 2021). تاب‌آوری به‌عنوان توانایی یک سیستم، جامعه یا جامعه در معرض شوک‌ها/اختلالات با شروع آهسته یا سریع برای مقاومت، جذب، تطبیق و بازیابی از شوک‌ها / اختلالات، ازجمله از طریق حفظ و بازسازی ساختارها و عملکردهای اساسی آن شناخته می‌شود(Kim & Marcouiller, 2021).

1 Holling
2. Gaillard
3. Adger
4. carpenter
5. Berkes
6. Bruneau
7. Timmerman

هیجمن و همکاران(Heijman, Hagelaar & Heide, 2019) با توسعه مفهومی تاب‌آوری روستایی در برابر بحران، ازجمله پیشگامان توسعه مفهومی تاب‌آوری روستایی می‌باشند. ایده مذکور بر این پایه که سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی روستایی به‌طور فزاینده‌ای پیچیده بوده و در ارتباط متقابل با یکدیگر می‌باشند، بیان شده است. بااین‌حال، تعریف رایج این مفهوم، ظرفیت یک قلمرو روستایی برای انطباق با شرایط مختلف داخلی یا خارجی با حفظ استانداردهای زندگی قابل‌قبول است. همانند تاب‌آوری شهری، تاب‌آوری روستایی میزانی را تعریف می‌کند که یک منطقه روستایی خاص می‌تواند پس از تغییر، پیش از ایجاد مجموعه‌ای از فرآیندها و ساختارهای جدید، تعدیل را پس از تغییر انجام دهد (Aboushalaa & Ismaila, 2022). تاب‌آوری در جوامع روستایی نسبت به جوامع شهری دارای تفاوت‌های بارزی می‌باشد. جوامع روستایی از دیدگاه مسائل جمعیت‌شناختی، ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی و اهداف زندگی، تفاوت‌های قابل‌توجهی با سایر جوامع دارند(Mehra, 2018). تاب‌آوری همچنین ممکن است به‌عنوان میزانی که مناطق روستایی می‌توانند به‌طور هم‌زمان بین اکوسیستم و سیستم‌های اقتصادی و فرهنگی خود به ثبات دست یابند اندازه‌گیری شود. به‌عبارت‌دیگر، چشم‌انداز تاب‌آوری روستایی متکی بر قابلیتی است که یک منطقه روستایی باید با نقاط قوت و ضعف اقتصادی، فرهنگی و اکولوژیکی خود هماهنگ شود. برای دستیابی به این هدف، این سه سیستم(یعنی بوم‌شناختی، اقتصادی و فرهنگی) باید یکپارچه شوند و تعامل بین آن‌ها در شدت و مقیاس افزایش یابد. ازاین‌رو، این مفاهیم باید به‌عنوان دارای همپوشانی و نه محتوای مجزا در نظر گرفته شوند(Aboushalaa & Ismaila, 2022).

عوامل بسیاری در ارتقای تاب‌آوری معیشت خانوارهای روستایی دخیل هستند. یکی از مهم‌ترین عوامل، وجود شبکه‌های اجتماعی و سرمایه اجتماعی در بین جوامع آسیب دیده در شرایط خشکسالی است. لذا به‌منظور دستیابی به تاب‌آوری مناسب در مدیریت خشکسالی نیاز به برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه اجتماعی و حفظ انسجام اجتماعی است(Savari & Abdeshahi, 2019). سرمایه اجتماعی یک مفهوم شناخته شده و پرکاربرد در علوم اجتماعی است، اما کاربردهای آن در تحقیقات تغییرات آب‌وهوایی محدود است (Fletcher et al., 2020). درحالی‌که برخی از محققان پیشنهاد می‌کنند که یافته‌های تحقیقات اولیه در مورد مخاطرات با مدل یکپارچه نظریه سرمایه اجتماعی مطابقت دارد. استفاده صریح از سرمایه اجتماعی تا اواخر دهه ۱۹۹۰ عملاً در تحقیقات بلایا وجود نداشت(Ritchie, 2004). هنگامی‌که تئوری سرمایه اجتماعی اجرا می‌شود، اغلب در موقعیت‌های بازیابی پس از بلایای طبیعی به کار گرفته می‌شود و همچنین برای استفاده به‌عنوان یک چارچوب یکپارچه گسترده موردبحث قرار گرفته است. در دو دهه گذشته، ادغام این طرح‌واره مفهومی به‌عنوان وسیله‌ای برای درک ویژگی‌های پویایی‌های اجتماعی رابطه‌ای و اینکه چگونه این روابط منجر به نتایج خاصی قبل، حین و بعد از یک فاجعه می‌شود، افزایش یافته است (Ritchie & Gill, 2018 ; Meyer,

(2018. بااین‌حال، توجه بسیار کمی به استفاده از نظریه سرمایه اجتماعی به‌عنوان وسیله‌ای برای شناسایی آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری قبل از بلایا به‌ویژه در مراحل آمادگی و کاهش چرخه مدیریت بلایا شده است. همچنین نظریه سرمایه اجتماعی به‌عنوان رویکردی عمل می‌کند که از طریق آن می‌توان رابطه بین آسیب‌پذیری و تاب‌آوری و اینکه چگونه می‌توان این دو مفهوم را در یک زمینه اجتماعی قبل از یک رویداد خطرناک اندازه‌گیری کرد، عمل می‌کند (Straub, Gray, Ritchie & Gill, 2020).

اولین استفاده از اصطلاح سرمایه اجتماعی توسط هانیفان[1] (۱۹۱۶) بود که آن را به‌عنوان «خیرخواهی، همراهی، همدردی و روابط اجتماعی در میان افراد و خانواده‌هایی که یک واحد اجتماعی را تشکیل می‌دهند» توصیف کرد. بوردیو[2] (۱۹۸۵) سرمایه اجتماعی را به‌عنوان یکی از چهار نوع سرمایه به همراه سرمایه اقتصادی، فرهنگی و نمادین تعریف می‌کند که مجموعاً مسیرهای زندگی اجتماعی را تعیین می‌کنند. در تعریف وی، سـرمایه اجتماعی مجموع منابع واقعی یا بالقوه است که با مالکیت شبکه‌ای بادوام و شناخت متقابل از روابط کم‌وبیش نهادینه شده است (Aldrich & Meyer, 2015). بوردیو در اینجا بر ضرورت تراکم و دوام پیوندها تأکید می‌ورزد و سرمایه اجتماعی را انبوهی از منابع بالفعل یا بالقوه‌ای می‌داند که به مالکیت یک شبکه‌ای دوام‌دار متصل‌اند (Sabzehei et al., 2019). نظریه کلمن[3] درباره سرمایه اجتماعی براساس نظریه عقلانی است که براساس رفتارها از تعقیب افراد برای سودشان سرچشمه می‌گیرد. از نگاه کلمن تعامل اجتماعی شکلی از مبادله و وسیله‌ای برای همکاری و تعاون افراد با یکدیگر به‌منظور کسب سود است. نزد کلمن سرمایه اجتماعی با کارکردش تعریف می‌شود. سرمایه اجتماعی شیئی واحد نیست، بلکه انواع چیزهای گوناگونی است که دو ویژگی مشترک دارند: همه آن‌ها شامل جنبه‌ای از یک ساخت اجتماعی هستند و کنش‌های معین افرادی را که در درون ساختار هستند، تسهیل می‌کنند. به نظر کلمن سازمان اجتماعی باعث به وجود آمدن سرمایه اجتماعی می‌شود و دستیابی به هدف‌هایی را که در نبود آن نمی‌توانست به دست آید یا با هزینه زیادتری ممکن بود به دست آید، تسهیل می‌کند(Sharifian-Sani, 2002). از دیدگاه پاتنام (Potnam, 2007) سرمایه اجتماعی وجوه گوناگون سازمان اجتماعی نظیر اعتماد، هنجارها و شبکه‌هاست که می‌توانند با تسهیل اقدامات هماهنگ، کارایی جامعه را بهبود بخشند. سرمایه اجتماعی همانند سایر سرمایه‌ها مولد است و امکان دستیابی به اهداف مشخص را فراهم می‌کند. وجوه گوناگون سازمان اجتماعی از دیدگاه پاتنام شامل شبکه‌های رسمی و غیررسمی ارتباطات و مبادلات اجتماعی، هنجارهای معامله متقابل، اعتماد اجتماعی ناشی از دو منبع یعنی هنجارهای معامله متقابل و شبکه‌های مشارکت مدنی می‌داند. از نظر پاتنام اعتماد، همکاری

1 Hanifan
2 Bourdieu
3 Coleman

را تسهیل می‌کند و همکاری نیز اعتماد را ایجاد می‌کند. به‌این‌ترتیب هرچه سرمایه اجتماعی بیشتر استفاده شود به جای استهلاک و کاهش، بیشتر خواهد شد. از نظر پاتنام هرچه تعامل میان افراد بیشتر باشد، آن‌ها اطلاعات بیشتری درباره یکدیگر به دست آورده و انگیزه‌های بیشتری برای اعتماد پیدا می‌کنند (Sabzehei et al., 2019). فوکویاما سرمایه اجتماعی را به‌مثابه مجموعه معینی از هنجارها یا ارزش‌های غیررسمی تعریف می‌کند که اعضای گروهی که همکاری و تعاون میانشان مجاز است، در آن سهیم هستند. مشارکت در ارزش‌ها و هنجارها به‌خودی‌خود باعث تولید سرمایه اجتماعی نمی‌گردد، زیرا ممکن است ارزش‌ها منفی باشند. هنجارهایی که تولید سرمایه اجتماعی می‌کنند، اساساً باید شامل فضایلی از قبیل صداقت، ادای تعهد و ارتباطات دوجانبه باشند(Fukuyama, 2001). سرمایه اجتماعی بازده سرمایه‌گذاری در سرمایه فیزیکی و انسانی را افزایش می‌دهد (Wang, Zhang, Xu, Ruan & Tang, 2021). به‌عبارتی‌دیگر با عضویت در یک گروه که هر یک اعضای آن پشتوانه سرمایه جمعی را فراهم می‌کند مرتبط است(Tippens, 2020). به‌طورکلی، سرمایه اجتماعی به روابط اجتماعی، شبکه‌ها و ارتباطات بین افراد اشاره دارد که با هم شکلی از سرمایه را تشکیل می‌دهند، منبع یا دارایی که در صورت نیاز باید از آن استفاده کرد.

مؤلفه‌های کلیدی سرمایه اجتماعی شامل روابط اعتماد، همبستگی، تعامل متقابل، و هنجارها یا ارزش‌های مشترک است. سرمایه اجتماعی ممکن است برای چالش‌هایی که فراتر از ظرفیت خود فرد است، حمایت اساسی کند، و همچنین می‌تواند اقدام جمعی را تسهیل کند؛ اما برعکس، سرمایه اجتماعی ممکن است روابط قدرت را تقویت کند و دسترسی افراد یا گروه‌های خاصی را مسدود کند(Fletcher et al., 2020). برخی از محققین معتقدند که سرمایه اجتماعی روستائیان را می‌توان به سه بعد تقسیم کرد: شبکه اجتماعی، اعتماد اجتماعی و مشارکت اجتماعی(Wang et al., 2021).

شبکه اجتماعی: به جامعه‌ای از نوع رابطه‌ای اطلاق می‌شود که در میان خانوارهای روستایی شکل می‌گیرد، مانند اقوام، هم‌وطنان، دوستان و غیره. افراد می‌توانند از طریق روابط خونی، خویشاوندی، مشاغل، علایق و کانال‌های دیگر شبکه‌های ارتباطی مختلفی تشکیل دهند. درعین‌حال شبکه‌های اجتماعی حامل مهمی از سرمایه اجتماعی است و تحقق ارزش سرمایه اجتماعی باید مبتنی بر شبکه‌های اجتماعی باشد. اعضای اجتماعی می‌توانند از طریق شبکه ارتباطی احساس هویت و تعلق ایجاد کنند و سپس به دلیل تعامل اعضا، مسئولیت اجتماعی را افزایش دهند. روابط اجتماعی نزدیک بین روستاییان می‌تواند دسترسی به اطلاعات را گسترش دهد و هزینه انتشار اطلاعات را کاهش دهد(Wang et al., 2021). تحقیق انجام شده توسط مور و همکاران (۲۰۱۳) بر اساس ۱۰ کشور، نشان می‌دهد که شبکه‌های اجتماعی برای ایجاد انعطاف‌پذیری در جوامع اهمیت زیادی دارند(Moore, Chandra & Feeney, 2013). یکی از مهم‌ترین شکل‌های شبکه‌های اجتماعی، شبکه‌های روابط خانوادگی است. زنان و مردان و به‌طورکلی خانوارها در نظام بهره‌برداری دهقانی

با اجتماعات و شبکه‌های اجتماعی روستایی مرتبط هستند لذا سرمایه اجتماعی بر تاب‌آوری مدیریت مزارع خانوارها در شرایط خشکسالی تأثیر مثبت می‌گذارد (Savari & Abdeshahi, 2019).

اعتماد اجتماعی: رابطه اعتماد بین فردی است که در یک جامعه رابطه‌ای شکل می‌گیرد و این شناخت اعتمادی است که توسط کشاورزان در ارتباطات مداوم طولانی‌مدت شکل می‌گیرد. اعتماد اجتماعی روستاییان در دو جنبه منعکس می‌شود: یکی اعتماد اجتماعی در بین ساکنان، به‌عنوان‌مثال اعتماد می‌تواند درک کشاورزان از خطرات را در آینده کاهش دهد(Liu & Yang, 2020b) و فعالیت‌های داوطلبانه را ترویج کند؛ دیگری اعتماد بین ساکنان، کادرهای روستا و سازمان‌های مردمی است. در ارتباطات بین فردی اعتماد می‌تواند فاصله بین افراد را کوتاه کند و شعاع اعتماد فردی را گسترش دهد(Liu et al., 2020a). از دیدگاه مورنو و همکاران(Moreno, Lara & Torres, 2019) عواملی که بر تاب‌آوری جامعه تأثیر می‌گذارد عبارتند از: رهبری، کارآیی جمعی، آمادگی، دلبستگی به مکان و اعتماد اجتماعی

مشارکت اجتماعی: به مشارکت کشاورزان در امور عمومی روستایی اطلاق می‌شود. خانوارهای روستایی در یک جامعه روستایی مشترک با شناخت هویت، ارزش‌ها و مفاهیم عاطفی یکسان همزیستی می‌کنند و ثروت و بدبختی را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند(Wang et al., 2021). کولز و باکل (Coles & Buckle, 2004) خاطر نشان کردند که تاب‌آوری و تاب‌آوری جامعه و توانایی بازیابی دارای ویژگی‌های چند بعدی است. فقط افراد متأثر از بلایا توانایی، دانش، مهارت‌ها و کانال‌های مشارکت را دارند که مشارکت آن‌ها را در ایجاد انعطاف‌پذیری جامعه معنادار و مؤثر می‌کند. کاکو و ماینر(Kako & Mayner, 2019) انسجام اجتماعی و مشارکت در فعالیت‌های اجتماعی را در تاب‌آوری مؤثر می‌دانند.

یکی دیگر از جنبه‌های بسیار اساسی در مطالعات مرتبط با تاب‌آوری و اجتماعات تاب‌آور در برابر مخاطرات طبیعی، دست پیدا کردن به شیوه‌ی مناسب از سنجش میزان تاب‌آوری است. دراین زمینه مدل‌های زیادی جهت سنجش میزان تاب‌آوری جوامع برای کاهش آسیب‌پذیری در مقابل پیامدهای مخاطرات ازجمله مدل توبین (۱۹۹۹)، مدل خطی- زمانی دیویس (۲۰۰۶)، مدل معیشت پایدار، مدل سرمایه‌محور، مدل مکانی (DROP) و مدل شاخص مبنا (BRIC) مطرح است. در این پژوهش تأکید بر مدل سرمایه‌محور مبتنی بر سرمایه‌های اجتماعی می‌باشد. مدل سرمایه‌محور به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری جامعه در برابر بلایا مبتنی بر انواع سرمایه (اجتماعی، اقتصادی، فیزیکی، انسانی و طبیعی) مطرح شده است. در این مدل، هر یک از انواع سرمایه می‌تواند به کمک دیگر عوامل برای ارزیابی تاب‌آوری جوامع در برابر مخاطرات اندازه-گیری شود. سرمایه‌ها شامل عناصری هستند که برای توسعه اقتصادی جوامع ضروری است و هر چقدر

میزان فرصت‌های اقتصادی جوامع بیشتر باشد، توانایی و ظرفیت بالقوه جامعه جهت کاهش اثرات زیانبار مخاطرات بیشتر می‌گردد. علاوه بر این در شاخص‌سازی سرمایه اجتماعی، دیدگاه رابرت پاتنام مبنای کار گرفته است. وی سرمایه اجتماعی را جنبه‌هایی از سازمان اجتماعی که هماهنگی و همکاری بین افراد را جهت نیل به منافع مشترک تسهیل می‌کند تعریف می‌نماید. این جنبه‌های سازمانی را می‌توان در بعد اعتماد و قابلیت اعتماد، هنجارها و شبکه‌ها موردتوجه قرار داد.

تحقیقات متعددی در داخل و خارج از کشور در رابطه با سرمایه اجتماعی و تاب‌آوری انجام شده است. کالدول و بوید(Caldwell & Boyd, 2009). در تحقیقی با عنوان «مواجهه و تاب‌آوری خانواده‌های کشاورز در معرض خشکسالی» در جنوب نیوساوث ولز استرالیا به این نتایج رسیدند که خشکسالی مهم‌ترین مخاطره زیست‌محیطی این منطقه است و جوامع محلی راهبردهای متنوعی را در مواجهه با آن به کار می‌گیرند. علاوه بر این، دولت باید اهمیت سرمایه اجتماعی را به‌عنوان یک منبع مقابله‌ای که خانواده‌های کشاورز را قادر می‌سازد تا با شرایط خشکسالی در آینده سازگار شوند، به رسمیت بشناسد. درحالی‌که حمایت‌های دولتی با ایجاد زیرساخت‌ها، نقش به سزایی در تقویت تاب‌آوری جوامع محلی دارد. یاماموا (Yamamura, 2010) میزان تأثیر سرمایه اجتماعی بر آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی را موردمطالعه قرار داد. این مطالعه همچنین بررسی کرد که آیا تجربه یک بلایای طبیعی بر حفاظت فردی و جمعی در برابر بلایای آینده تأثیر می‌گذارد یا خیر. سه یافته عمده وجود دارد: (۱) سرمایه اجتماعی خسارات ناشی از بلایای طبیعی را کاهش می‌دهد، (۲) خطر بلایای طبیعی باعث می‌شود مردم تمایل بیشتری به همکاری داشته باشند و بنابراین، سرمایه اجتماعی برای پیشگیری از بلایا مؤثرتر است، و (۳) درآمد یک عامل مهم برای کاهش خسارت است، اما زمانی که مقیاس یک فاجعه کوچک است به‌سختی بر آن تأثیر می‌گذارد. آلدریچ(Aldrich, 2012) نقش حیاتی سرمایه اجتماعی را در بهبود جامعه پس از یک فاجعه بررسی کرد. این مطالعه نشان داد که جوامعی که از سرمایه اجتماعی بالایی برخوردارند می‌توانند از تعداد قربانیان مهاجرت و منابع ارزشمند خارج از منطقه بکاهند. علاوه بر این، این امر به انتشار سریع اطلاعات، کمک‌های مالی و فیزیکی در جوامع آسیب دیده کمک کرد.

کاریکو و همکاران(Carrico, Truelove & Williams, 2019) در پژوهشی با عنوان «سرمایه اجتماعی و انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی در میان کشاورزان خرده‌مالک در سریلانکا» جهت بررسی رابطه بین معیارهای سطح فردی سرمایه اجتماعی شناختی و ساختاری اندازه‌گیری شده قبل از تأثیر خشکسالی از داده‌های نظرسنجی ۲۲۵ کشاورز خرده‌مالک برنج در سریلانکا استفاده کردند. همچنین بررسی کردند که آیا عضویت در گروه‌های کمتر قدرتمند(کشاورزان بی‌زمین، زن و فقیر) رابطه بین سرمایه اجتماعی و نتایج معیشت را تعدیل می‌کند. و به این نتایج دست یافتند که سطوح بالاتر انسجام اجتماعی ادراک شده (معیاری

برای سرمایه اجتماعی شناختی) با عملکرد ضعیف‌تری برای کشاورزان زن و بی‌زمین همراه بود. بااین‌حال، بازده کشاورزان مرد و صاحب زمین ارتباطی با انسجام اجتماعی درک شده نداشت. به همین ترتیب، کشاورزان بدون زمین با سطوح بالاتر مشارکت اجتماعی(شکلی از سرمایه اجتماعی ساختاری) به دلیل خشکسالی، میزان درآمد از دست رفته بالاتری را تجربه کردند. همچنین یافته‌های آنان حاکی از این است که رابطه بین سرمایه اجتماعی و تاب‌آوری برای اعضای مختلف جامعه متفاوت عمل می‌کند.

پژوهان و همکاران(Pazhuhan et al., 2023) در پژوهشی با عنوان «تأثیر سرمایه اجتماعی بر تاب‌آوری جوامع سیل‌خیز: مطالعه موردی شمال ایران» به این نتیجه دست یافتند سرمایه پیوندی تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت تاب‌آوری جامعه دارد. همچنین برخی از معیارهای سرمایه اجتماعی ازجمله رعایت حقوق همسایگان، وجود فضای سبز عمومی، زمین بازی کودکان و کاشت درختان مهم‌ترین معیار در توسعه ظرفیت‌های افزایش تاب‌آوری در بین ساکنان جامعه موردمطالعه است. شاه و همکاران(Shah, Khan, Ullah, Khan & Alotaibi, 2024) در پژوهشی تحت عنوان «نقش سرمایه اجتماعی به‌عنوان یک بازیگر کلیدی در درک و انتشار خطر بلایا: جوامع روستایی پاکستان» به بررسی نقش سرمایه اجتماعی در تسهیل درک و انتشار هشدارهای خطر در مورد خطرات سیل پرداختند. یافته‌های پژوهش آنان چهار موضوع اصلی را نشان داد: تفسیر و انتشار پیام‌های ریسک از طریق شبکه‌های اجتماعی، نقش ارتباطات خدمات اجتماعی جامعه در دسترسی به سرمایه اجتماعی و اطلاعات ریسک، پیامدهای منفی توزیع نادرست سرمایه اجتماعی و محدودیت‌های ارتباط اجتماعی. همچنین نتایج آنان حاکی از این است که بسیاری از افرادی که تحت تأثیر خطر سیل قرار گرفته‌اند به شبکه‌های اجتماعی قوی دسترسی ندارند. و این امر ممکن است مانع از توانایی آن‌ها برای به دست آوردن و درک اطلاعات در مورد خطرات احتمالی شود.

در تحقیقات داخلی قربانی و همکاران (Ghorbani, Avazpour & Yoosefi, 2015) در پژوهشی به «تحلیل و ارزیابی سرمایه اجتماعی در راستای تقویت تاب‌آوری جوامع محلی مدیریت پایدار سرزمین منطقه موردمطالعه استان خراسان جنوبی پروژه بین‌المللی (RFLDL)» پرداختند. نتایج آنان حاکی از این است میزان اعتماد، مشارکت، انسجام و سرمایه اجتماعی متوسط قبل از اجرای پروژه RFLDL بود، ولی پس از اجرای این پروژه میزان این شاخص‌ها افزایش یافت و به حد مطلوبی رسید. سرعت گردش و تبادل اعتماد و مشارکت در میان افراد بعد از اجرای طرح نسبت به قبل از اجرای آن افزایش یافت و اجرای طرح اتحاد و یگانگی را در میان افراد افزایش داد. درنهایت اجرای این پروژه میزان اعتماد، مشارکت و سرمایه اجتماعی را افزایش داد؛ بدون تردید سیستم‌های اجتماعی تاب‌آور از میزان اعتماد بسیار زیادی برخوردارند. سالاری و همکاران(Salari, Hamidian & Nasri, 2016) به «تحلیل شبکه ذی‌نفعان محلی در راستای تقویت تاب‌آوری و

مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی» پرداخته‌اند. مطابق نتایج به دست آمده تقویت اعتماد و مشارکت در بین افراد و پایبندی آن‌ها به عرف و سنت‌ها محلی می‌تواند منجر به افزایش سرمایه اجتماعی و در نتیجه تاب‌آوری جامعه در برابر تنش‌های محیطی در راستای مدیریت پایدار اکوسیستم‌های طبیعی شود.

عوض‌پور(Avazpour, 2016) به بررسی «نقش سرمایه اجتماعی در ارتقاء تاب‌آوری بهره‌برداران در مواجه با گرایش منفی وضعیت مراتع (منطقه موردمطالعه: منطقه کالپوش، شهرستان میامی، استان سمنان)» پرداخته است. نتایج آنان حاکی از این است که افزایش میزان سرمایه اجتماعی بهره‌برداران موجب استقرار مدیریت مشارکتی و از سوی دیگر، موجب ارتقای تاب‌آوری این افراد در مواجهه با بحران‌های پیش‌روی می‌شود. عزمی و نوری(Azmi & Nouri, 2017) در پژوهشی با عنوان «نقش سرمایه اجتماعی در مدیریت مخاطره‌های طبیعی در سکونتگاه‌های روستایی با مطالعه موردی بخش ماهیدشت کرمانشاه» نتیجه‌گیری کرده‌اند که سرمایه اجتماعی تأثیر زیادی بر مدیریت مخاطره‌های طبیعی داشته و با توجه به این که سرمایه اجتماعی سبب افزایش مشارکت، اعتماد و پررنگ شدن نقش نهادهای محلی می‌شود، لذا با مدیریت محلی مخاطره‌های محلی و کاهش آثار مخرب آن منجر می‌شود ملکان و همکاران (Malekan, Khani, Motiee Langroodi & Darban Astaneh, 2020) در پژوهشی با عنوان «نقش سرمایه اجتماعی بر ارتقای تاب‌آوری در برابر خشکسالی موردمطالعه: روستاهای شهرستان کنگاور» به این نتیجه دست یافتند میان مؤلفه سرمایه اجتماعی در ابعاد درون‌گروهی، ارتباط‌دهنده و سازمانی با تاب‌آوری همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. همچنین متغیرهای سرمایه اجتماعی مورداستفاده با تاب‌آوری تناسب بسیار بالایی دارد. سواری و عبدشاهی(Savari & Abdeshahi, 2019) در پژوهشی با عنوان «واکاوی نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی در شهرستان دیواندره» به این نتیجه دست یافتند که بین تمامی ابعاد سرمایه اجتماعی خانوارهای موردمطالعه و تاب‌آوری آنان رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد. همچنین ابعاد سرمایه اجتماعی با ضریب تبیین ۸۱ (۰/۹۰= γ , t=17/81) درصد اثر مثبت و معنی‌داری بر تاب‌آوری خانوارهای موردبررسی دارد. سبزه‌ای و همکاران(Sabzehei et al., 2019) در پژوهشی با عنوان بررسی سرمایه اجتماعی بر تاب‌آوری اجتماعی روستاییان در برابر مخاطرات محیطی با تأکید بر خشکسالی مطالعه موردی: روستاهای دهستان بدر شهرستان روانسر در سال ۱۳۹۶ نتیجه گرفتند که بین سطح سرمایه اجتماعی و زیرشاخه‌های آن شامل شبکه‌های روابط، مشارکت، اعتماد و هنجارهای متقابل و تاب‌آوری اجتماعی روستاهای نمونه رابطه مثبت و معناداری وجود دارد.

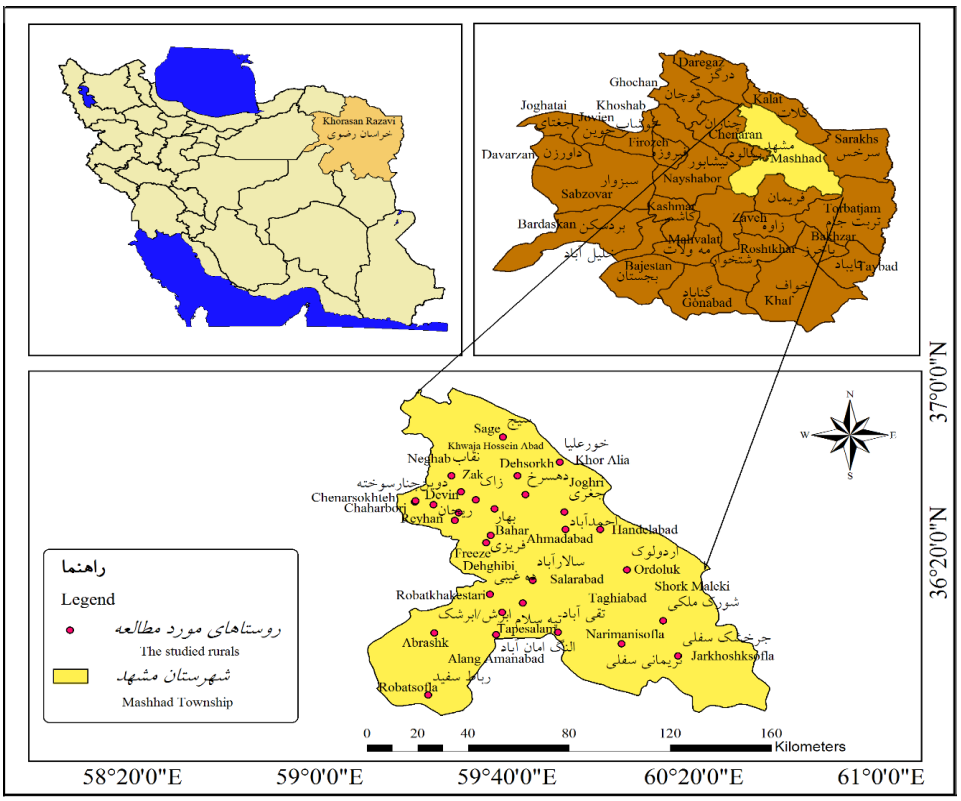
علی‌رغم شواهد در مورد اثربخشی سرمایه اجتماعی و شبکه‌های اجتماعی، تحقیقات تاب‌آوری و اقدامات مدیریت بلایا هنوز به‌طور کامل سرمایه اجتماعی را به‌عنوان یک جزء حیاتی در بر نگرفته است. شاید به این

دلیل که محققان بر روی معیارهای کمتری برای سرمایه اجتماعی نسبت به سایر عوامل اقتصادی یا جمعیتی توافق کرده‌اند(Aldrich & Meyer, 2015). ادبیات نظری نشانگر آن است که مطالعات نسبتاً کمی در مناطق دورافتاده کشورهای درحال‌توسعه در زمینه سرمایه اجتماعی در برابر بلایا انجام شده است (Panday et al., 2021). در خصوص منطقه موردمطالعه نیز بررسی‌ها حاکی از این است که تاکنون مطالعه‌ای به تبیین نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی این شهرستان نپرداخته است. بررسی مطالعات قبلی گویای این است که بیشتر تحقیقات انجام شده قبلی بر توصیف متغیرهای موردبررسی تمرکز کرده ولی در پژوهش حاضر تلاش شده است که تبیین کاملی پیرامون ارتباط سرمایه اجتماعی با ابعاد تاب‌آوری صورت گیرد. لذا نوآوری این پژوهش در این است که علاوه بر بررسی نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی، الگوی مکانی- فضایی سرمایه اجتماعی و تاب-آوری در سطح روستاهای موردمطالعه و دهستان‌های شهرستان نیز موردبحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه موردمطالعه

شهرستان مشهد یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی در شمال شرقی ایران می‌باشد که مرکز آن شهر مشهد است. این شهرستان در طول جغرافیایی ′۰۳ °۵۹ تا ′۳۵ °۶۰ و عرض جغرافیایی ′۴۲ °۳۵ تا ′۵۹ °۳۶ قرار گرفته است (شکل۱). بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای سه بخش، ۱۱ دهستان و ۳۷۹ روستای دارای سکنه که از این تعداد ۳۵۹ روستا بالای ۳ خانوار و ۲۰ روستا زیر ۳ خانوار است. همچنین جمعیت روستایی این شهرستان ۳۶۰۴۹۸ نفر و ۱۰۳۶۵۷ خانوار می‌باشد (Iran Statistics Center, 2016).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی روستاهای نمونه محدوده موردمطالعه

Fig.1. The geographical location of sample villages in the study area

۲-۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر ماهیت از نوع کمی، با توجه به هدف کاربردی و از جهت گردآوری داده‌ها، جزء تحقیقات توصیفی از نوع همبستگی است. به‌منظور گردآوری اطلاعات در بخش نظری از روش اسنادی و در بخش میدانی از روش پیمایش، مبتنی بر مشاهده وضع موجود توسط محققان و پرسشنامه بهره گرفته شده است. هم تاب‌آوری روستایی و هم سرمایه اجتماعی مفاهیمی هستند که نظریه‌پردازی و درک آن‌ها در مجموعه‌ای از شاخص‌ها پیچیده است، اما اندازه‌گیری آن‌ها بسیار دشوارتر است. سرمایه اجتماعی و تاب-آوری به روش‌های مختلفی سنجیده می‌شود. در این پژوهش از مجموعه‌ای از شاخص‌ها جهت سنجش و اندازه‌گیری تاب‌آوری و سرمایه اجتماعی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از بررسی ادبیات تحقیق و مطالعات کتابخانه‌ای شاخص‌ها و متغیرهای مربوط به سنجش سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری در برابر خشکسالی در قالب ۳ مؤلفه و ۳۱ گویه مربوط به سرمایه اجتماعی و شاخص‌ها و متغیرهایی در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیرساختی، نهادی و محیطی تاب‌آوری در قالب ۱۶ مؤلفه و ۷۹ گویه طراحی شد

(جداول ۱-۳) و بر اساس آن‌ها گویه‌های پرسشنامه در قالب طیف لیکرت و به‌صورت پنج طیفی [خیلی‌کم (۱)، کم (۲)، متوسط (۳)، زیاد (۴)، خیلی‌زیاد (۵)] تدوین شد.

جدول ۱- شاخص‌های سنجش سرمایه اجتماعی

Table 1- Social Capital Measurement Indicators

	مؤلفه Component	گویه Object	نماد در مدل Symbol in the Model
سرمایه اجتماعی Social Capital	اعتماد اجتماعی Social Trust	قرض دادن پول به دوستان و آشنایان، قرض دادن پول بدون دریافت هیچ‌گونه مدرک به افراد غیرخویشاوند و غریبه‌ها، امانت دادن وسایل کشاورزی به دوستان و آشنایان، امانت دادن وسایل کشاورزی به افراد غیرخویشاوند و غریبه‌ها، اعتماد به حرف‌های غیرخویشاوند و غریبه‌ها، اعتماد به مأموران دولتی مانند کارشناسان جهاد کشاورزی، مسئولان مراکز خرید محصولات کشاورزی و... خوش‌بینی و اطمینان افراد نسبت به عملکرد نهادها و گروه‌های اجتماعی روستایی نظیر شورای روستا، شورای حل اختلاف روستا، کارشناسان و مروجین روستایی، امنیت مناسب جانی و مالی در محیط روستا علی‌رغم بروز خشکسالی، امنیت مناسب گروه‌های اجتماعی آسیب‌پذیر (زنان، کودکان و سالمندان) علی‌رغم خشکسالی، توسعه و برخورداری از بیمه محصولات کشاورزی Loaning money to friends and acquaintances, loaning money without receiving any documentation to non-relatives and strangers, lending agricultural tools to friends and acquaintances, lending agricultural tools to non-relatives and strangers, trusting the words of non-relatives and strangers, trusting government officials such as agricultural experts, officials of agricultural product purchasing centers, etc., people's optimism and confidence in the performance of rural institutions and social groups like the village council, the village dispute resolution council, rural experts and promoters, adequate personal and financial security in the village environment despite drought, adequate security for vulnerable social groups (women, children, and the elderly) despite drought, and the development and availability of agricultural product insurance	Tr
	شبکه‌های اجتماعی Social Networks	تشکیل خانه همیاری در روستا، انسجام و تعامل بین روستاییان، همدلی میان اهالی روستا جهت حفاظت از منابع پایه نظیر آب‌وخاک، رابطه صمیمانه با همسایگان و دیگر اهالی روستا، رفت‌وآمد با مردم روستا، ارتباط با دیگر اهالی روستا، روابط ساکنان روستا با نهادهای محلی مثل شورا و دهیاری، ارتباط با نهادهای دولتی، ارتباط و عضویت در تعاونی‌ها و ارتباط با مراکز حمایتی، تضاد و اختلاف بین افراد محلی، درگیری و نزاع با مردم روستا، جرم و ناامنی در بین خانواده‌ها، تنش‌های روحی و روانی (اضطراب، ناامیدی) متأثر از تغییرات اقلیمی Establishing a cooperation house in the village, cohesion and interaction among villagers, empathy among villagers for the protection of basic resources like water and soil, a close relationship with neighbors and other villagers, socializing with village people, communication with other villagers, relationships between villagers and local institutions like the village council and the municipality, communication with government agencies, engagement and membership in cooperatives, and connections with support centers. conflicts and disputes among locals, altercations with village people, crime and insecurity among families, and emotional and psychological tensions (anxiety, hopelessness) influenced by climate changes	Net
	مشارکت اجتماعی Social Participation	مشارکت و همکاری روستاییان با نهادهای ذی‌ربط برای مقابله و جبران خسارات ناشی از خشکسالی، مشارکت و تعامل روستاییان با یکدیگر برای مقابله و جبران خسارات خشکسالی، همکاری و هماهنگی مؤثر نهادهای دولتی ذی‌ربط ملی و محلی برای مقابله و مدیریت بحران خشکسالی در روستا، مشارکت در فعالیت‌های اشتغال‌زایی جمعی، مشارکت بین مردم در امور مختلف در زمان خشکسالی (مثلاً مشارکت دسته‌جمعی روستاییان درترمیم جوی آب و...)، همکاری در تشکل‌ها، عضویت در تعاونی‌های تولید کشاورزی، عضویت در صندوق‌های اعتباری مالی و پس‌انداز (صندوق اعتبارت خرد، صندوق‌های خانوادگی و غیره)، عضویت در گروه‌های مذهبی، انجمن/تشکل آب بران (تعاونی آب بران) Participation and cooperation of villagers with relevant institutions to address and compensate for drought damages, collaboration and interaction among villagers to handle and recover from drought impacts, effective coordination between relevant	Pa

		national and local government agencies to manage and mitigate drought crises in villages, participation in collective employment-generating activities, involvement in various tasks during drought periods (e.g., collective efforts of villagers in repairing water channels...), collaboration in organizations, membership in agricultural production cooperatives, membership in financial and savings credit funds (microcredit funds, family funds, etc.), participation in religious groups, and associations/organizations of water users (water user cooperatives).

جدول ۲- شاخص‌های سنجش تاب‌آوری در بعد اجتماعی و اقتصادی

Table 2- Indicators for Measuring Resilience in the Social and Economic Dimension

بعد Dimension	مؤلفه Component	گویه Object	نماد در مدل Symbol in the Model
تاب‌آوری اجتماعی Social Resilience (S)	دانش و آگاهی Knowledge and Awareness	دانش و آگاهی روستاییان از دلایل وقوع خشکسالی، دانش و آگاهی روستاییان از خطرات و خسارات یا پیامدهای ناشی از خشکسالی و انعطاف‌پذیری نسبت به آن، دانش نسبت به اقدامات کاهش اثرات خشکسالی، دانش و آگاهی روستاییان از سازمان‌های مرتبط با مدیریت خشکسالی، آگاهی مردم محلی از خسارات احتمالی وارده به کشاورزان در زمان وقوع خشکسالی The knowledge and awareness of villagers about the causes of drought, their knowledge and awareness of the dangers and damages or consequences of drought and their flexibility towards it, knowledge about actions to mitigate the effects of drought, the villagers' knowledge and awareness of organizations related to drought management, and the local people's awareness of the potential damages to farmers during the occurrence of drought	Aw
	مهارت Skills	مهارت روستاییان در خصوص چگونگی آماده شدن برای مقابله با خشکسالی و آسیب‌های آن، مهارت روستاییان برای احیای منابع طبیعی و اراضی کشاورزی در برابر خشکسالی، مهارت روستاییان برای بهره‌گیری از روش‌های استحصال آب در زمان خشکسالی، مهارت روستاییان برای به‌کارگیری روش‌ها و فناوری‌های جدید مقابله با خشکسالی، برخورداری روستاییان از مهارت‌های شغلی و تخصصی جایگزین برای ایجاد مشاغل جدید در روستا Skills of villagers in preparing to cope with drought and its impacts, skills of villagers in rehabilitating natural resources and agricultural lands against drought, skills of villagers in utilizing water harvesting methods during drought, skills of villagers in employing new methods and technologies to combat drought, possession of alternative vocational and specialized skills by villagers to create new jobs in the village	Sk
	آموزش Education	برگزاری دوره‌های آموزشی ترویجی در خصوص چگونگی مقابله با خشکسالی و کاهش آسیب‌های آن، شرکت در کلاس‌های آموزشی و ترویجی برای بالابردن سطح آگاهی آنان از آثار و پیامدهای خشکسالی Holding educational and promotional courses on how to cope with drought and reduce its damage, participating in educational and promotional classes to increase their awareness of the impacts and consequences of drought	Ed
	دانش بومی و نوین Indigenous and Modern Knowledge	استفاده از دانش بومی برای کاهش خطرها، جستجوی روش‌های جدید برای مقابله با خشکسالی، دانش بومی جامعه در مورد روش‌های سازگاری با خشکسالی، استفاده از دانش بومی در راستای بهبود کشاورزی، استفاده از روش‌های نوین آبیاری جهت استفاده بهینه از آب موجود Using indigenous knowledge to reduce risks, seeking new methods to combat drought, the community's traditional knowledge on drought adaptation methods, leveraging indigenous knowledge to improve agriculture, and employing modern irrigation techniques to optimize the use of available water	In
تاب‌آوری اقتصادی Economic Resilience (E)	تنوع معیشتی و درآمد Livelihood diversity and income	ایجاد فرصت‌های شغلی مختلف در کنار مشاغل کشاورزی و دامداری (شغل دوم)، تنوع در منابع درآمدی کشاورزی، تنوع در منابع درآمدی بخش صنعت، تنوع در منابع درآمدی بخش خدمات، برخورداری از فعالیت‌های درآمدزای خانگی، برخورداری از درآمد جایگزین در شرایط خشکسالی Creating various job opportunities alongside agricultural and livestock activities (second jobs), diversification of income sources in agriculture, diversification of	Di

	توانایی برگشت به شرایط اشتغال‌زایی و درآمد Ability to return to employment and income conditions	توانایی حفظ یا امید به بازگشت به شرایط شغلی و درآمدی مناسب قبل در روستا، امیدوار بودن در خصوص زمان به دست آوردن شغل جدید، امیدوار بودن به مهارت‌های شغلی و تخصصی، توانایی مهیا کردن شغل جدید The ability to maintain or hope to return to favorable employment and income conditions in the village, being hopeful about the time it takes to secure a new job, being confident in one's vocational and specialized skills, and the ability to prepare for a new job	Ab
	تسهیلات و اعتبارات Facilities and Credits	استفاده از تسهیلات بانکی متنوع، کم‌بهره و بلاعوض، گرفتن وام برای استفاده از روش‌های نوین آبیاری، استفاده از کمک‌های دولتی که به افراد آسیب دیده تعلق می‌گیرد، استفاده از کمک‌های مالی اقوام و دوستان یا قرض گرفتن از بستگان و آشنایان برای جبران خسارت‌ها Utilizing various, low-interest, and non-repayable banking facilities, obtaining loans for the adoption of modern irrigation methods, using government aid allocated to affected individuals, and seeking financial assistance from relatives and friends or borrowing from acquaintances to compensate for the damages	Cr
	ظرفیت یا توانایی جبران خسارت Capacity or ability to compensate	ظرفیت یا توانایی جبران خسارات وارده به اموال از طریق میزان پس‌انداز و سرمایه‌گذاری‌ها، حمایت‌های مالی نهادهای دولتی و محلی برای جبران اثرات خشکسالی، حمایت و پرداخت هزینه‌ها و خسارت ناشی از خشکسالی، امیدوار بودن به حمایت‌های نهادی دولتی در شرایط اضطراری، امیدوار بودن به جبران خسارت مالی به مردم محلی The capacity or ability to compensate for damages to property through savings and investments, financial support from government and local institutions to mitigate the effects of drought, coverage of costs and damages caused by drought, confidence in institutional government support during emergencies, and hope for financial compensation for local people	Im

جدول ۳- شاخص‌های سنجش تاب‌آوری در ابعاد کالبدی، نهادی و محیطی

Table 3- Resilience Measurement Indicators in Physical, Institutional and Eenvironmental Dimensions

بعد Dimension	مؤلفه Component	گویه Object	نماد در مدل Symbol in the Model
تاب‌آوری کالبدی- زیرساختی Physical-Infrastructural Resilience (PH)	توسعه عمرانی و کالبدی روستا Civil and Physical Development of the Rural	دسترسی مناسب به راه‌های ارتباطی، دسترسی به خطوط برق، تلفن، گاز و آب آشامیدنی سالم، دسترسی به امکانات حمل‌ونقل، دسترسی به بازار، دسترسی به امکانات بهداشتی، کیفیت مسکن خانواده، رضایت‌مندی اهالی از وضعیت خدمات‌دهی دولت به روستا Adequate access to communication routes, access to electricity lines, telephone, gas, and clean drinking water, access to transportation facilities, access to markets, access to healthcare facilities, housing quality of families, and residents' satisfaction with government services to the village	Dev
	فناوری و زیرساخت‌های تولید Technology and Production Infrastructure	توسعه زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب کشاورزی، توسعه فناوری‌های جدید در بخش کشاورزی در راستای مدیریت و بهره‌برداری بهینه منابع آب (کشت مکانیزه، آبیاری قطره‌ای و...) مبتنی بر شرایط منطقه، اصلاح روش‌های سنتی آبیاری Developing appropriate infrastructure for the management and optimal utilization of agricultural water resources, the development of new technologies in the agricultural sector for the optimal management and utilization of water resources (mechanized farming, drip irrigation, etc.) based on regional conditions, and the improvement of traditional irrigation methods	Te

تاب‌آوری نهادی –مدیریتی Institutional-Management Resilience (INT)	ساختار سازمانی Organizational Structure	داشتن برنامه منطقی برای جلوگیری از تشدید اثرات خشکسالی از سوی سازمان‌های متولی، اطلاع‌رسانی مناسب دستگاه‌های متولی در خصوص اتخاذ رویکردهای مقابله با خشکسالی، پشتیبانی و اثربخشی سیستم نهادی در اعتبارات، وام و...توسط نهادهای متولی، ایجاد سازمان‌های مرتبط با بحران موردنظر و تعریف عملکرد آن‌ها Having a rational plan to prevent the effects of drought by the responsible organizations, proper information of the responsible agencies regarding the adoption of drought management approaches, support and effectiveness of institutional systems in credits, loans, etc., by the responsible organizations, the establishment of crisis-related organizations and defining their functions	St
	قوانین و مقررات Rules and Regulations	وجود قوانین و مقررات و راهکارهای حمایتی اثربخش و توانمندساز جامعه محلی در برابر خشکسالی، تعهد نهادهای ذی‌ربط به انجام وظایف خود در رفع نیازها و پاسخگویی به جامعه محلی آسیب دیده از خشکسالی، مؤثر بودن قوانین دولتی برای جبران اثرات تغییرات اقلیمی، ضمانت اجرایی قوانین در زمینه مقابله با خشکسالی The existence of effective and empowering laws, regulations, and supportive measures for the local community against drought, the commitment of relevant institutions to fulfill their duties in meeting the needs and responding to the drought-affected local community, the effectiveness of government laws to compensate for the effects of drought, and the enforceability of laws regarding drought management	Co
	عملکرد نهادی Institutional Performance	رضایت از عملکرد نهادهای مؤثر در کاهش آثار ناشی از خشکسالی، عملکرد نهادهای دولتی مانند دهیاری و شورا در مدیریت اثرات خشکسالی، پیگیری مشکلات روستا از سوی متصدیان و مسئولان محلی Satisfaction with the performance of institutions in reducing the effects of drought, the effectiveness of government support in compensating for the effects of drought, the performance of government institutions such as rural municipalities and rural councils in managing the effects of drought, pursuing village problems by local authorities	Pe
	هماهنگی و روابط نهادی Coordination and Institutional Relations	هماهنگی و همکاری ادارات و نهادهای مرتبط با روستا، وجود سازوکارهای حل اختلاف بین نهادها و روستاییان، بسترهای مناسب برای همکاری نیروها و سازمانهای مرتبط Coordination and collaboration among agencies and institutions related to the village, the existence of mechanisms to resolve conflicts between institutions and villagers, and appropriate platforms for cooperation between forces and related organizations	Rel
تاب‌آوری محیطی Environmental Resilience (EN)	مدیریت منابع آب و خاک Management of Water and Soil Resources	احیا و لای روبی قنات، سیمانی کردن کانال‌های انتقال آب، پوشش انهار و کانال‌های آبیاری (بتونی یا پلاستیک کردن کانال‌های آبیاری) برای کاهش هدر رفت آب، کم کردن سطح زیر کشت آبی، برنامه‌ریزی آبیاری محصولات بر حسب نیاز آبی، اصلاح شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، استفاده از فنون حفظ رطوبت خاک در باغها، عدم استفاده از چاه‌های آب غیرمجاز Restoration and cleaning of qanats, cementing water transfer canals, covering irrigation ditches and canals (using concrete or plastic) to reduce water wastage, reducing the area of irrigated land, planning irrigation of crops based on water needs, improving soil conservation tillage methods, utilizing soil moisture retention techniques in orchards, and avoiding the use of unauthorized water wells	Ma
	عملیات زراعی Agricultural Operations	استفاده از شخم عمیق در مناطق زراعی برای جذب رطوبت بیشتر، بهبود روش‌های شخم و دیگر عملیات زراعی براساس روش‌های علمی به‌منظور جلوگیری از هدر رفتن آب، عدم شخم یا شخم بسیار کم در زمین، آیش گذاشتن زمین‌های زراعی جهت آماده شدن مزرعه برای کشت، تغییر تقویم زراعی، دقت در زمان‌بندی کشت محصولات متناسب با شرایط اقلیمی جدید ناشی از خشکسالی، یکپارچه سازی اراضی در استفاده بهینه از منابع آب در مقابله با خشکسالی Using deep plowing in agricultural areas to enhance moisture absorption, improving plowing methods and other agricultural operations based on scientific techniques to prevent water wastage, avoiding or minimizing plowing, fallowing agricultural lands to prepare the fields for cultivation, changing the agricultural calendar, carefully timing crop planting to suit new	Op

		climatic conditions resulting from drought, and consolidating lands for optimal use of water resources to combat drought	
Cu	الگوی کشت cropping pattern	تغییر در الگوی کشت به لحاظ کاشت محصولات مقاوم در برابر خشکسالی، استفاده از ارقام و گونه‌های مقاوم به خشکسالی، استفاده از نظام کشت هم‌زمان و مختلط، تغییر در الگوی کشت به لحاظ افزایش تنوع محصولات کشت شده یا تنوع در کاشت محصولات Changing the cropping pattern to plant drought-resistant crops, using drought-resistant varieties and species, employing simultaneous and mixed cropping systems, and altering the cropping pattern to increase the diversity of planted crops or diversify crop planting.	

(Farahani & Jahansoozi, 2022; Alam, Alam & Mushtaq, 2017; Savari & Abdeshahi, 2019; Jamshidi & Anabestani, 2022; Sadeghloo & Sojasi Qeidari, 2014; Roknedin Eftekhari, Moosavi, Poortaheri & Farajzadeh Asl, 2014; Davoodpur, 2017; khatibi, 2017)

جامعه آماری این پژوهش را ۱۱۷۰۶ نفر از خانوارهای روستایی ساکن در شهرستان مشهد در بر می‌گیرد. با توجه به فراوانی تعداد روستاهای موردمطالعه ۸ درصد یا معادل ۳۰ روستا جهت توزیع و تکمیل پرسشنامه انتخاب شد؛ و درنهایت با استفاده از جدول مورگان ۳۷۲ خانوار به‌عنوان حجم نمونه انتخاب شد. نمونه‌گیری از جامعه مورد نظر به روش چند مرحله‌ای انجام شد. نظر به این که منطقه موردمطالعه از نظر موقعیت مکانی و توپوگرافی، به دو گروه (دشتی و کوهستانی) تقسیم می‌گردد، برای این منظور فراوانی روستاهای این دو گروه، از طریق روش نمونه‌گیری احتمالی طبقه‌بندی شده مشخص گردیده است. سپس با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی ساده از بین روستاهای دشتی ۱۵ روستا و از بین روستاهای کوهستانی ۱۵ روستا انتخاب شدند. در مرحله بعدی روستاهای منتخب از دو گروه را به چهار دسته کوچک، متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ طبقه‌بندی می‌کنیم و به نسبت درصد سهم هر کدام برای آن‌ها سهمیه منظور می‌کنیم. بدین معنی که هر یک از روستاها براساس پراکندگی و توزیع جمعیت در یک طبقه قرار گرفتند و بر این اساس با استفاده ازاین‌روش، حجم نمونه در داخل هر یک از این طبقات (روستاها) انتخاب می‌شود

بررسی روایی (صوری و محتوایی) پرسشنامه توسط گروهی از متخصصین رشته جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی که سابقه مطالعات مشابه داشتند مورد تأیید قرارگرفته است. براساس نظرات متخصصین برخی از سؤالات نامرتبط با موضوع پژوهش حذف و اصلاح گردیده است؛ و سؤالاتی انتخاب شدند که بتواند تمام حیطه‌ها و مؤلفه‌هایی که آزمون برای سنجش و اندازه‌گیری آن ساخته شده است را بسنجد. مطالعه آزمایشی در منطقه جامعه آماری با تعداد ۳۰ پرسشنامه صورت گرفت. همچنین برای سنجش هماهنگی درونی بین شاخص‌های مختلف از ضریب آلفای کرونباخ به مثابه یکی از ضرایب پایایی یا قابلیت اعتماد استفاده شده است؛ سپس به گردآوری اطلاعات پرداخته شد. به‌طور معمول ضریب آلفای کرونباخ بین ۰/۶ تا ۰/۸ قابل قبول و بالاتر از ۰/۸ نشان دهنده پایایی بالا است. بدیهی است که هر چه عدد به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده اعتبار بیشتر است. همان‌طور که در جدول شماره ۴ قابل مشاهده است مقدار آلفای کرونباخ برای

تمامی مؤلفه‌ها بالای ۰/۷ به دست آمد که این امر نشان از بالا بودن پایایی پرسشنامه طراحی شده می‌باشد (جدول ۲). داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از آزمون T تک نمونه‌ای، آزمون پیرسون و مدل‌سازی معادلات ساختاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزارهای SPSS و AMOS استفاده شد.

جدول ۴- تعداد گویه‌ها و میزان آلفای کرونباخ متغیرهای پژوهش

Table 4 - Number of items and Cronbach's Alpha value of research variables

	متغیر Variable	تعداد گویه Number of items	آلفای کرونباخ Cronbach's alpha
سرمایه اجتماعی Social Capital	اعتماد اجتماعی Social Trust	9	0.867
	شبکه‌های اجتماعی Social Networks	13	0.851
	مشارکت اجتماعی Social Participation	9	0.729
تاب‌آوری Resilience	اجتماعی Social	17	0.913
	اقتصادی Economic	19	0.828
	کالبدی Physical	10	0.754
	نهادی-مدیریتی Institutional-Management	14	0.861
	محیطی Environmental	19	0.801

۳-نتایج و بحث

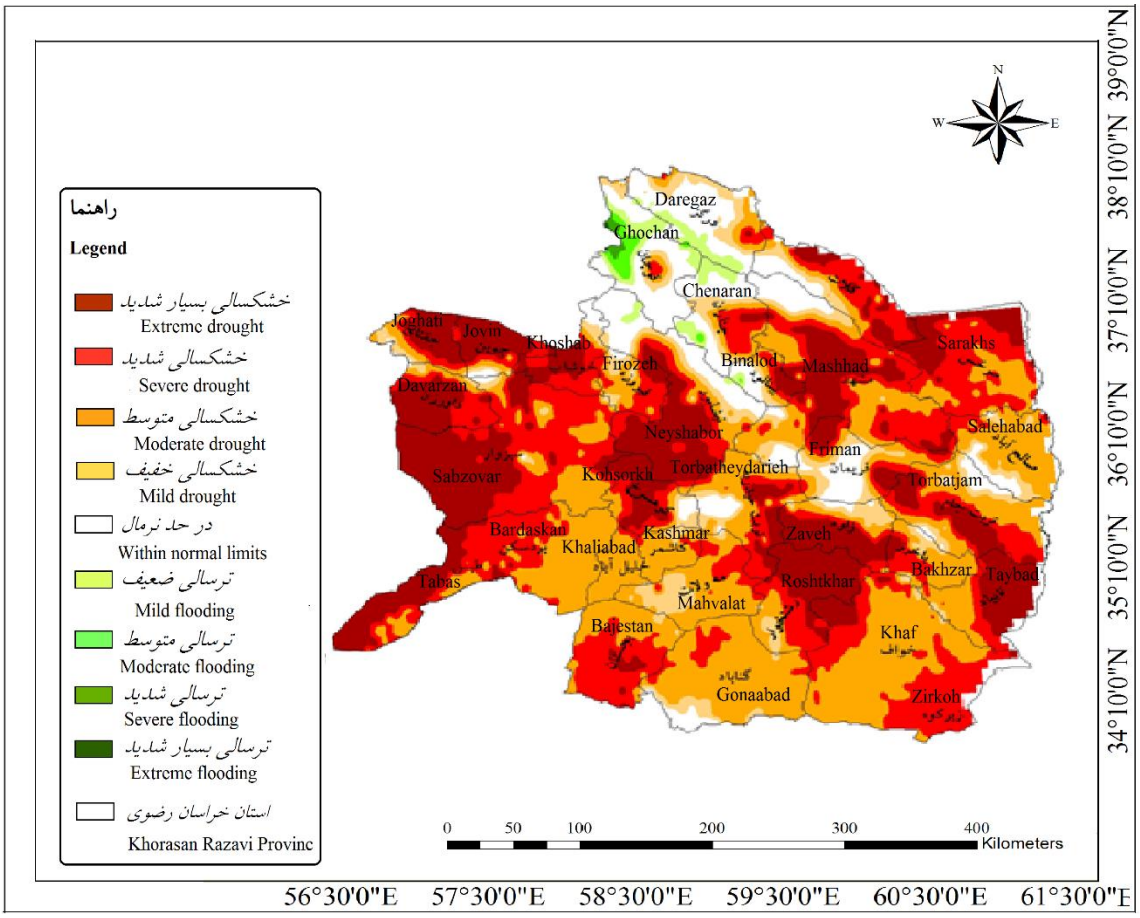
۳-۱- وضعیت خشکسالی در منطقه

به‌منظور بررسی وضعیت خشکسالی در منطقه موردمطالعه، از شاخص (SPEI) استفاده گردیده است. این شاخص یک شاخص چند کمیتی است که در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. همان‌طور که از نتایج مشخص می‌شود، بر اساس تحلیل شاخص (SPEI) در خصوص خشکسالی در منطقه طی دوره ده ساله تا پایان دی ماه سال ۱۴۰۰ منطقه موردمطالعه در وضعیت خشکسالی در حد نرمال تا بسیار شدید بوده است (جدول ۵ و شکل ۲) (Portal of the General Department of Meteorology, 2021). لذا مستلزم تدابیری برای جلوگیری از آسیب‌پذیری جوامع روستایی در شرایط خشکسالی می‌باشد.

جدول ۵- شدت خشکسالی شهرستان مشهد طی سال دوره ۱۲۰ ماه تا پایان دی ماه ۱۴۰۰

Table 5 - Drought severity in Mashhad city during a 120-month period until the end of January 2022

شهرستان Township	ترسالی بسیار شدید Extreme flooding	ترسالی شدید Severe flooding	ترسالی متوسط Moderate flooding	ترسالی ضعیف Mild flooding	در حد نرمال within normal limits	خشکسالی خفیف Mild drought	خشکسالی متوسط Moderate drought	خشکسالی شدید Severe drought	خشکسالی بسیار شدید Extreme drought	مجموع درصدهای خشکسالی Total drought
مشهد Mashhad	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2	6.6	28.3	27.1	27.2	89.8



شکل ۲- پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی در سطح استان خراسان رضوی بر اساس شاخص SPEL دوره ۱۲۰ ماه تا پایان دی ماه ۱۴۰۰

Fig. 2. Meteorological drought zoning in Khorasan Razavi province based on the SPEL index during a 120-month period until the end of January 2022 (Portal of the General Department of Meteorology, 2021)

۳-۲- بررسی ویژگی‌های فردی خانوارهای روستایی موردمطالعه

ویژگی‌های توصیفی نمونه موردمطالعه بیانگر آن است که از ۳۷۲ نفر پاسخگو، ۸۱/۷ درصد مرد و ۱۷/۵ درصد زن بوده‌اند. بیشترین فراوانی (۲۸/۵) در رده سنی ۴۱ تا ۵۰ سال می‌باشد. سطح تحصیلات، بیشترین فراوانی (۲۹) درصد مربوط به پاسخ‌گویانی است که سیکل دارند. ۷/۵ درصد پاسخ‌گویان بی‌سواد، ۲۶/۹ درصد ابتدایی، ۱۹/۹ درصد دیپلم و ۱۶/۷ درصد دارای تحصیلات فوق‌دیپلم و بالاتر می‌باشند. بررسی ویژگی‌های اقتصادی نشان می‌دهد اکثریت خانوارهای موردمطالعه (۵۰/۸) درصد از نظر شغل اصلی، به‌طور هم‌زمان کشاورز، باغدار و دامدار هستند. همچنین از بین کل افراد پاسخگو ۶۹/۶ درصد دارای یک تا چهار قطعه زمین کشاورزی می‌باشند. ۶۵/۳ درصد زمین‌های کشاورزی پاسخ‌گویان ملکی می‌باشد. همچنین ۴۸/۹ درصد از اراضی کشاورزی کشاورزان به‌صورت آبی می‌باشد. ۱۹/۴ درصد به‌صورت باغی، ۲۸ درصد دیم و ۳/۸ درصد به‌صورت آیش است. بررسی ویژگی‌های اجتماعی نشانگر آن است که میانگین تعداد افراد خانوار پاسخ‌گویان روستاهای موردمطالعه شامل ۶-۵ نفر (۴۰/۹ درصد) است.

۳- ۳ - تحلیل وضعیت سرمایه اجتماعی و تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

در پژوهش حاضر جهت تعیین وضعیت مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی و مؤلفه‌های تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی در شهرستان موردمطالعه از آزمون T استفاده شد. در آزمون T تک نمونه‌ای چنانچه حد بالا و حد پایین هر دو مثبت باشند، بدین معنی است که میانگین جامعه در مورد آن متغیر بیشتر از مقدار مورد آزمون می‌باشد. همچنین چنانچه اولی مثبت و دومی منفی باشد، میانگین جامعه تقریباً مقدار آزمون است. همچنین منفی بودن این دو مقدار، بدین معنی است که میانگین متغیر موردنظر در جامعه کمتر از مقدار آزمون است، و این متغیرها در جامعه‌ی موردبررسی در سطح پایینی قرار دارند؛ بنابراین میانگین محاسبه شده‌ی ابعاد متغیرهای تحقیق با میانگین فرضی (۲/۵) سنجش شده است. نتایج نشان داد که خانوارهای روستایی شهرستان مشهد از نظر وضعیت سرمایه اجتماعی بالاتر از حد متوسط قرار دارند؛ بنابراین، به دلیل بالاتر بودن تمامی مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی از سطح متوسط می‌توان گفت که خانوارهای روستایی شهرستان مشهد ازنظر سرمایه اجتماعی، در وضعیت مناسبی قرار دارند (جدول۸).

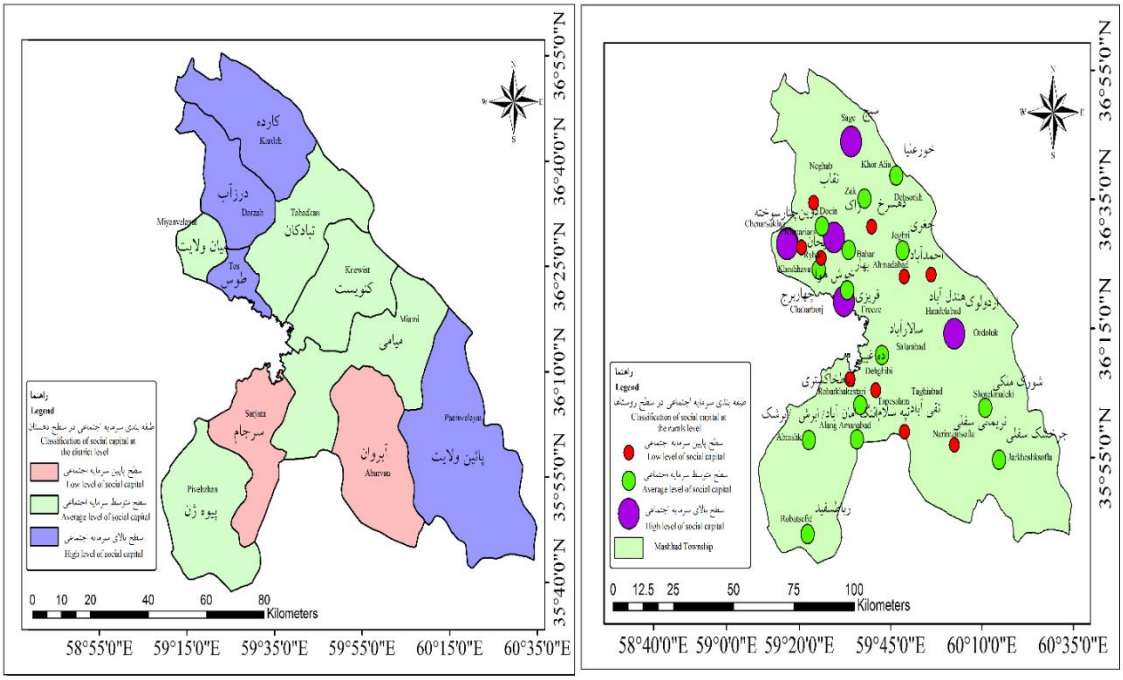
جدول ۶- تحلیل سرمایه اجتماعی روستاهای بررسی شده در برابر خشکسالی با T تک نمونه‌ای

Table 6 - Analysis of social capital in the surveyed villages against drought with one-sample T-test

مؤلفه Components	میانگین Mean	آماره t t-statistic	معناداری Significance	اختلاف میانگین Mean difference	ضریب اطمینان ۹۵ درصد 95% Confidence Interval of the Difference	
					حد پایین Lower	حد بالا Higher
اعتماد اجتماعی	3.44	23.766	0.000	0.94564	0.8674	0.0239

Social Trust						
شبکه‌های اجتماعی Social Networks	3.33	21.942	0.000	0.83333	0.7587	0.9080
مشارکت اجتماعی Social Participation	2.57	8.770	0.000	0.22043	0.2699	0.1710
سرمایه اجتماعی Social Capital	3.01	20.786	0.000	0.51951	0.4704	0.5687

در شکل ۳ الگوی مکانی سرمایه اجتماعی در سطح روستاهای موردمطالعه نشان داده است. بر این اساس، میزان سرمایه اجتماعی روستاهای اردولوک، سیج، زاک، فریزی، دهسرخ و چنارسوخته در بهترین حالت سرمایه اجتماعی می‌باشند و روستاهای هندل‌آباد، نریمانی‌سفلی، نقاب، دوین، احمدآباد، تقی‌آباد در سح پایین سرمایه اجتماعی قرار داشته‌اند. همچنین میزان سرمایه اجتماعی از منظر توزیع فضایی حاکی از این است که دهستان‌های قسمت شمالی نسبت به دهستان‌های میانی، شرقی و جنوب غربی شهرستان از سطح سرمایه اجتماعی بالاتری برخوردارند. الگوی توزیع فضایی و روند فضایی سرمایه اجتماعی روستایی در سطح دهستان‌ها نشان می‌دهد دهستان‌های کارده، درزآب، طوس و پایین‌ولایت بیشترین سطح سرمایه اجتماعی و دهستان‌های سرجام و آبروان پایین‌ترین سطح سرمایه اجتماعی را داشته‌اند.



شکل ۳- سرمایه اجتماعی شهرستان مشهد به تفکیک دهستان و روستاهای موردمطالعه

Fig. 3. Social capital of Mashhad Township, categorized by rural district and the surveyed rurals

همچنین نتایج حاصل در جدول ۷ حاکی از این است که متوسط شاخص تاب‌آوری به جز بعد محیطی و کالبدی دارای امتیاز کمتر از حد متوسط بوده و بنابراین خانوارهای موردمطالعه از نظر وضعیت تاب‌آوری در شرایط خشکسالی در وضعیت مناسبی قرار ندارند. همچنین نتایج ارزیابی تاب‌آوری در ابعاد مختلف نشان داد که شاخص تاب‌آوری کل در مقیاس صفر تا ۵ به میزان ۲/۳۱ و در حد متوسط به پایین است؛ به‌عبارت‌دیگر چناچه نقطه مقابل تاب‌آوری را آسیب‌پذیری در نظر بگیریم، گرایش متوسط جامعه آماری موردمطالعه بیشتر متمایل به آسیب‌پذیری بوده و از حیث تاب‌آوری در وضعیت مناسبی قرار ندارد. از منظر ابعاد تاب‌آوری روستایی، تاب‌آوری محیطی و کالبدی از بیشترین مقدار و تاب‌آوری نهادی از کمترین مقدار برخوردار بوده است.

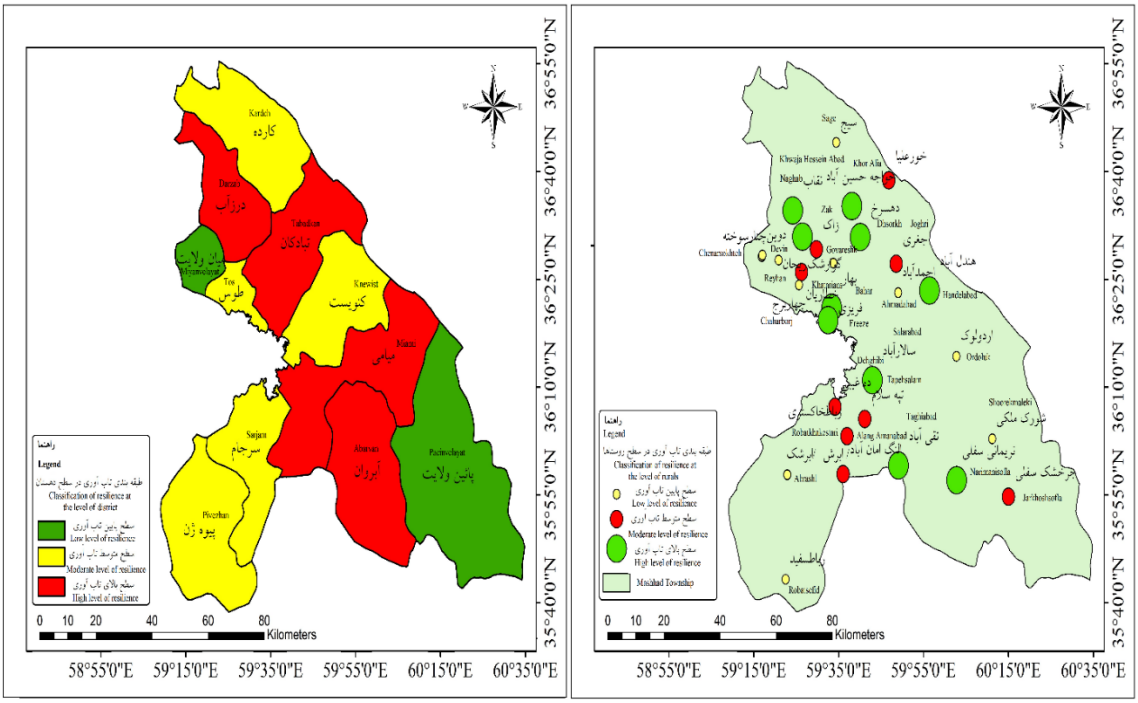
جدول ۷- تحلیل تاب‌آوری روستاهای بررسی شده در برابر خشکسالی با T تک نمونه‌ای

Table 7 - Analysis of resilience in the surveyed villages against drought with one-sample T-test

مؤلفه Components	میانگین Mean	آماره t t-statistic	معناداری Significance	اختلاف میانگین Mean difference	ضریب اطمینان ۹۵ درصد 95% Confidence Interval of the Difference	
					حد پایین Lower	حد بالا Higher
اجتماعی Social	2.22	-10.765	0.000	-0.27816	-0.3290	–0.2273
اقتصادی Economic	2.25	-6.642	0.000	-0.24460	-0.3003	–0.1889
کالبدی Physical	2.58	3.178	0.000	0.08327	0.0317	0.1348
نهادی Institutional	2.12	-12.716	0.000	-0.37606	-0.4342	–0.379
محیطی Environmental	2.58	2.769	0.000	0.08749	0.0254	0.1496
تاب‌آوری کل Total Resilience	2.31	-9.998	0.000	-0.18625	-0.2229	-0.1496

در شکل ۴ الگوی مکانی تاب‌آوری در سطح روستاهای موردمطالعه نشان داده است. بر این اساس، سطح تاب‌آوری روستاهای نریمانی سفلی، تقی‌آباد، سالارآباد، هندل‌آباد، بهار، خواجه حسین‌آباد، دهسرخ، نقاب، فریزی و گوارشک در بهترین حالت تاب‌آوری می‌باشند و روستاهای نریمانی سفلی، اردولوک، ابرش، رباط سفید، احمدآباد، چنارسوخته در سطح پایین تاب‌آوری قرار داشته‌اند. همچنین میزان تاب‌آوری از منظر توزیع فضایی حاکی از این است که دهستان‌های قسمت شمالی، جنوبی، میانی، غربی و جنوب غربی نسبت به دهستان جنوب شرقی شهرستان از سطح تاب‌آوری بالاتری برخوردارند. الگوی توزیع فضایی و روند فضایی

تاب‌آوری روستایی در سطح دهستان‌ها نشان می‌دهد دهستان‌های میامی، درزآب، تبادکان، آبروان بیشترین سطح تاب‌آوری و دهستان‌های پایین‌ولایت و میان‌ولایت پایین‌ترین سطح تاب‌آوری را داشته‌اند.



شکل ۴- تاب‌آوری روستایی شهرستان مشهد به تفکیک دهستان و روستاهای موردمطالعه

Fig.4. Rural resilience of Mashhad Township, categorized by rural district and the surveyed rurals

۳- ۴- بررسی رابطه سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

برای بررسی رابطه‌ی بین سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی از آزمون همبستگی استفاده گردید و با توجه به نوع مقیاس متغیرها، آزمون همبستگی پیرسون مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این بخش (جدول ۸) حاکی از آن است که در سطح خطای ۱ درصد رابطه مثبت و معنی‌داری بین سرمایه اجتماعی و تمامی ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی است.

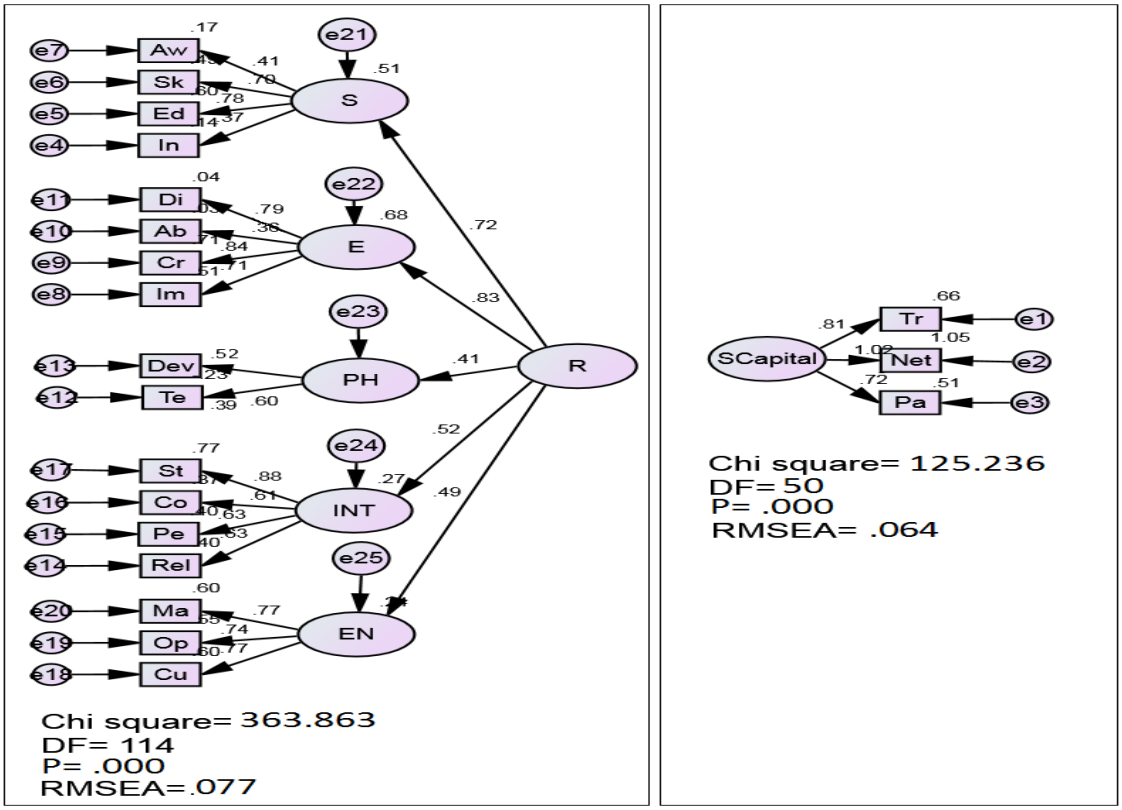
جدول ۸- بررسی همبستگی بین سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری

Table 8 - Examination of the correlation between social capital and resilience dimensions

سرمایه اجتماعی	تاب‌آوری اجتماعی Social Resilience		تاب‌آوری اقتصادی Economic Resilience		تاب‌آوری کالبدی Physical Resilience		تاب‌آوری نهادی Institutional Resilience		تاب‌آوری محیطی Environmental Resilience	
Social Capital	r	Sig	R	Sig	R	Sig	R	Sig	r	Sig
	689**	0.000	709**	0.000	622**	0.000	589**	0.000	666**	0.000

۳-۵- تأثیر سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

به‌منظور بررسی اثرگذارترین شاخص‌های سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری در شرایط خشکسالی در مناطق روستایی شهرستان مشهد از مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) و با استفاده از نرم افزار Amos اقدام شد. برای این منظور ابتدا مدل مفهومی پژوهش بر مبنای شاخص‌ها و ابعاد سرمایه اجتماعی (SCapital) و تاب‌آوری روستایی (R) تشکیل شد. ابتدا دو مدل تحلیل عاملی تأییدی (CFA) مربوط به متغیر مستقل و وابسته پژوهش به ترتیب (سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری روستایی) ترسم شده و در ادمه مدل‌های مذکور، اعتبارسنجی شده‌اند (شکل ۵ و جدول ۹). همان‌طور که ملاحظه می‌شود (شکل ۵)، بارهای عاملی مربوط به هریک از متغیرهای دو مدل طراحی شده در وضعیت مطلوبی قرار دارند. لازم به ذکر است، در مدل تحلیل عاملی تاییدی اگر میزان بار عاملی هر متغیر از ۰/۳ بیشتر باشد، نشانگر مناسب بودن متغیر برای استفاده در مدل تحلیل عاملی تأییدی است؛ بنابراین، همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو مدل طراحی شده، میزان بارعاملی هر یک از متغیرها بیشتر از ۰/۳ بوده و قابلیت استفاده در مدل نهایی را دارند.



شکل ۵- مدل اندازه‌گیری مربوط به متغیر مستقل و وابسته پژوهش

Fig.5. Measurement model related to the independent and dependent variables of the research

برای برازش کلیت مدل‌های اندازه‌گیری مربوط به متغیرهای وابسته و مستقل پژوهش، مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی برازش مدل از منابع مستند استخراج شده و مقادیر محاسبه شده با معیارهای پیشنهادی تطبیق داده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود (جدول۹)، وضعیت کلیه معیارهای برآورد شده با مقادیر مطلوب (معیارهای پیشنهادی) همخوانی بالایی داشته و در مجموع می‌توان چنین عنوان کرد که مدل‌های اندازه‌گیری ترسیم شده، شرایط و اعتبار لازم برای طراحی مدل نهایی پژوهش (تأثیرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری روستایی) را دارا هستند و توانسته است تاثیرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای شهرستان مشهد در برابر خشکسالی را تبیین نمایند. به این ترتیب زمینه برای تدوین و ارزیابی مدل اصلی تحقیق فراهم است.

جدول ۹- شاخص‌های ارزیابی کلیت مدل‌اندازه‌گیری متغیر وابسته و مستقل پژوهش

Table 9 - Indicators for evaluating the overall measurement model of the dependent and independent variables of the research

شاخص Index	CMIN	DF	CMIN/DF	RMSEA	HOLTER	RMR	GFI	AGFI	NFI	PRATIO
معیار پیشنهاد شده Proposed criterion	-	-	<5	0/08 ≤	520	0.08	≤ 0.90	0.90 ≤	≤ 0.90	0-1
ابعاد تاب‌آوری Resilience Dimensions	363.346	114	3.889	0.077	204	0.053	0.918	0.903	0.922	0.523
سرمایه اجتماعی Social Capital	125.236	50	2.504	0.064	>75	0.039	0.923	0.921	0.901	0.235

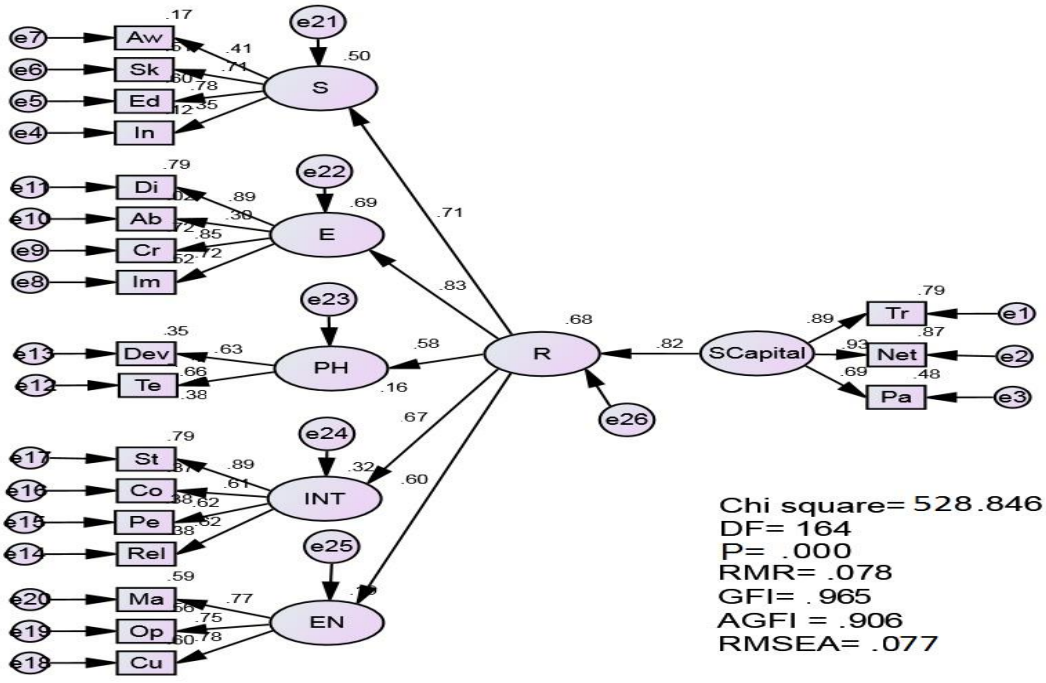
پس از برازش کلیت متغیر وابسته و مستقل پژوهش در قالب دو مدل اندازه گیری، در محیط ایموس گرافیک، مدل اثرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری روستایی در میان سرپرستان خانوار روستاهای شهرستان مشهد ترسیم شد. (شکل۶). همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل مذکور، دو متغیر وابسته و مستقل به‌صورت پنهان در نظر گرفته شده‌اند. بررسی وضعیت برازش مدل نهایی تأثیرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری روستایی در محدوده موردمطالعه با معیارهای پیشنهادی نشان می‌دهد (جدول۱۰)، مدل مذکور از اعتبار و دقت لازم برخوردار بوده و توانسته است اثرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری روستایی در برابر خشکسالی در محدوده موردمطالعه را تبیین نماید؛ همچنین بررسی بارهای های عاملی مربوط به متغیرهای مدل مذکور بالاتر از ۰/۳ بوده و نشانگر وضعیت قابل قبول متغیرهای قرار گرفته در مدل است.

جدول ۱۰- شاخص‌های ارزیابی کلیت مدل تأثیرات سرمایه اجتماعی بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

Table 10 - Indicators for evaluating the overall model impacts of social capital on the resilience dimensions of rural households against drought

شاخص Index	CMIN	DF	CMIN/DF	RMSEA	HOLTER	RMR	GFI	AGFI	NFI	PRATIO
معیار پیشنهاد شده Proposed criterion	-	-	<5	0/08 ≤	520	0.08	0.90 ≤	0.90 ≤	0.90 ≤	0-1
مدل نهایی Final model	528.846	164	3.224	0.077	>75	0.078	0.965	0.906	0.900	0.630

نتایج مدل استاندارد سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی (شکل ۵) نشان می‌دهد که سرمایه اجتماعی اثر مثبتی با ضریب ۰/۸۲ بر ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی شهرستان مشهد دارد. در بین عوامل پنهان سرمایه اجتماعی عامل شبکه‌های اجتماعی (۰/۹۳) بیشترین نقش را در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی ایفا کرده است.



شکل ۶- مدل ساختاری سرمایه اجتماعی در ارتباط با ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

Fig.6. Structural model of social capital in relation to the resilience dimensions of rural households against drought

در جدول ۱۱ مقادیر غیر استاندارد، خطای معیار، نسبت بحرانی و سطح تحت پوشش (p) مدل سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی آورده شده است. نتایج جدول فوق حاکی از آن است همه پارامترهای لامدا دارای تفاوت معنی‌داری با مقدار صفر هستند. همچنین مقدار برآورد شده هر یک از عامل‌ها با یکدیگر متفاوت است. مقدار p در همه روابط فوق کمتر از ۰/۰۵ است که نشان می‌دهد همه روابط رگرسیونی مدل مورد حمایت داده‌های تجربی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که ارتباط مثبت بین سرمایه اجتماعی و بهبود ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی وجود دارد و این ارتباط به لحاظ آماری نیز معنی‌دار است (sing= 0.000). ملاحظه می‌گردد که در میان ابعاد سرمایه اجتماعی خانوارهای روستایی، شبکه‌های اجتماعی نسبت به سایر ابعاد، تأثیر بیشتری در بهبود تاب‌آوری آنان دارد، پس از آن، ابعاد اعتماد اجتماعی و مشارکت به ترتیب بیشترین تأثیر را در بهبود تاب‌آوری دارند؛ بنابراین می‌توان گفت متغیر سرمایه اجتماعی اثر مثبت و معنی‌داری بر بهبود ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی شهرستان مشهد داشته است. در زمینه اثرات عوامل پنهان سرمایه اجتماعی با بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی بیشترین اثر مربوط به بعد اقتصادی تاب‌آوری خانوارها و کمترین اثر مربوط به بعد کالبدی بوده است. از بین شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی، سرمایه اجتماعی بیشترین تأثیر را بر تنوع معیشتی و درآمدی و تسهیلات و اعتبارات گذاشته است. از بین شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی سرمایه اجتماعی بر آموزش با ضریب (۰/۷۸) و مهارت با ضریب (۰/۷۱) تأثیرگذار بوده است. علاوه بر این ساختار سازمانی با ضریب (۰/۸۹) در بین شاخص‌های تاب‌آوری نهادی، در بعد محیطی تغییر الگوی کشت و مدیریت منابع آب و خاک به ترتیب با ضرایب (۰/۷۸)، (۰/۷۷) و در بعد کالبدی فناوری و زیرساخت‌های تولید با ضریب (۰/۶۶) بیشترین تأثیر را از سرمایه اجتماعی پذیرفته‌اند.

جدول ۱۱- برآوردهای استاندارد و غیراستاندارد شاخص‌ها و عوامل پنهان در مدل سرمایه اجتماعی و ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی

Table 11 - Standard and non-standard estimates of indicators and latent factors in the social capital model and resilience dimensions of rural households against drought

			Estimate	Standardized Regression Weights	S.E.	C.R.	P
R	<---	SCapital	1.109	.877	.027	4.000	***
S	<---	R	1.000	.709			
E	<---	R	2.372	.828	.507	4.680	***
PH	<---	R	1.118	.583	.317	3.526	***
INT	<---	R	1.425	.672	.323	4.413	***
EN	<---	R	1.336	.598	.324	4.128	***
Tr	<---	SCapital	1.000	.891			
Net	<---	SCapital	.995	.935	.102	9.765	***
Pa	<---	SCapital	.873	.691	.138	6.908	.046
In	<---	S	1.000	.353			

Ed	<---	S	2.021	.777	.356	5.684	***
Sk	<---	S	1.647	.713	.292	5.649	***
Aw	<---	S	.977	.409	.209	4.685	***
Im	<---	E	1.000	.719			
Cr	<---	E	.233	.847	.088	2.655	.008
Ab	<---	E	.224	. 301	.099	2.866	.023
Di	<---	E	.968	.887	.092	10.536	***
Te	<---	PH	1.000	.658			
Dev	<---	PH	.536	.631	.208	2.875	.010
Rel	<---	INT	1.000	.616			
Pe	<---	INT	.981	.619	.104	9.418	***
Co	<---	INT	.877	.612	.094	9.336	***
St	<---	INT	1.090	.890	.099	10.997	***
Cu	<---	EN	1.000	.777			
Op	<---	EN	.882	.747	.073	12.141	***
Ma	<---	EN	.856	.767	.070	12.268	***

۴-نتیجه‌گیری

سرمایه اجتماعی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری نقش مهمی در بهبود ابعاد تاب‌آوری جوامع روستایی در شرایط خشکسالی دارد. ازآنجایی‌که افراد و جوامع به‌طور فزاینده‌ای با خطرات شدید و مکرر ناشی از تغییرات آب‌وهوایی مواجه می‌شوند و با توجه به آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی می‌توان ادعا کرد تقویت سیستم‌های اجتماعی و سرمایه اجتماعی به ظرفیت انطباق و کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها کمک می‌کند. این پژوهش با هدف کلی بررسی نقش سرمایه اجتماعی در بهبود ابعاد تاب‌آوری خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی در شهرستان مشهد انجام گرفت. نتایج وضعیت مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی خانوارهای روستایی نشان داد که خانوارها از نظر سرمایه اجتماعی در وضعیت مطلوبی قرار دارند و همان‌طوری که نتایج نشان می‌دهد از بین مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی، مؤلفه اعتماد اجتماعی و شبکه‌های اجتماعی در سطح بالایی قرار دارند. نتایج این بخش با نتایج تحقیق (Sabzehei et al., 2019) و (Savari & Abdeshahi, 2019) مبنی بر این که خانوارها از نظر سرمایه اجتماعی در وضعیت مطلوب و بالاتر از متوسط قرار دارند، مطابقت و همخوانی دارد. درحالی‌که نتایج تحقیق عینالی و همکاران (Einali, Farahani & Jafari, 2014) نشان داد که همه ابعاد سرمایه اجتماعی در دهستان سجاسرود شهرستان خدابنده پایین بوده‌اند و برخی از ابعاد شاخص سرمایه اجتماعی ازجمله نگرش مردم و انسجام اجتماعی تأثیر کمی در کاهش آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در روستاهای نمونه داشته‌اند. افرادی که شبکه‌های اجتماعی غنی دارند اعتماد اجتماعی بالاتری را به همراه خواهند داشت و سپس مشارکت اجتماعی خود را چه رسمی و چه غیررسمی ارتقا خواهند داد. بنابراین می‌توان گفت سرمایه اجتماعی همانند سایر اشکال سرمایه یک تولیدکننده است و به‌تبع

مقاصد گویایی را دنبال می‌کند که منزلت آن‌ها در تحرک چرخه اقتصاد و اشتغال نمودار می‌شود (Koutsou, Partalidou & Ragkos, 2014). لذا می‌توان از این سرمایه در راستای اهداف مهمی همچون تاب‌آوری جوامع روستایی در برابر مخاطرات و تنش‌های اقلیمی بهره گرفت. همچنین میزان سرمایه اجتماعی از منظر توزیع فضایی حاکی از این است که دهستان‌های قسمت شمالی شهرستان مشهد نسبت به دهستان‌های میانی، شرقی و جنوب غربی شهرستان از سطح سرمایه اجتماعی بالاتری برخوردارند.

نتایج این مطالعه همچنین گویای این است که میانگین تمامی ابعاد تاب‌آوری به‌جز بعد محیطی و کالبدی زیر حد متوسط قرار داشته است؛ به‌عبارت‌دیگر چنانچه نقطه مقابل تاب‌آوری را آسیب‌پذیری در نظر بگیریم، گرایش متوسط جامعه آماری موردمطالعه بیشتر متمایل به آسیب‌پذیری بوده و از حیث تاب‌آوری در شرایط خشکسالی در وضعیت مناسبی قرار ندارد. همچنین میزان تاب‌آوری از منظر توزیع فضایی حاکی از این است که دهستان‌های قسمت شمالی، جنوبی، میانی، غربی و جنوب غربی نسبت به دهستان جنوب شرقی شهرستان از سطح تاب‌آوری بالاتری برخوردارند. نتایج تحلیل همبستگی نیز حاکی از رابطه مثبت و معنی‌داری بین سرمایه اجتماعی و تمامی ابعاد تاب‌آوری روستاییان موردمطالعه بود. به‌طوری‌که میزان همبستگی محاسبه شده بین دو متغیر سرمایه اجتماعی و میزان تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی با تأکید بر خشکسالی در بعد اقتصادی برابر با ۰/۷۰۹، در بعد اجتماعی برابر با ۰/۶۸۹، در بعد کالبدی برابر با ۰/۶۲۲، در بعد نهادی برابر با ۰/۵۸۹ و در بعد محیطی برابر با ۰/۶۶۶ است؛ بنابراین می‌تواند اذعان داشت که هر چه سرمایه اجتماعی در بین جوامع بهبود یابد میزان تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی با تأکید بر خشکسالی افزایش پیدا می‌کند. نتایج این بخش با نتایج مطالعات مک اون و همکاران (McEwen, Holmes, Quinn & Cobbing, 2018)، سبزه‌ای و همکاران(Sabzehei et al., 2019) و سواری و عبدشاهی(Savari & Abdeshahi, 2019) مبنی بر ارتباط مثبت و معنی‌دار بین سرمایه اجتماعی و تاب‌آوری، مینانی و همکاران (Minani, Rurema & Lebailly, 2013) و پژوهان و همکاران(Pazhuhan et al., 2023) مبنی بر این که سرمایه اجتماعی ازجمله سرمایه پیوندی به‌طور مثبت تأثیر قابل‌توجه و به سزایی بر ظرفیت تاب‌آوری جامعه و روستاییان در مقابل تغییرات آب‌وهوایی و مدیریت بحران داشته است مطابقت و همخوانی دارد. همچنین در این زمینه مطالعات پتزولد و راتر (Petzold & Ratter, 2015) نشان می‌دهند که در ارتباط با انطباق‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی سرمایه اجتماعی نقش زیادی دارد به‌طوری‌که هر جامعه که در سطح بالایی از سرمایه اجتماعی قرار دارد از میزان تاب‌آوری بالاتری در مقابله با بلایای طبیعی برخوردار است و به همان میزان آسیب‌پذیری کمتری دارد.

برآورد معادلات ساختاری نشان داد که ابعاد سرمایه اجتماعی روستاییان شامل مؤلفه‌های اعتماد اجتماعی، شبکه‌های اجتماعی و تأثیر مثبت و معنی‌داری بر تاب‌آوری آنان دارد. درواقع در میان ابعاد سرمایه اجتماعی خانوارهای روستایی، شبکه‌های اجتماعی نسبت به سایر ابعاد، تأثیر بیشتری در بهبود تاب‌آوری آنان دارد، پس از آن، ابعاد اعتماد اجتماعی و مشارکت به ترتیب بیشترین تأثیر را در بهبود تاب‌آوری دارند. شبکه‌های اجتماعی از طریق آگاه‌سازی و آموزش، تبادل تجربیات، تشکیل گروه‌های مشارکتی و ارتباط با نهادهای مرتبط باعث بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی می‌شود. شبکه‌های اجتماعی می‌توانند به‌عنوان وسیله‌ای برای آگاه‌سازی روستاییان از راه‌های مقابله با مخاطرات و آموزش مهارت‌های لازم در مواجهه با آن‌ها عمل کنند. علاوه بر این افراد روستایی می‌توانند تجربیات خود را در مقابله با مخاطرات با دیگران به اشتراک بگذارند و از تجربیات دیگران نیز بهره‌برداری کنند. همچنین می‌توانند به تشکیل گروه‌های مشارکتی در روستاها کمک کنند. این گروه‌ها می‌توانند در برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های تاب‌آوری مشارکت داشته باشند و روستاییان را قادر می‌سازد تا با نهادهای دولتی، محیطی و غیردولتی در ارتباط با مخاطرات و تاب‌آوری همکاری کنند. این شبکه‌ها به‌عنوان یک ابزار ارتباطی و تبادل اطلاعات، می‌توانند در تقویت توانمندی‌ها و مهارت‌های روستاییان برای مقابله با مخاطرات محیطی و اقتصادی مؤثر باشند. بنابراین می‌توان اذعان نمود که سرمایه اجتماعی با تقویت شبکه‌های اجتماعی از طریق اعتماد و همکاری متقابل، تاب‌آوری روستاییان را بهبود بخشیده و منجر به مدیریت منطقی بحران شده و میزان تلفات ناشی از آن را کاهش می‌دهد که با نتایج(Boyd et al., 2008) همخوانی و مطابقت دارد. همچنین براساس نتایج شاه و همکاران (Shah et al., 2024) بسیاری از افرادی که تحت تأثیر خطر سیل قرار گرفته‌اند به شبکه‌های اجتماعی قوی دسترسی ندارند. و این امر ممکن است مانع از توانایی آن‌ها برای به دست آوردن و درک اطلاعات در مورد خطرات احتمالی شود.

در زمینه اثرات عوامل پنهان سرمایه اجتماعی با بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی بیشترین اثر سرمایه اجتماعی مربوط به بعد اقتصادی تاب‌آوری خانوارها و کمترین اثر مربوط به بعد کالبدی بوده است. از بین شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی سرمایه اجتماعی بیشترین تأثیر را بر تنوع معیشتی و درآمدی و تسهیلات و اعتبارات را داشته است. تحقیقات نشان می‌دهد که سرمایه اجتماعی در تنوّع معیشتی نواحی روستایی نقش مهمی دارد. افزایش سرمایه اجتماعی باعث بهبود تنوّع معیشتی در نواحی روستایی می‌شود. در این زمینه مطالعات محمدی و همکاران(Mohammadi Yeganeh, Cheraghi & Yaripour, 2017)، نشان داد که بین افزایش سرمایه اجتماعی و تنوّع معیشت پایدار رابطه معناداری وجود دارد. همچنین مؤلّفه مشارکت اجتماعی بیش‌ترین تأثیر را بر پایداری معیشت داشته است. لذا مناطقی که دارای اقتصاد متنوع هستند، نسبت به برخی دیگر کمتر در برابر شوک‌های خارجی آسیب‌پذیر هستند. تحقیقات ساباتینو(Sabatino, 2019) نشان داده

است که فقط برای برخی از مناطق، بین شاخص سرمایه اجتماعی منطقه‌ای و شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی، همبستگی معناداری وجود دارد. مناطقی که سطح سرمایه بالاتری دارند، مناطقی هستند که قبل از شوک‌های اقتصادی اخیر، واکنش بهتری نشان داده‌اند. بااین‌حال، به نظر می‌رسد برخی از مناطق نیز با وجود حضور چشمگیر سرمایه اجتماعی، نتوانسته‌اند مانند سایر مناطق، واکنش مناسبی نشان دهند. حتی سرمایه اجتماعی به‌طور غیرمستقیم به توسعه مالی سیستم اقتصادی کمک می‌کند و دسترسی به اعتبارات را آسان‌تر می‌کند. همچنین تمایل روستاییان به مشارکت در گروه‌ها و تعامل آن‌ها با یکدیگر ضمن افزایش اعتمادبه‌نفس آن‌ها و تمایل به مشارکت و همکاری در تصمیم‌گیری‌ها و امور روستا موجب توانمندی اقتصادی افراد می‌شود (Story et al., 2020). تقویت ابعاد مختلف سرمایه اجتماعی سبب بهبود وضعیت اقتصادی روستاییان، افزایش تولید، کاهش هزینه‌ها، سرمایه‌گذاری، استفاده از نهاده‌های پربازده، استفاده ماشین‌آلات جدید، افزایش سود و درآمد و کاهش فقر می‌شود. از بین شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی سرمایه اجتماعی بر آموزش و مهارت تأثیرگذار بوده است. سرمایه اجتماعی به شدت با تاب‌آوری اجتماعی مرتبط است. افرادی که از سرمایه اجتماعی بالایی برخوردارند، توانایی یادگیری مهارت‌ها و افزایش دانش خود و در نتیجه بهبود وضعیت کاری و زندگی خود را دارند. در مدل‌های تاب‌آوری اجتماعی مبتنی بر سرمایه اجتماعی بر جنبه‌های عمومی همچون اعتماد اجتماعی، هنجارها و شبکه‌های اجتماعی (Saja, Goonetilleke, Teo & Ziyath, 2019)، مشارکت و آموزش و یادگیری (Khalili, Harre & Morley, 2015) تأکید می‌شود.

همچنین ساختار سازمانی در بین شاخص‌های تاب‌آوری نهادی بیشترین تأثیر را از سرمایه اجتماعی پذیرفته است. برخوردار بودن یک نهاد از سرمایه اجتماعی قوی می‌تواند به تاب‌آوری نهادی آن کمک کند. روابط قوی بین افراد در یک سازمان باعث شود که هنگام بروز مشکلات یا چالش‌ها، با یکدیگر همکاری کنند و به‌صورت جمعی پاسخ مناسبی را پیدا کنند. توجه به سرمایه اجتماعی و ترویج تعاملات اجتماعی در سازمان‌ها می‌تواند به تاب‌آوری و ایجاد محیطی پویا و انعطاف‌پذیر کمک کند. همچنین سرمایه اجتماعی به‌عنوان کنش‌های اجتماعی می‌تواند با ایجاد روحیه همیاری و همبستگی بین کارکنان و در نتیجه سازمان و جامعه نقش به سزایی را در افزایش تاب‌آوری فراهم کند که با نتایج فاضلی کبریا و همکاران (Fazeli kebria et al., 2021) مطابقت و همخوانی دارد.

از بین شاخص‌های محیطی تغییر الگوی کشت و مدیریت منابع آب و خاک بیشترین تأثیر را از سرمایه اجتماعی پذیرفته‌اند. سرمایه اجتماعی می‌تواند با ایجاد مشوق‌ها و جذابیت‌ها برای کشاورزان، تغییر الگوی کشت را ترویج دهد. هر چه خانوارهای روستایی، اراضی زراعی بیشتر و متنوع‌تری را زیرکشت محصولات زراعی ببرند میانگین تولید محصولات آنان افزایش می‌یابد و توانایی آنان در مواجه با خشکسالی ارتقا می‌یابد

(Lin, 2011). انتخاب و تغییر الگوی کشت می‌تواند پیامدهای مهمی در زندگی کشاورزان و جامعه‌ی روستایی داشته باشد. این پیامدها می‌توانند بر شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی، مانند مشارکت، کیفیت اشتغال، رفاه و امنیت اقتصادی، تأثیر بگذارند. علاوه بر این مدیریت صحیح منابع آب و حل مشکلات کم آبی به سطح بالایی از مشارکت، انسجام و اعتماد مردم به یکدیگر و اعتماد مردم به دولت و نهادهای دولتی و بالعکس نیاز دارد و بالا بودن سرمایه اجتماعی می‌تواند امکان تحقق این نوع مدیریت را فراهم نماید. دانشوری نسب (Daneshvari Nasab, 2018) در این زمینه اذعان می‌دارد با توجه به ماهیت منابع آب به‌عنوان یک منبع محدود و مشترک مورد استفاده گروه‌های مختلف جامعه از یکسو و با توجه به کارکرد سرمایه اجتماعی به‌عنوان یکی از وجوه و زمینه‌های کنش متقابل و همکاری افراد یک جامعه از سوی دیگر، می‌توان انتظار داشت بالا یا پایین بودن سرمایه اجتماعی در یک جامعه می‌تواند موجب تشدید یا کاهش تنش‌ها و مشکلات ناشی از کمبود آب گردد.

براساس یافته‌های پژوهش حاضر و با توجه به تأثیر سرمایه اجتماعی بر بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی؛ به‌منظور بهبود و ارتقا تاب‌آوری خانوارهای روستایی به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران پیشنهاد می‌شود با به‌کارگیری محرک‌ها و آموزش‌های مناسب از طریق گروه‌های خودجوش محلی با حمایت‌های مناسب دولتی، امکان ایجاد تشکل‌های روستایی نظیر صندوق تعاونی، صندوق اعتبارات خرد، انجمن‌های صنفی و غیره فراهم گردد. همچنین به سازمان‌های مستقر در روستا و یا سازمان‌های مربوطه پیشنهاد می‌شود که با متنوع نمودن فعالیت‌های خود و به‌کارگیری روش‌های مناسب مانند تشویق به ایجاد انجمن‌ها، تشکل‌ها و گروه‌های همکاری امکان مشارکت آنان را در زمینه‌های مختلف اجتماعی فراهم نمایند. چرا که هرگونه اقدام توسعه‌ای در مناطق روستایی نیازمند مشارکت و همبستگی در چارچوب شبکه‌های اجتماعی است. همچنین افزایش آگاهی کشاورزان نسبت به روش مدرن و کارآمد آبیاری با حضور در دوره‌های آموزشی مناسب را پیشنهاد می‌کنیم.

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول (مهری جهانسوزی)، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی دانشگاه زنجان است.

References

Aboushala, M., & Haj Ismail, S. (2022). Post-war rural resilience as a development strategy in theory and practice. *TRC Journal of Humanitarian Action*, *1*(1), 19-29. https://doi.org/10.55280/trcjha.2022.1.1.0003

Alam, G. M., Alam, K., & Mushtaq, S. (2017). Climate change perceptions and local adaptation strategies of hazard-prone rural households in Bangladesh. *Climate Risk Management, 17,* 52-63. http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2017.06.006

Aldrich, D. P. (2012). *Building resilience: Social capital in post-disaster recovery*. University of Chicago Press.

Aldrich, D. P., & Meyer, M. A. (2015). Social capital and community resilience. *American Behavioral Scientist, 59*(2), 254-269. https://doi.org/10.1177/0002764214550299

Avazpour, L. (2016). *The Role of Social Capital in Increasing of Usres Resilience in The Face of Retrogresive Trend of Rangeland (Case Study: kalpush Area, Mayamey District, Semnan Province).* Master's Thesis. Tarbiat Modares University, Tehran. [In Persian] https://parseh.modares.ac.ir/thesis/7071125

Azmi, A., & Nouri, M. (2017). The role of social capital in the management of natural hazards in rural settlements (Case Study: Kermanshah Mahidasht). *Geography (Regional Planning), 7*(26), 77-89. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1396.7.2.5.7

Boyd, E., Osbahr, H., Ericksen, P. J., Tompkins, E. L., Lemos, M. C., & Miller, F. (2008). Resilience and 'climatizing' development: examples and policy implications. *Development, 51*(3), 390-396. http://dx.doi.org/10.1057/dev.2008.32

Caldwell, K., & Boyd, C. P. (2009). Coping and resilience in farming families affected by drought. *Rural and Remote Health, 9*(2), 1-10. https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.496419638887416

Carrico, A. R., Truelove, H. B., & Williams, N. E. (2019). Social capital and resilience to drought among smallholding farmers in Sri Lanka. *Climatic Change, 155*, 195-213. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02449-y

Coles, E., & Buckle, P. (2004). Developing community resilience as a foundation for effective disaster recovery. *The Australian Journal of Emergency Management, 19*(4), 6-15. https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.375435145094637

Córdoba Vargas, C. A., Hortúa Romero, S., & León Sicard, T. (2020). Key points of resilience to climate change: a necessary debate from agroecological systems. *Climate and Development, 12*(6), 564-574. https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1664376

Daneshvari Nasab, A. (2018). *Sociology and comprehensive management of water resources*. Paper presented at the 6th Scientific Research Conference on Water and Soil Resources Management. [In Persian] https://civilica.com/doc/869506

Davoodpur, M. (2017). A*nalysis of capacity, resiliency and Social _ Economic Resilience and Vulnerability of Farmers to Confronting Drought, Case Study: Bijar Township, Najafabad district.* Master's Thesis. University of Zanjan. [In Persian]

Einali, J., Farahani, H., & Jafari, N. (2014). Evaluation of the role of social capital in reducing the effects of the earthquake accident in Sajasroud province, Khodabande city. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 14*(32), 93-115. [In Persian] http://jgs.khu.ac.ir/article-1-1831-fa.html

Endris, G. S., Kibwika, P., Hassan, J. Y., & Obaa, B. B. (2017). Harnessing social capital for resilience to Livelihood shocks: ethnographic evidence of Indigenous mutual support practices among rural households in eastern Ethiopia. *International Journal of Population Research, 2017*. https://doi.org/10.1155/2017/4513607

Farahani, H., & Jahansoozi, M. (2022). Analysis of rural households' resilience to drought in Iran, case study: Bajestan County. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 82*, 103331. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103331

Fazeli kebria, H., Shafagat, A., bahmani, a., & Karimi, M. (2021). The effect of social capital on resilience with emphasis on the mediating role of organizational citizenship behavior in crises Case study: Red Crescent staff of Kermanshah province. *Emergency Management, 10*(1), 73-81. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.6.6

Feldmeyer, D., Wilden, D., Kind, C., Kaiser, T., Goldschmidt, R., Diller, C., & Birkmann, J. (2019). Indicators for monitoring urban climate change resilience and adaptation. *Sustainability, 11*(10), 2931. https://doi.org/10.3390/su11102931

Fletcher, A. J., Akwen, N. S., Hurlbert, M., & Diaz, H. P. (2020). "You relied on God and your neighbour to get through it": social capital and climate change adaptation in the rural

Canadian Prairies. *Regional Environmental Change, 20*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01645-2

Fukuyama, F. (2001). *The end of order: social capital and its maintenance(*G. A. Tavasuli, Trans.). Tehran: Jame Iranian Publishing House. [In Persian]

Ghorbani, M., Avazpour, L., & Yoosefi, M. (2015). Analysis and Assessment of Social Capital in toward increasing of Local Communities Resilience and Sustainable Landscape Management. *Journal of Range and Watershed Managment*, *68*(3), 625-645. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jrwm.2015.56141

Heijman, W., Hagelaar, G., Van der Heide, M. (2019). Rural Resilience as a New Development Concept. In: Dries, L., Heijman, W., Jongeneel, R., Purnhagen, K., Wesseler, J. (eds). *EU Bioeconomy Economics and Policies: Volume II. Palgrave Advances in Bioeconomy: Economics and Policies.* Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28642-2_11

Hosseini, S., Roosta, K., Zamanipour, A., & Teymouri, M. (2018). Using structural equation modeling approach to investigate farmers' perception consequences of drought (case study: Birjand township, Iran). *Applied Ecology and Environmental Research, 16*(1), 521-534. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1601_521534

Iran Statistics Center. (2016). Statistical Yearbook of Razavi Khorasan Province. [In Persian]

Jamshidi, A., & Anabestani, A. (2022). Interpretive Structural modeling of factors affecting the development of resilience to climate change (with emphasis on drought) of villagers in west of Urmia Lake. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 11(42), 1-22. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161528.html?

Javadi, A., Ghahremanzadeh, M., Sassi, M., Javanbakht, O., & Hayati, B. (2023). Economic evaluation of the climate changes on food security in Iran: application of CGE model. *Theoretical and applied climatology, 151*(1-2), 567-585. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04289-w

Javadinejad, S., Dara, R., & Jafary, F. (2021). Analysis and prioritization the effective factors on increasing farmers resilience under climate change and drought. *Agricultural Research, 10*(3), 497-513. https://doi.org/10.1007/s40003-020-00516-w

Kako, M., & Mayner, L. (2019). The experience of older people in Japan four years after the tsunami. *Collegian, 26*(1), 125-131. https://doi.org/10.1016/j.colegn.2018.06.001

Khalili, S., Harre, M., & Morley, P. (2015). A temporal framework of social resilience indicators of communities to flood, case studies: Wagga wagga and Kempsey, NSW, Australia. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 13*, 248-254. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.009

Khan, N. A., Qiao, J., Abid, M., & Gao, Q. (2021). Understanding farm-level cognition of and autonomous adaptation to climate variability and associated factors: Evidence from the rice-growing zone of Pakistan. *Land Use Policy, 105*, 105427. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105427

Khatibi, S. A. (2017). *Assessment of Watershed Management Projects and Villagers' Resilience to Drought.* Master's thesis. Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]

Kim, H., & Marcouiller, D. W. (2021). Rural prospects for resilience: Planning sustainable livelihoods and coping with flood hazards along the US Mississippi River. *Society & Natural Resources, 34*(2), 168-187. https://doi.org/10.1080/08941920.2020.1775328

Koutsou, S., Partalidou, M., & Ragkos, A. (2014). Young farmers' social capital in Greece: Trust levels and collective actions. *Journal of Rural Studies, 34*, 204-211. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2014.02.002

Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience, 61*(3), 183-193. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4

Liu, S., Wen, Z., Su, J., Ming-lin Chong, A., Kong, S., & Jiang, Z. (2020a). Social trust, trust differential, and radius of trust on volunteering: evidence from the Hong Kong Chinese.

Journal of Social Service Research, 47(2), 276-291. https://doi.org/10.1080/01488376.2020.1758867

Liu, Z., & Yang, J. Z. (2020b). In the wake of scandals: how media use and social trust influence risk perception and vaccination intention among Chinese parents. *Health Communication, 36*(10), 1188-1199. https://doi.org/10.1080/10410236.2020.1748834

Malekan, A., Khani, F., Motiee Langroodi, H., & Darban Astaneh, A. (2020). The Impact of Social Capital on Improving Drought Resilience (Case Study: Kangaveh County Villages). *Regional Planning, 10*(38), 65-80. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22516735.1399.10.38.5.5

McEwen, L., Holmes, A., Quinn, N., & Cobbing, P. (2018). 'Learning for resilience': Developing community capital through flood action groups in urban flood risk settings with lower social capital. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 27*, 329-342. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.10.018

Mehra, D. (2018). Resilience of Communities & Role of Social Capital: A Revisit to Two Forest Communities from Vidarbha Region in Central India. *Journal for Research, 4*(02),83-87.

Meyer, M. A. (2018). Social Capital in Disaster Research. In: Rodríguez, H., Donner, W., Trainor, J. (eds) *Handbook of Disaster Research. Handbooks of Sociology and Social Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63254-4_14

Minani, B., Rurema, D.-G., & Lebailly, P. (2013). Rural resilience and the role of social capital among farmers in Kirundo province, Northern Burundi. *APSTRACT: Applied Studies in Agribusiness and Commerce, 7*(1033-2016-84232), 121-125. http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.164817

Mngumi, L. E. (2021). Exploring the contribution of social capital in building resilience for climate change effects in peri-urban areas, Dar es Salaam, Tanzania. *GeoJournal, 86*(6), 2671-2689. https://doi.org/10.1007/s10708-020-10214-3

Mohammadi Yeganeh, B., Cheraghi, M., & Yaripour, A. (2017). The Effects of Social Capital in Economic Diversity of Rural Households) Case Study: Zarin Dasht Dehestan- Darrehshahr County). *Journal of Research and Rural Planning, 5*(4), 1-15. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jrrp.v5i4.49243

Moore, M., Chandra, A., & Feeney, K. C. (2013). Building community resilience: what can the United States learn from experiences in other countries? *Disaster medicine and public health preparedness, 7*(3), 292-301. https://doi.org/10.1001/dmp.2012.15

Moreno, J., Lara, A., & Torres, M. (2019). Community resilience in response to the 2010 tsunami in Chile: The survival of a small-scale fishing community. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 33*, 376-384. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.024

Nasrnia, F., & Ashktorab, N. (2021). Sustainable livelihood framework-based assessment of drought resilience patterns of rural households of Bakhtegan basin, Iran. *Ecological Indicators, 128*, 107817. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107817

Panday, S., Rushton, S., Karki, J., Balen, J., & Barnes, A. (2021). The role of social capital in disaster resilience in remote communities after the 2015 Nepal earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 55*, 102112. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102112

Pazhuhan, M., Amirzadeh, M., Värnik, R., Pietrzykowski, M., Lopez-Carr, D., & Azadi, H. (2023). The impact of social capital on the resilience of flood-prone communities: The case study of northern Iran. *Environmental Development, 48*, 100902. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100902

Petzold, J., & Ratter, B. M. W. (2015). Climate change adaptation under a social capital approach – An analytical framework for small islands. *Ocean & Coastal Management, 112*, 36-43. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.003

Portal of the General Department of Meteorology, K. R. (2021). Retrieved from http://www.razavimet.ir. [In Persian]

Potnam, R. (2007). *Social capital, a collection of articles on social capital* (A. Khakbaz, Trans.). Tehran: Shirazeh Publication. [In Persian]

Ritchie, L. A. (2004). *Voices of Cordova: Social capital in the wake of the Exxon Valdez oil spill*: Mississippi State University.

Ritchie, L. A., & Gill, D. A. (2018). The role of social capital in community disaster resilience. *The disaster resiliency challenge: Transforming theory to action*, 112-139.

Roknedin Eftekhari, A., Moosavi, S. M., Poortaheri, M., & FarajzadehAsl, M. (2014). Analysis of the role of livelihood diversity to rural household resilience in drought condition: case study of the drought exposed areas of Isfahan province. *Journal of Rural Research, 5*(3), 639-662. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jrur.2014.53186

Rus, K., Kilar, V., & Koren, D. (2018). Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: A new literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 31*, 311-330. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.05.015

Sabatino, M. (2019). Economic resilience and social capital of the Italian region. *International Review of Economics & Finance, 61*, 355-367. https://doi.org/10.1016/j.iref.2019.02.011

Sabzehei, M. T., Soleimani, A., & Yousefi, n. (2019). Investigating the effect of social capital on the social resilience of villagers in the ciologyenvironmental risks (with an emphasis on the drought) Case study: villages of sub-strict Badar of Ravansar in 2018. *Two Quarterly Journal of Contemporary Sociological Research, 8*(14), 283-310. [In Persian] https://doi.org/10.22084/csr.2020.19770.1687

Sadeghloo, T., & Sojasi Qeidari, H. (2014). Ranking of Effective Factors for Farmer Resilience increasing Against of Natural Hazards (With emphasis on drought) Study area: rural farmer in Ijrud Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 3*(2), 129-154. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v3i2.29042

Saja, A. A., Goonetilleke, A., Teo, M., & Ziyath, A. M. (2019). A critical review of social resilience assessment frameworks in disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 35*, 101096. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101096

Salari, F., Hamidian, A., & Nasri, M. (2016). The Analysis of Local Benefesheries' Network Toward Improvement of Resilience and Sustainable Natural Ecosystems Management (Case Study: Gor-Gu Region, Boyer Ahmad District). *Journal of Natural Environment, 69*(2), 469-486. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jne.2016.59759

Savari, M., & Abdeshahi, A. (2019). Analysis of the Role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions in the County of Divandarreh. *Journal of Rural Research, 10*(2), 214-229. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jrur.2018.256365.1247

Sertse, S. F., Khan, N. A., Shah, A. A., Liu, Y., & Naqvi, S. A. A. (2021). Farm households' perceptions and adaptation strategies to climate change risks and their determinants: Evidence from Raya Azebo district, Ethiopia. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 60*, 102255. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102255

Shafeie, B., Barghi, H., & Ghanbari, Y. (2019). Analysis of the Effective Factors on Drought Management in Rural Areas, from the Viewpoint of Households (Case Study: Eslamaban Gharb). *Physical Geography Research, 51*(3), 403-416. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.274830.1007334

Shah, A. A., Khan, A., Ullah, A., Khan, N. A., & Alotaibi, B. A. (2024). The role of social capital as a key player in disaster risk comprehension and dissemination: lived experience of rural communities in Pakistan. *Natural Hazards, 120*, 4131-4157. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06372-5

Sharafi, L., Zarafshani, K., Keshavarz, M., Azadi, H., & Van Passel, S. (2020). Drought risk assessment: Towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran. *Ecological Indicators, 114*, 106276. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106276

Sharifian-Sani, M. (2002). Social Capital: Main Concepts and Conceptual Framework. *Social Welfare, 1*(2), 5-18. [In Persian] http://refahj.uswr.ac.ir/article-1-1738-fa.html

Shokri Firoozjah, P. (2017). Spatial Analysis of Resilience of Babol's Regions to Environmental Hazards. *Physical Social Planning, 4*(2), 27-44. [In Persian] https://psp.journals.pnu.ac.ir/article_4146_en.html?

Story, W. T., Tura, H., Rubin, J., Engidawork, B., Ahmed, A., Jundi, F., ... & Abrha, T. H. (2020). Social capital and disaster preparedness in Oromia, Ethiopia: An evaluation of the "Women Empowered" approach. *Social Science & Medicine, 257*, 111907. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2018.08.027

Straub, A. M., Gray, B. J., Ritchie, L. A., & Gill, D. A. (2020). Cultivating disaster resilience in rural Oklahoma: Community disenfranchisement and relational aspects of social capital. *Journal of Rural Studies, 73*, 105-113. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.12.010

Tiernan, A., Drennan, L., Nalau, J., Onyango, E., Morrissey, L., & Mackey, B. (2019). A review of themes in disaster resilience literature and international practice since 2012. *Policy Design and Practice, 2*(1), 53-74. https://doi.org/10.1080/25741292.2018.1507240

Tippens, J. A. (2020). Urban Congolese refugees' social capital and community resilience during a period of political violence in Kenya: a qualitative study. *Journal of Immigrant & Refugee Studies, 18*(1), 42-59. https://doi.org/10.1080/15562948.2019.1569744

Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I., Stahl, K., Hannaford, J., ... & Uijlenhoet, R. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience, 9*(2), 89-91. https://doi.org/10.1038/ngeo2646

Wang, C., Zhang, T., Xu, W., Ruan, H., & Tang, J. (2021). Social capital, technological empowerment, and resilience in rural China. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(22), 11883. https://doi.org/10.3390/ijerph182211883

Wang, P., Qiao, W., Wang, Y., Cao, S., & Zhang, Y. (2020). Urban drought vulnerability assessment–A framework to integrate socio-economic, physical, and policy index in a vulnerability contribution analysis. *Sustainable Cities and Society, 54*, 102004. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.102004

Yamamura, E. (2010). Effects of interactions among social capital, income and learning from experiences of natural disasters: A case study from Japan. *Regional Studies, 44*(8), 1019-1032. https://doi.org/10.1080/00343400903365144

Zhou, H., Wang, J. a., Wan, J., & Jia, H. (2010). Resilience to natural hazards: a geographic perspective. *Natural Hazards, 53*, 21-41. https://doi.org/10.1007/s11069-009-9407-y

Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.386-405 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.89088.1504 Open access

Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran)

Saeed Negahban[a*], Hamid Ganjaeian[b], Seyed Saedi Ghisarian[c], Atrin Ebrahimi[d]

[a] *Associate Professor in Geomorphology, Department of Geography, Shiraz University, Shiraz, Iran.*
[b] *PhD in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran.*
[c] *Bachelor of Natural Resources, Rangeland and Watershed Management, University of Malayer, Malayer, Iran.*
[d] *PhD in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.*

Received: 26 July 2024 ***Revised: 19 August 2024*** ***Accepted: 27 August 2024***

Extended Abstract

Introduction

Dust, or fine dust, refers to very small and light particles of silt, clay, or sand that are transported by the wind over long distances due to wind erosion and the spread of desertification. Dust storms have emerged as a significant threat to public health in recent years. This phenomenon is influenced by natural factors, such as climatic conditions, climate change, hydrogeomorphological features, and vegetation, as well as human factors, including land use changes, erosion, and other anthropogenic activities. Dust is one of the most harmful natural disasters in arid and semi-arid regions of the world, particularly in Iran, and has caused substantial environmental and human problems in these areas.

This phenomenon has significantly affected various aspects of life in the region in recent years. Among the areas exposed to dust-related hazards are the southwestern regions of Iran. Due to climatic conditions, wind speed and direction, and the presence of sand dunes, these areas are prone to becoming dust centers. This has resulted in frequent occurrences of dust storms over a large portion of the year in the southwestern regions of the country. Given the importance of the issue, this research investigates the concentration of dust in the southwestern region of Iran and analyzes the factors influencing its occurrence.

Material and Methods

[*] .Corresponding author: Saeed Negahban Email: Snegahban@shirazu.ac.ir Tel:+989191133750

How to cite this Article: Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghisarian, S., & Ebrahimi, A. (2024). Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 386-405.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

In this research, Google Earth images, MODIS satellite images, CHIRPS satellite images, and a 30-meter SRTM digital elevation model were utilized. The most important tools used in the research were Google Earth Engine (for preparing dust concentration maps and average precipitation and temperature maps of the region), Google Earth (for creating geomorphological unit maps), ArcGIS (for generating desired maps), and IDRISI (for implementing the WLC model).
Additionally, various indices and models were applied, the most notable being the AOD index (for generating dust concentration maps) and the WLC model (for identifying areas prone to dust center formation). This research was conducted in several stages.
In the first stage, the Google Earth Engine system, AOD index, and MODIS satellite images were used to prepare the dust concentration map for the study area from 2018 to 2022. In the second stage, the correlation between dust concentration and environmental factors, such as vegetation parameters, wind speed, precipitation, temperature, geomorphological units, and altitude, was analyzed. In the third stage, areas prone to dust center formation were identified using the WLC model.

Results and Discussion

Google Earth Engine and the AOD index were employed to assess the dust concentration in the southwest of the country. The analysis involved utilizing MODIS satellite images to generate dust concentration maps for the years 2018 to 2022. Based on these maps, the highest dust concentration was observed in the central regions of Khuzestan Province and the southern regions of Ilam Province. Conversely, the lowest dust concentration was recorded in areas adjacent to Horulazim Wetland, the Arvand River, and the southern coastline.
The relationship between the dust concentration index and environmental factors indicated that the highest dust concentrations were associated with areas characterized by low NDVI coefficients, low rainfall, high temperatures, low altitudes, and sand dunes.

Conclusion

The findings of this research showed that the correlation coefficients between dust concentration and the parameters of NDVI, wind speed, precipitation, temperature, and altitude were 0.63, 0.156, 0.557, 0.489, and 0.602, respectively. Additionally, the dust concentration coefficients in sand hills, plains, hills, and mountains were 0.71, 0.64, 0.47, and 0.23, respectively.
After analyzing the factors affecting dust concentration, a map of areas prone to dust center formation was generated based on the identified parameters. The results revealed that a significant portion of the study area, including the northwestern parts of Ahvaz City and the northern parts of Hovizeh City, showed a high potential for forming dust centers. Similarly, the areas between the cities of Omidieh and Ahvaz also demonstrated substantial potential for dust center formation.
The overall findings indicate that under the influence of environmental factors, a large portion of the southwestern regions of Iran is prone to dust center formation. Among the environmental factors, vegetation density played the most significant role in dust control. Therefore, the most effective solution to reduce and manage dust in the region is to establish vegetation in barren areas, particularly in the sand fields of the region.

Keywords: Dust Storms, AOD Index, NDVI Analysis, Environmental Factors, Southwest Iran.

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۴۰۵-۳۸۶

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI:10.22067/geoeh.2024.89088.1504 دسترسی آزاد

شناسایی کانون‌های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدوری (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران)

سعید نگهبان[۱]- دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

حمید گنجائیان- دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

سیدسعدی قیصریان- کارشناسی منابع طبیعی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

عطرین ابراهیمی- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۴/۵ تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۵/۲۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۶/۶

چکیده

گردوغبار ازجمله مخاطراتی است که تأثیر مستقیمی بر سلامت انسان و وضعیت زیست‌محیطی مناطق دارد. این مخاطره بخش زیادی از کشور ازجمله مناطق جنوب غربی آن را با تهدید مواجه کرده است. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این پژوهش شناسایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن است. در این تحقیق از تصاویر گوگل ارث، تصاویر ماهواره MODIS، تصاویر ماهواره CHIRPS و همچنین مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورداستفاده در تحقیق، سامانه گوگل ارث انجین، گوگل ارث، نرم‌افزارهای ArcGIS و IDRISI بوده است. همچنین در این تحقیق از شاخص‌ها و مدل‌های مختلفی ازجمله شاخص AOD و مدل WLC استفاده شده است. این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در مرحله اول با استفاده از شاخص AOD، نقشه غلظت گردوغبار منطقه تهیه شده است. در مرحله دوم به تحلیل ارتباط غلظت گردوغبار منطقه با عوامل محیطی پرداخته شده است و در مرحله سوم نیز مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار شناسایی شده است. بر اساس نتایج حاصله، ضریب همبستگی بین میزان غلظت گردوغبار منطقه با پارامترهای NDVI، سرعت باد، بارش، دما و ارتفاع به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۱۵۶، ۰/۵۵۷، ۰/۴۸۹ و ۰/۶۰۲ بوده است. ضریب غلظت گردوغبار در واحدهای تپه‌های ماسه‌ای، دشت، تپه‌ماهور و کوهستان به ترتیب وزن ۰/۷۱، ۰/۶۴، ۰/۴۷ و ۰/۲۳ به دست آمده است. همچنین بر اساس نتایج حاصله، بخش زیادی از منطقه موردمطالعه ازجمله مناطق شمال غربی شهر اهواز، مناطق شمالی شهر هویزه و مناطق حدفاصل شهرهای امیدیه تا اهواز پتانسیل زیادی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد.

[۱]. نویسنده مسئول ۰۹۱۹۱۱۳۳۷۵۰

Email: Snegahban@shirazu.ac.ir

کلیدواژه‌ها: طوفان‌های گرد و غبار ، شاخص AOD ، تحلیل NDVI ، عوامل محیطی ، جنوب غرب ایران.

۱-مقدمه

گردوغبار یا ریزگرد به ذرات بسیار کوچک و سبک، سیلتی و رسی یا ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر فرسایش بادی و گسترش بیابان‌زایی توسط باد تا مسافت‌های بسیار طولانی منتقل می‌شود (Jooybari, Rezaee, Soleimani & Davoodi, 2019). طوفان‌های گردوغبار ازجمله مخاطراتی است که در طی سال‌های اخیر سلامت مردم را با خطر مواجه کرده است (Kim, 2008). این پدیده تحت تأثیر عوامل طبیعی مانند وضعیت اقلیمی، تغییرات اقلیمی، وضعیت هیدروژئومورفولوژی و پوشش‌گیاهی (Hu et al., 2019; Wei et al., 2019) و همچنین عوامل انسانی مانند تغییرات کاربری اراضی، فرسایش و غیره قرار دارد (Hermas, Leprince & El-Magd, 2012). پدیده گردوغبار یکی از زیان‌بارترین بلایای طبیعی مناطق خشک و نیمه-خشک جهان و به‌خصوص ایران است و مشکلات زیست‌محیطی و انسانی را در این نواحی به وجود آورده است (Ranjbar, Bazgir, Namdar Khojasteh & Rostaminia, 2019). همچنین این پدیده در سال‌های اخیر جنبه‌های مختلفی از زندگی مردم را در این منطقه متأثر ساخته است (Azizi, Miri & Nabavi, 2012). درواقع، خطرات مربوط به پدیده گردوغبار از دو جنبه سلامتی و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل‌تأمل است. به‌طوری‌که هر گرم از ذرات گردوغبار، شامل یک‌میلیون سلول از باکتری‌هایی است که می‌تواند خطرات جدی در سیستم تنفسی ایجاد کند. از نظر پیامدهای اقتصادی و اجتماعی نیز گردوغبار موجب خسارت به اراضی کشاورزی، واحدهای اقتصادی، تأسیسات زیربنایی، بزرگراه‌ها، راه‌آهن و تهدید سلامت اجتماعی می‌شود (Karam, Sffari, Ahmadabadi & Anari, 2022).

ازجمله مناطقی که در معرض مخاطرات ناشی از گردوغبار است، مناطق جنوب غربی ایران است. این مناطق به دلیل وضعیت اقلیمی، سرعت و جهت باد و همچنین وجود ماسه‌های روان، مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار است. مخاطره گردوغبار تأثیر مستقیم بر سلامت انسان دارد و همچنین یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی کشاورزی محسوب می‌شود و همین مسئله سبب شده است تا این مخاطره به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی جنوب غربی کشور محسوب شود و تحقیق در این مسئله اهمیت و ضرورت بالایی داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، بررسی وضعیت گردوغبار جنوب غرب کشور و اینکه چه عواملی در وقوع و یا تشدید آن مؤثر است؟ بسیار ضروری است که در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

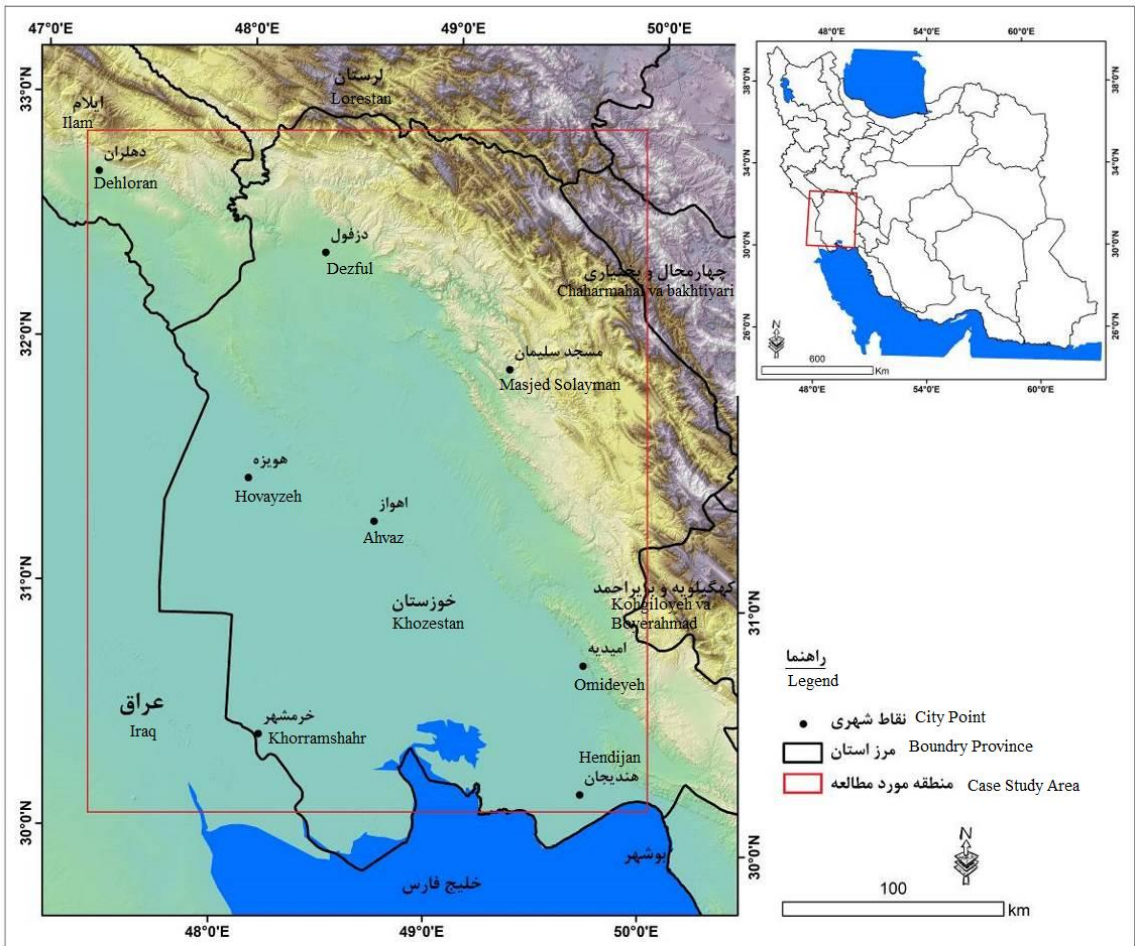
در ارتباط با موضوع موردمطالعه تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که ازجمله آن‌ها می‌توان به ژانگ و همکاران (Zhang, Tsunekawa & Tsubo, 2015) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر ماهواره مادیس نشان دادند که دریاچه‌های خشک، بستر رودخانه‌ها، معادن و زمین‌های زراعی در انتشار گردوغبار در شرق چین نقش مهمی داشته‌اند. کائو و همکاران (Cao, Amiraslani, Liu & Zhou, 2015) با

استفاده از تصاویر ماهواره لندست، منابع ایجاد گردوغبار در غرب آسیا را موردبررسی قرار دادند و نشان دادند که دشت دجله و فرات نقش مهمی در تأمین منبع گردوغبار این منطقه دارد. گوآن و همکاران (Guan, Huang, Zhang, Xie & Liu, 2016) نشان دادند که در بین فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر ایجاد گردوغبار، فعالیت‌های مربوط به بخش زراعت، بیش‌ترین اثرگذاری را دارند. پاراجولی و زندر (Parajuli & Zender, 2017) در تحقیقی نشان دادند که عوامل ژئومورفولوژی نقش مستقیمی در شکل‌گیری و الگوی گردوغبار در مقیاس جهانی دارد. کاترا (Katra, 2020) نشان داده است که انتشار گردوغبار در مناطق نیمه‌خشک باعث فرسایش خاک و تخریب اراضی کشاورزی می‌شود. کوک و همکاران (Kok et al., 2021) روند جهانی گردوغبار را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کردند. درگاهیان و همکاران (Dargahian, Lotfi Nasab Asl & Khosroshahi, 2019) نقش کانون‌های گردوغبار داخلی در ایجاد شرایط بحرانی در شهر اهواز را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داده است که جهت کلی گردوغبار از سمت شمال غرب است و در فصل سرد سال دارای بیش‌ترین فراوانی است. نوروزی و شعاعی (Noroozi & Shoaee, 2020) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات میدانی، نشان دادند که مناطق غربی و جنوب غربی استان خوزستان، پتانسیل بیش‌تری جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد. شایسته و همکاران (Shayeshteh, Gharib, Safikhani & Arabi, 2020) با استفاده از منطق فازی نشان دادند که مناطقی در شمال غرب استان همدان و همچنین بخش‌هایی از شرق و مرکز آن پتانسیل بالایی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارند. نامداری و همکاران (Namdari, Hajibaglou & Abazari, 2022) تغییرات کانون‌های گردوغبار داخلی ایران در بیست سال اخیر را بررسی کردند و۳۳ کانون گردوغبار را شناسایی کردند. چکی فورک و همکاران (Cheki Forak, Doostan & Minaei, 2023) با استفاده از روش‌های آماری و تصاویر ماهواره‌ای نشان دادند که بیش‌ترین تعداد روزهای گردوغبار در شهر بیرجند در طی سال‌های ۱۹۶۳ تا ۲۰۰۸، مربوط به ماه جولای بوده است. عزیزی و همکاران (Azizi, Neghah, Farid Mojtahedi & Shojaie, 2023) کانون‌های جدید گرد وخاک گسترش یافته در شمال ایران را بررسی کردند و نشان دادند که با توجه به گرادیان مناسب فشاری و افزایش سرعت باد، چشمه‌های مولد گردوخاک روی مناطق بیابانی راین شکل گرفته و با حاکمیت جریان‌های شمالی، توده گردوخاک به سمت استان گیلان گسیل می‌یابد. در راستای تحقیقات پیشین صورت گرفته، هدف از این پژوهش شناسایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن است.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه منطبق بر مناطق جنوبی استان ایلام و بخش زیادی از استان خوزستان است (شکل ۱). این منطقه از نظر مورفوتکتونیکی در واحد زاگرس چین‌نخورده قرار دارد و از سمت شرق به واحد زاگرس چین‌خورده منتهی می‌شود. از نظر تقسیمات حوضه‌ای، جزء حوضه آبریز خلیج‌فارس محسوب می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، بخش زیادی از منطقه منطبق بر واحد دشت است و از سمت شرق و شمال به واحدهای تپه‌ماهور و کوهستان منتهی می‌شود. با توجه به اینکه این منطقه دارای اختلاف ارتفاعی زیادی است (۰ تا ۲۹۵۰ متر از سطح دریا)، از نظر اقلیمی نیز دارای تنوع زیادی است به‌طوری‌که این منطقه دارای میانگین دمای سالانه بین ۲۵ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارش سالانه بین ۴۲ تا ۳۲۳ میلی‌متر است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه موردمطالعه

Fig.1. Location map of the study area

۲-۲-روش تحقیق

این تحقیق بر اساس روش‌های کمی، توصیفی و تحلیلی است. در این تحقیق از تصاویر گوگل ارث، تصاویر ماهواره MODIS، تصاویر ماهواره CHIRPS و همچنین مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورداستفاده در تحقیق، سامانه گوگل ارث انجین (به‌منظور تهیه نقشه غلظت گردوغبار، نقشه میانگین بارش و دمای منطقه)، گوگل ارث (به‌منظور تهیه نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه)، ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های موردنظر) و IDRISI (به‌منظور اجرای مدل WLC) بوده است. همچنین در این تحقیق از شاخص‌ها و مدل‌های مختلفی استفاده شده است که مهم‌ترین آن‌ها، شاخص AOD (به‌منظور تهیه نقشه غلظت گردوغبار منطقه) و مدل WLC (به‌منظور شناسایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار) بوده است. با توجه به موضوع و اهداف موردنظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (تهیه نقشه غلظت گردوغبار منطقه): در این مرحله به‌منظور تهیه نقشه غلظت گردوغبار منطقه از تصاویر ماهواره مادیس، سامانه گوگل ارث انجین و شاخص AOD استفاده شده است. در این مرحله ابتدا تصاویر ماهواره مادیس مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ فراخوانی شده است و با اعمال تابع مربوط به شاخص AOD، نقشه غلظت گردوغبار منطقه تهیه شده است. شاخص AOD معیاری برای تحلیل پدیدهٔ گردوغبار در یک منطقه است که افزایش این شاخص نشان‌دهنده افزایش غلظت گردوغبار در اتمسفر است. این شاخص شامل دو بخش ذرات گردوغبار با اندازهٔ کم‌تر از ۴۷ میکرون و بیش‌تر از ۵۵ میکرون تقسیم می‌شود (Beegum, Gherboudj, Chaouch, Temimi & Ghedira, 2018; Deep et al., 2021; Fathallah zadeh, Ranjbar Barough, Motamedirad & Hajikarimi Dolabi, 2023).

مرحله دوم (تحلیل عوامل مؤثر بر غلظت گردوغبار منطقه): در این مرحله به‌منظور تحلیل نقش عوامل محیطی در غلظت گردوغبار منطقه، به بررسی وضعیت همبستگی میزان غلظت گردوغبار با پارامترهای پوشش‌گیاهی، سرعت باد، بارش، دما، واحدهای ژئومورفولوژی و ارتفاع پرداخته شده است. در این مرحله به‌منظور بررسی وضعیت پوشش‌گیاهی منطقه، از سامانه گوگل ارث انجین، تصاویر ماهواره MODIS و شاخص NDVI استفاده شده است. به‌منظور بررسی وضعیت سرعت بادهای منطقه، از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک هندیجان، رامهرمز، ایذه، شوشتر، دزفول و دهلران استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه میانگین بارش منطقه، از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر ماهواره CHIRPS استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه میانگین دمای منطقه، از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر ماهواره MODIS استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه، از تصاویر گوگل ارث استفاده شده است و به‌منظور تهیه نقشه وضعیت ارتفاعی منطقه، از مدل رقومی ارتفاعی SRTM استفاده شده است. در این مرحله، پس از تهیه لایه-

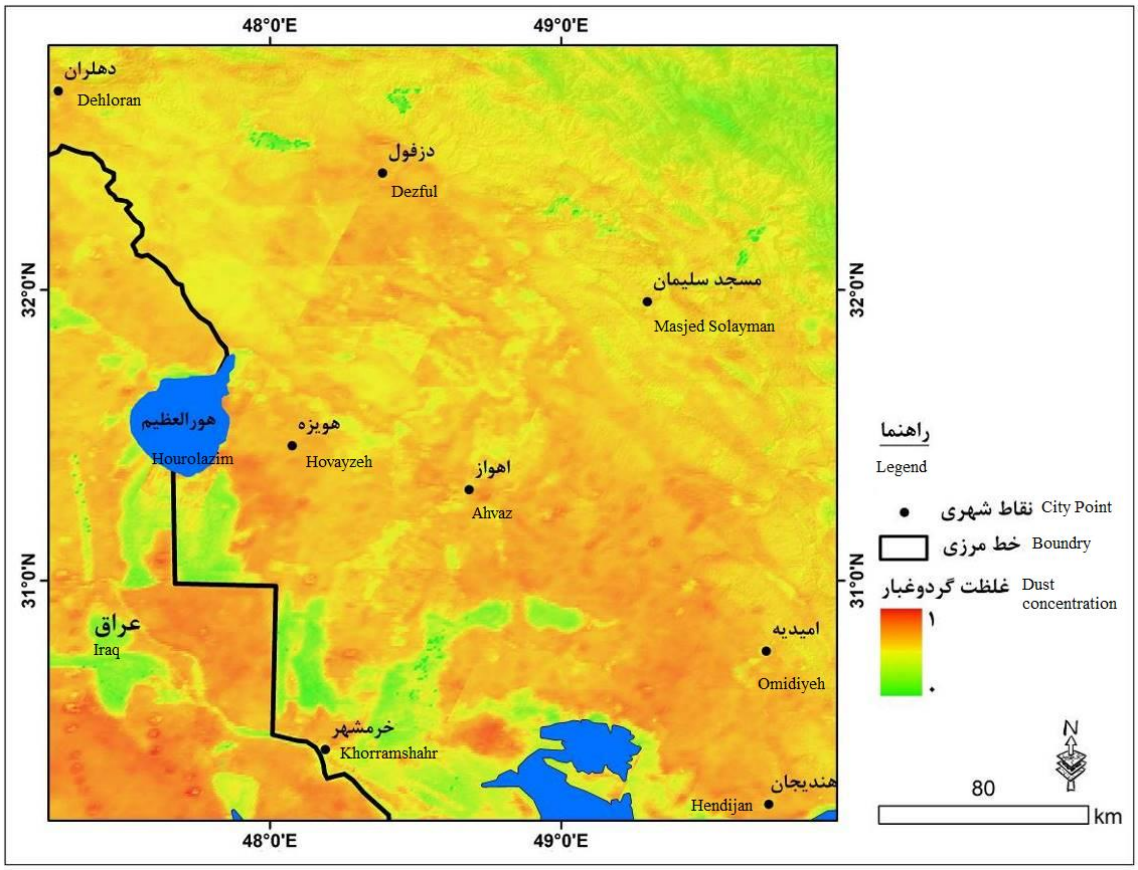
های اطلاعاتی مربوط به هر پارامتر، میزان همبستگی آن‌ها با پارامتر غلظت گردوغبار محاسبه و تحلیل شده است. لازم به ذکر است که پارامترها بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و وضعیت منطقه انتخاب شده‌اند.

مرحله سوم (شناسایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار): در این مرحله به‌منظور شناسایی کانون‌های گردوغبار از نتایج و پارامترهای مراحل قبل شامل پوشش‌گیاهی، سرعت باد، بارش، دما، واحدهای ژئومورفولوژی و ارتفاع استفاده شده است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر پارامتر و استانداردسازی آن‌ها، بر مبنای ضریب همبستگی به دست آمده در مرحله قبل (ضریب همبستگی هر پارامتر با شاخص AOD)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. پس از وزن‌دهی و اعمال وزن به دست آمده بر روی هر لایه، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار IDRISI شده است و درنهایت با استفاده مدل WLC با هم ترکیب و تلفیق شده و نقشه نهایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار تهیه شده است. روش WLC (ترکیب خطی وزنی) یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های ارزیابی چند معیاره محسوب می‌شود که روش وزن‌دهی جمع‌پذیر و یا روش امتیازدهی نیز نامیده می‌شود. اساس این روش بر مبنای میانگین وزنی است و تصمیم‌گیرنده‌ها مستقیماً بر مبنای اهمیت نسبی معیارها، وزن‌هایی به آن‌ها می‌دهد، سپس با ضرب وزن نسبی در مقدار آن معیار، یک وزن نهایی برای آن معیار به دست می‌آید. پس از به‌دست‌آمدن وزن نهایی گزینه‌ها، گزینه‌ای که بیش‌ترین مقدار را داشته باشد، مناسب‌ترین گزینه برای هدف مورد نظر خواهد بود (Rasouli, Mahmoudzadeh, Yazdchi & Zarinbal, 2012; Esfandiary Darabad, Layeghi, Mostafazadeh & Haji, 2021).

۳-نتایج و بحث

۳-۱- وضعیت غلظت گردوغبار در جنوب غرب کشور

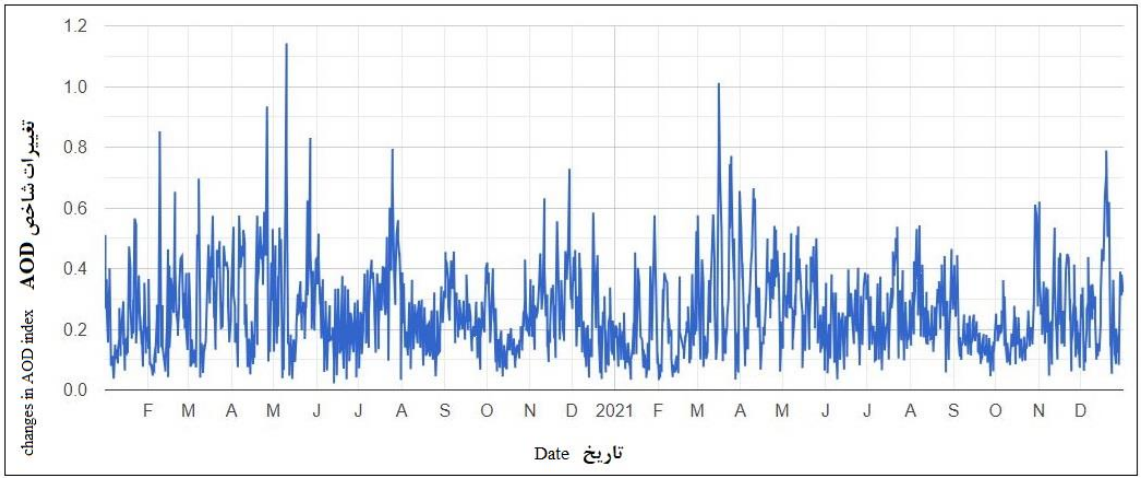
غلظت گردوغبار تعیین‌کننده سلامت آب‌وهوایی هر منطقه است و این پارامتر تحت تأثیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی قرار دارد. در این بخش با استفاده از شاخص AOD نقش وضعیت غلظت گردوغبار در جنوب غرب کشور تهیه شده است. بر اساس نقشه تهیه شده (لازم به ذکر است که مقادیر به دست آمده به‌صورت نسبی است، به همین دلیل به دلیل استانداردسازی نقشه، به مقادیر به دست آمده ارزشی بین صفر تا ۱ داده شده است که مقادیر نزدیک به ۱ دارای غلظت گردوغبار بیش‌تری است)، بیش‌ترین غلظت گردوغبار مربوط به مناطق میانی استان خوزستان و مناطق جنوبی استان ایلام بوده است و همچنین مناطق مجاور هورالعظیم، رودخانه اروند و خط ساحل جنوب کم‌ترین غلظت گردوغبار را داشته است.



شکل ۲- نقشه غلظت گردوغبار منطقه موردمطالعه

Fig. 2. Dust concentration map of the study area

نتایج آنالیز روند تغییرات زمانی غلظت گردوغبار نشان داده است که میزان غلظت گردوغبار در طی ماه‌های مختلف سال دارای اختلاف زیادی بوده است. بر اساس نمودار تهیه شده (شکل ۳)، بیش‌ترین میزان غلظت گردوغبار مربوط به ماه‌های آوریل تا ژوئن بوده است. بر این اساس می‌توان گفت که منطقه جنوب غرب کشور، در فصل بهار دارای غلظت گردوغبار بیش‌تری است.



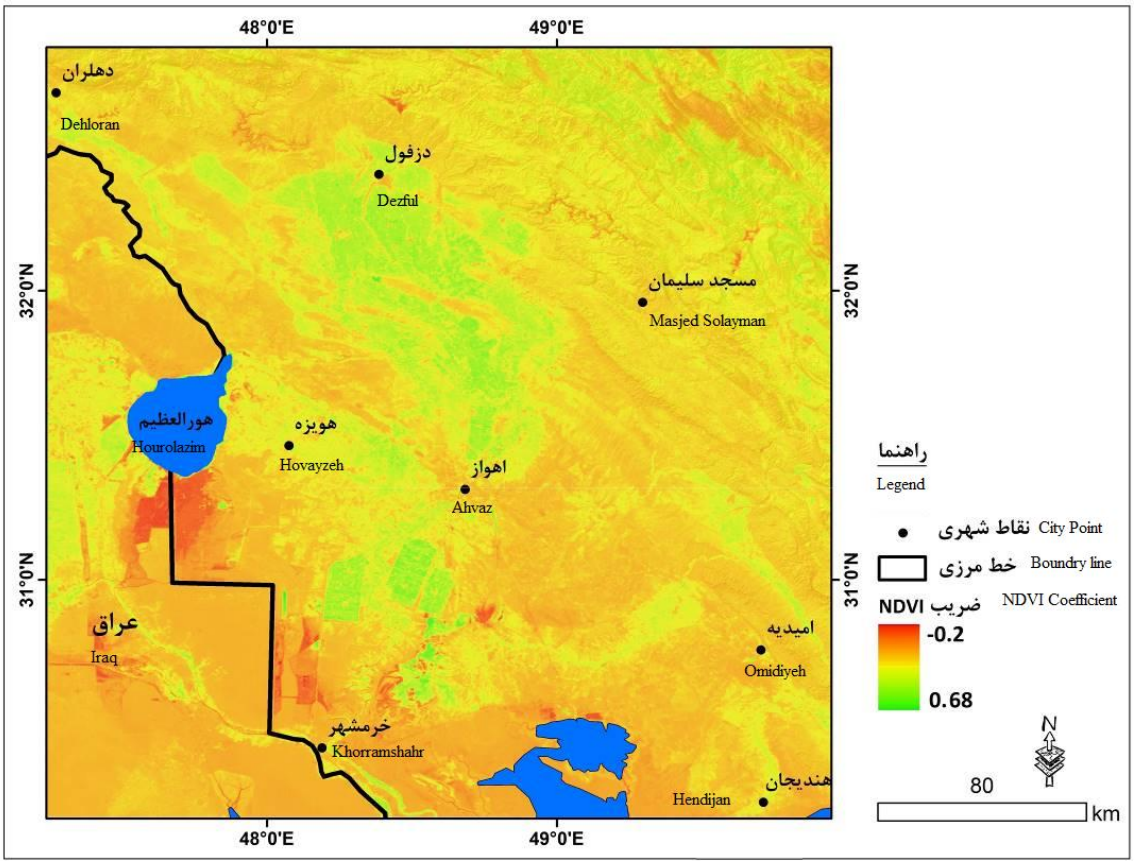
شکل ۳- نمودار روند تغییرات شاخص AOD

Fig. 3. Chart of changes in AOD index

۳-۲- عوامل مؤثر در غلظت گردوغبار جنوب غرب کشور

در این بخش به‌منظور تحلیل نقش عوامل مختلف در وضعیت گردوغبار منطقه از پارامترهای مختلف پوشش‌گیاهی، بارش، دما، ارتفاع، موقعیت ماسه‌های روان، سرعت و جهت باد استفاده شده است. در ادامه به تشریح نتایج حاصله از این بخش پرداخته شده است:

-**پوشش‌گیاهی:** با توجه به تنوع وضعیت هیدروژئومورفولوژی منطقه، این منطقه از نظر پوشش‌گیاهی نیز دارای تنوع زیادی است. بر اساس نقشه تهیه شده، ضریب NDVI منطقه بین ۰/۲- تا ۰/۶۸ است که بالاترین ضریب مربوط به مناطق مجاور تالاب هورالعظیم و رودخانه اروند است و کم‌ترین ضریب نیز مربوط به حدفاصل شهرهای اهواز تا دزفول بوده است. پس از تهیه نقشه شاخص NDVI منطقه، ضریب همبستگی بین شاخص‌های NDVI و AOD محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصله، ضریب به دست آمده معادل ۰/۶۳- بوده است که بیانگر رابطه غیرمستقیم و معنادار تراکم پوشش‌گیاهی با غلظت گردوغبار منطقه است.

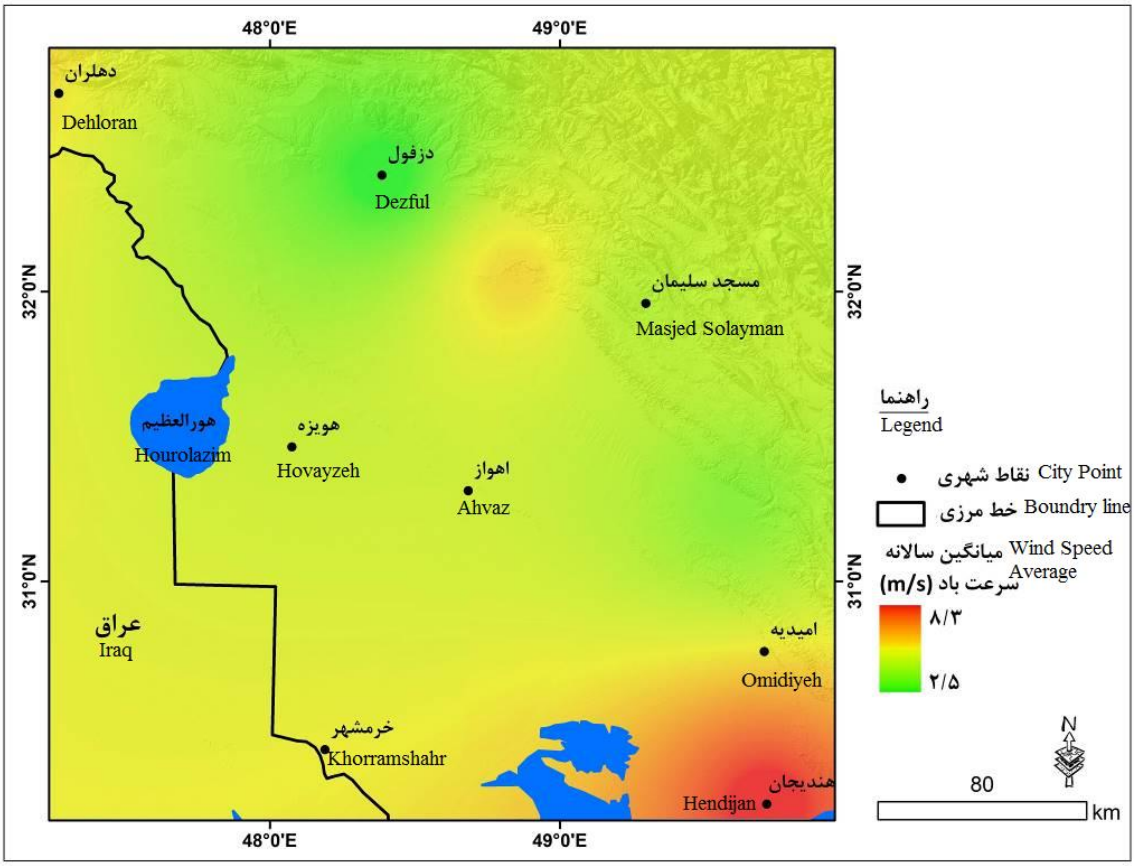


شکل ۴- نقشه شاخص NDVI منطقه موردمطالعه

Fig. 4. NDVI index map of the study area

سرعت باد: سرعت باد از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ایجاد گردوغبار است. در واقع، در صورت وجود ماسه‌های روان و سرعت لازم باد، گردوغبار شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه منطقه موردمطالعه از نظر وضعیت توپوگرافی و هیدرولوژی دارای تنوع زیادی است، بنابراین سرعت وزش باد در مناطق مختلف آن نیز متفاوت است. در این بخش به‌منظور بررسی وضعیت سرعت باد منطقه، از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک هندیجان، رامهرمز، ایذه، شوشتر، دزفول و دهلران استفاده شده است و با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه میانگین سالانه سرعت باد منطقه موردمطالعه تهیه شده است (شکل ۵). بر اساس نقشه تهیه شده، میانگین سالانه سرعت باد منطقه بین ۲/۵ تا ۸/۳ متر بر ثانیه است که بالاترین میانگین سرعت باد مربوط به مناطق جنوبی منطقه و کم‌ترین آن مربوط به مناطق مجاور شهر دزفول است. پس از تهیه نقشه درونیابی سرعت باد منطقه، ضریب همبستگی بین شاخص AOD و میانگین سالانه سرعت باد محاسبه شده است. براساس نتایج حاصله، ضریب به دست آمده معادل ۰/۱۵۶ بوده است که این مسئله بیانگر عدم ارتباط

معنادار بین سرعت باد و میزان غلظت هوا است. با توجه به اینکه سرعت باد عامل اصلی ایجاد گردوغبار است، پایین بودن ضریب همبستگی را می‌توان به عوامل طبیعی و خصوصاً وضعیت پوشش‌گیاهی نسبت داد.

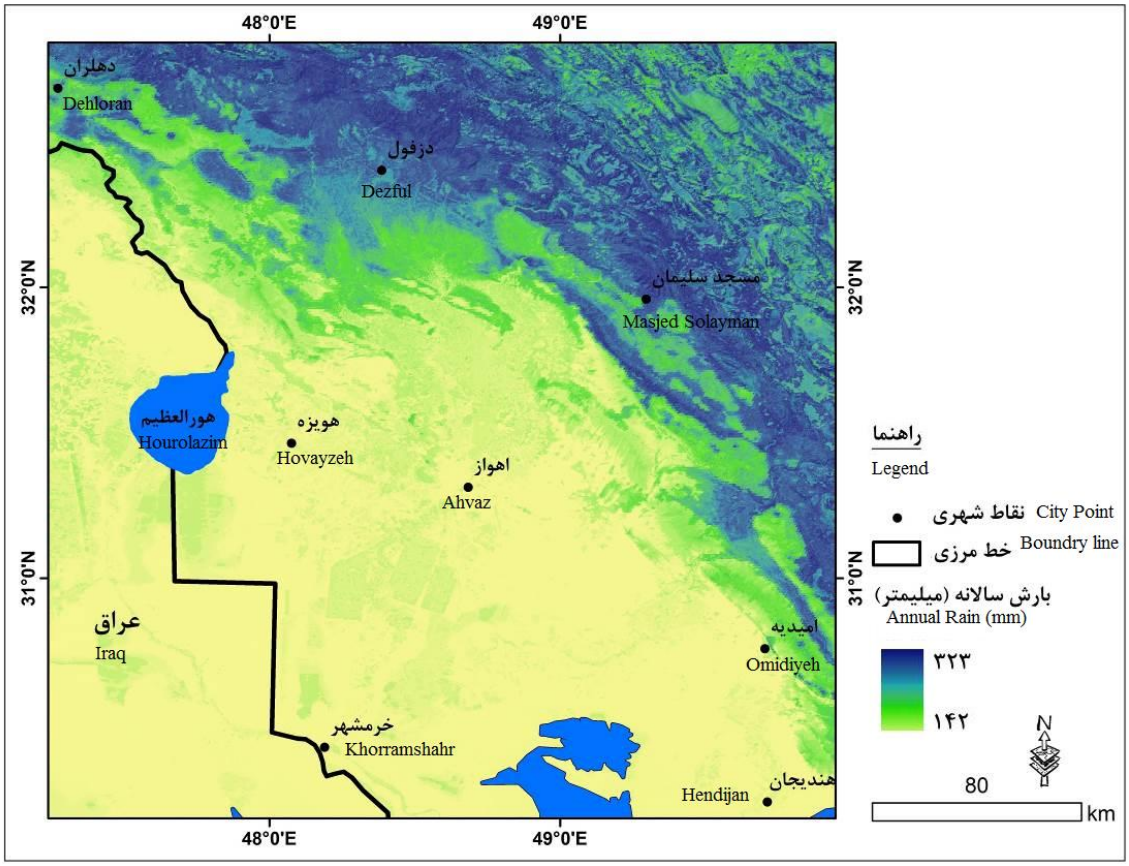


شکل ۵- نقشه میانگین سالانه سرعت باد منطقه موردمطالعه

Fig.5. Annual average wind speed map of the study area

بارش: با توجه به اینکه بارش نقش مستقیمی در تراکم پوشش‌گیاهی، میزان رطوبت، فرسایش، توسعه اراضی کشاورزی و فعالیت‌های انسانی و غیره دارد، این پارامتر ازجمله عوامل مهم در غلظت پوشش‌گیاهی در هر منطقه محسوب می‌شود. بر این اساس، در این پژوهش به‌منظور تحلیل تأثیر بارش بر غلظت گردوغبار منطقه، ابتدا با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین نقشه میانگین بارش سالانه منطقه در طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ تهیه شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه تهیه شده، در یک روند کلی، میانگین بارش سالانه از نوار مرزی به سمت مناطق شرقی منطقه دارای روند افزایشی بوده است. پس از تهیه نقشه بارش سالانه منطقه، ضریب همبستگی آن با شاخص AOD محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصله، ضریب به دست آمده معادل

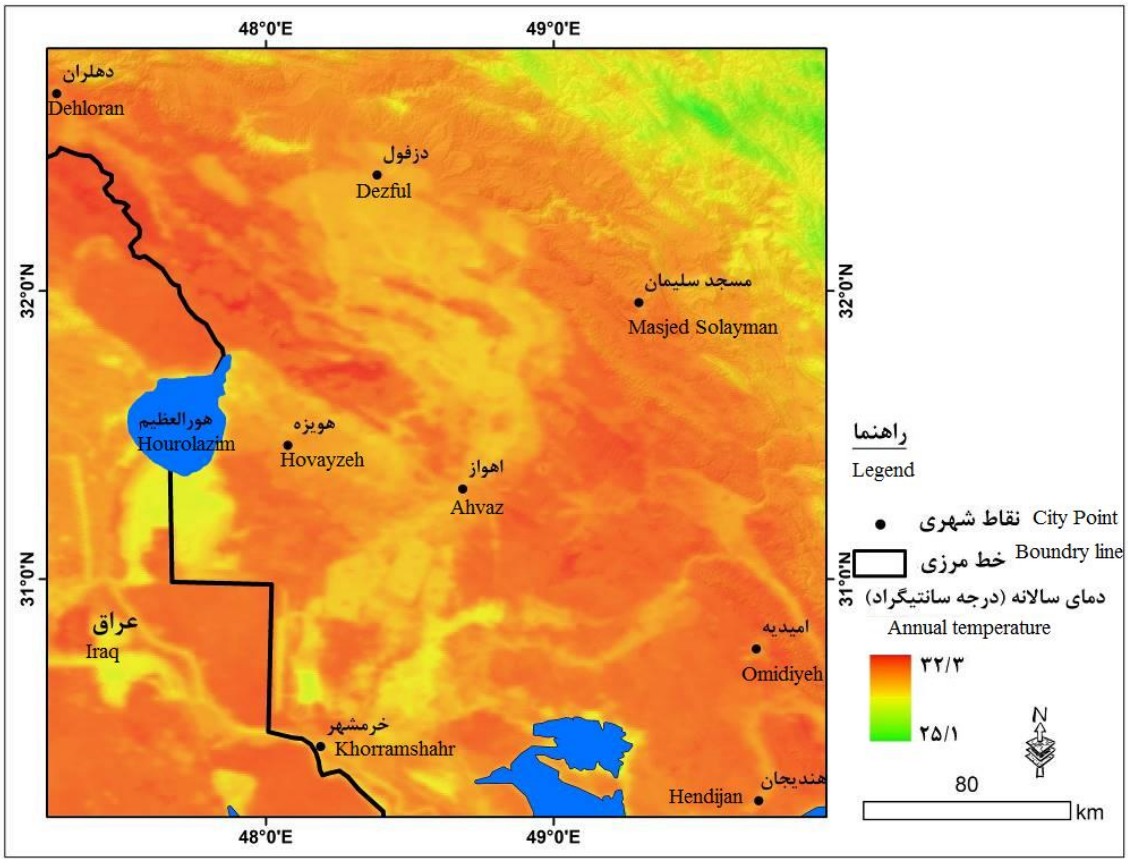
۰/۵۵۷- بوده است که این مسئله بیانگر ارتباط غیرمستقیم و معنادار بین بارش سالانه و غلظت گردوغبار منطقه است.



شکل ۶- نقشه میانگین بارش سالانه منطقه موردمطالعه

Fig. 6. Average annual precipitation map of the study area

دما: دما از دیگر پارامترهای اقلیمی است که به‌طور مستقیم بر میزان تبخیر، رطوبت، فرسایش، تراکم پوشش- گیاهی و غیره تأثیرگذار است و بر این اساس نقش مهمی در غلظت گردوغبار دارد. در بخش به‌منظور تحلیل تأثیر میانگین دمای منطقه بر غلظت گردوغبار، ابتدا با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، نقشه میانگین دمای سالانه منطقه در طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ تهیه شده است (شکل ۷). بر اساس نقشه تهیه شده، در یک روند کلی، میانگین دمای به سمت خط مرزی ایران دارای روند افزایشی است. پس از تهیه نقشه میانگین دمای سالانه منطقه، ضریب همبستگی آن با شاخص AOD محاسبه شده است. براساس نتایج حاصله، ضریب به دست آمده معادل ۰/۴۸۹ بوده است که این مسئله بیانگر ارتباط مستقیم و معنادار بین میانگین دمای سالانه و میزان غلظت گردوغبار منطقه است.



شکل ۷- نقشه میانگین دمای سالانه منطقه موردمطالعه

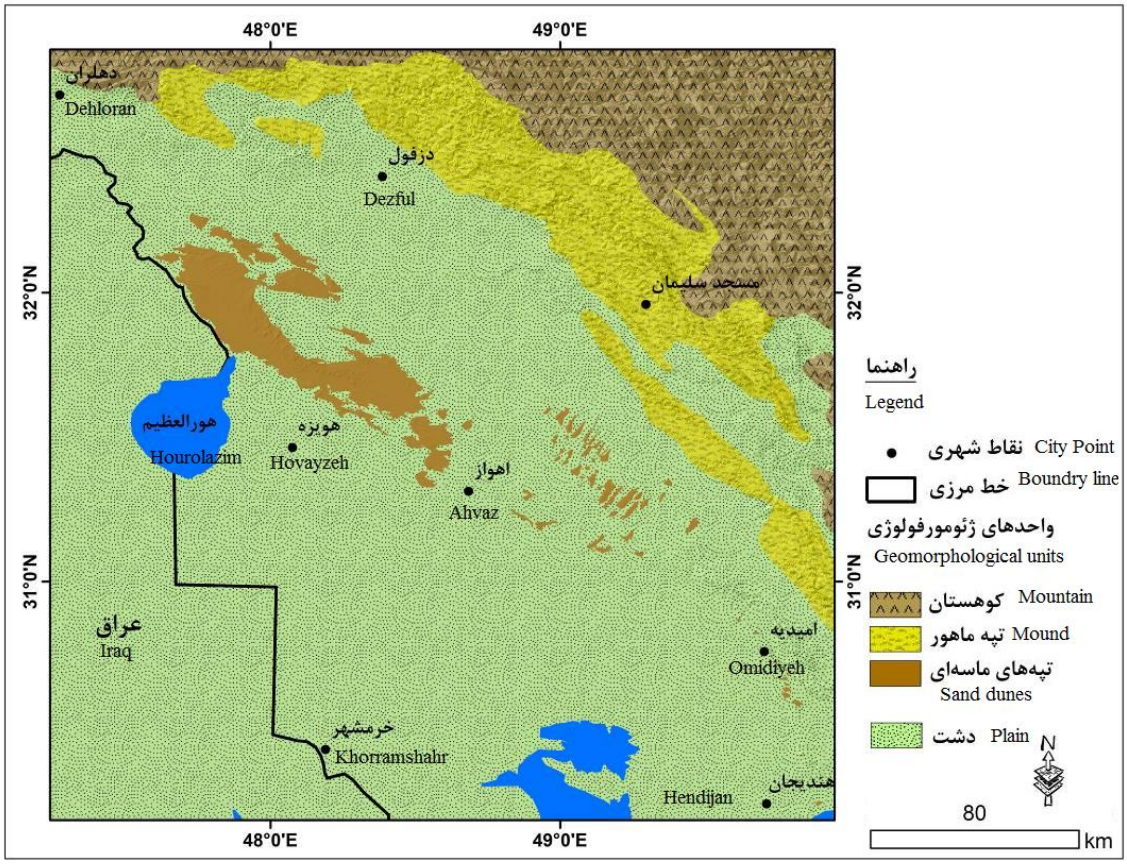
Fig.7. Average annual temperature map of the study area

واحدهای ژئومورفولوژی: وضعیت ژئومورفولوژی از دیگر عوامل مهم در تعیین کانون‌های گردوغبار است. در واقع، پتانسیل فرسایش، حمل ماسه، وضعیت پوشش‌گیاهی و غیره متأثر از وضعیت ژئومورفولوژی است. با توجه به اهمیت موضوع، در این بخش به‌منظور تأثیر وضعیت ژئومورفولوژی بر غلظت گردوغبار، ابتدا با استفاده از تصاویر گوگل ارث، نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه موردمطالعه تهیه شده است (شکل ۸). بر اساس نقشه تهیه شده، بخش زیادی از منطقه، منطبق بر دشت خوزستان است و در محدوده دشت خوزستان نیز واحدهای تپه‌های ماسه‌ای وجود دارد که پتانسیل زیادی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد. در این بخش به‌منظور بررسی تأثیر واحدهای ژئومورفولوژی در غلظت گردوغبار منطقه، میانگین غلظت گردوغبار در هرکدام از واحدهای ژئومورفولوژی محاسبه شده است (جدول ۱). بر اساس نتایج حاصله، بالاترین ضریب غلظت گردوغبار با ۰/۷۱ مربوط به واحد تپه‌های ماسه‌ای و پایین‌ترین ضریب غلظت گردوغبار با ضریب ۰/۲۳ مربوط به واحد کوهستان بوده است.

جدول ۱- میانگین غلظت گردوغبار در واحدهای ژئومورفولوژی منطقه

Table 1- Average dust concentration in the geomorphological units of the region

واحدهای ژئومورفولوژی **Geomorphological units**	کوهستان **Mountain**	تپه‌ماهور **Mound**	تپه‌های ماسه‌ای **Sand dunes**	دشت **Plain**
میانگین غلظت گردوغبار **Average dust concentration**	0.23	0.47	0.71	0.64

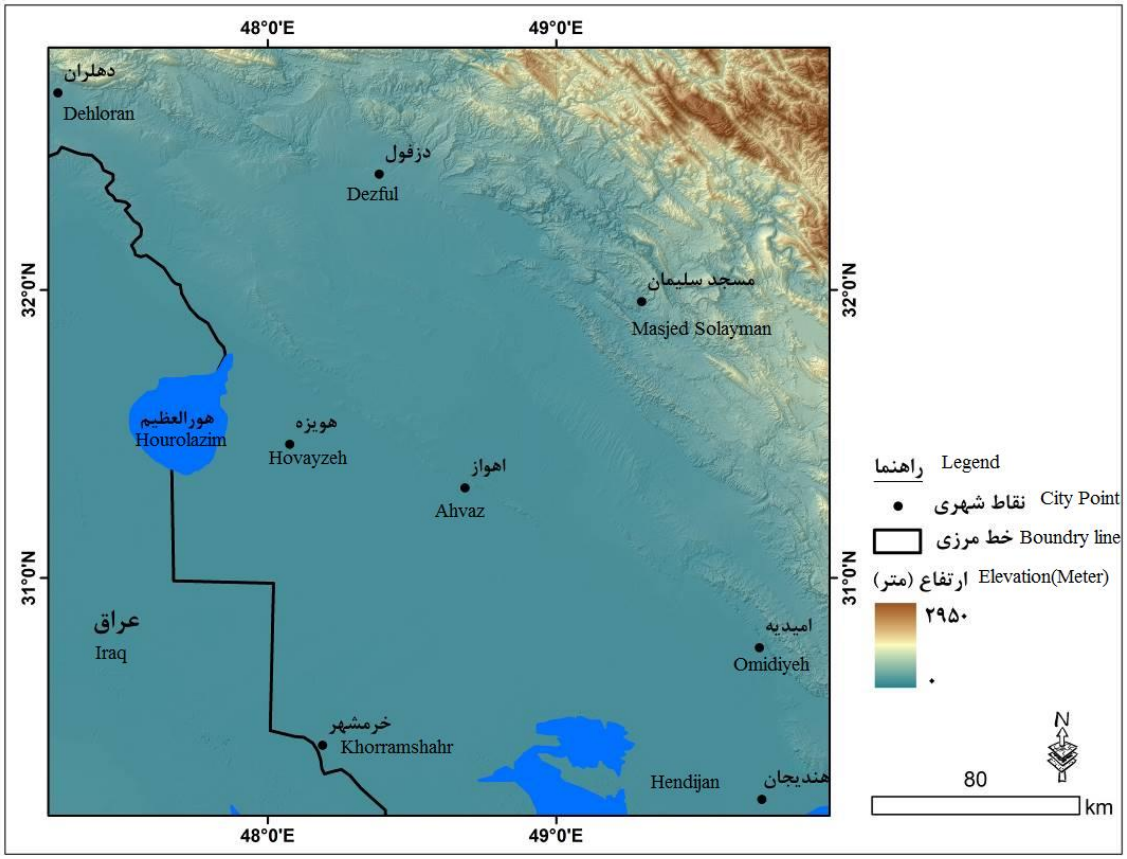


شکل ۸- نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه موردمطالعه

Fig. 8. Map of geomorphological units of the studied area

ارتفاع: ارتفاع به‌طور غیرمستقیم بر فعالیت‌های انسانی، وضعیت پوشش‌گیاهی، میزان رطوبت، فرسایش، تراکم ماسه‌های روان و غیره تأثیرگذار است. در شکل ۹ نقشه وضعیت ارتفاعی منطقه موردمطالعه نشان داده شده است که بر اساس آن، این منطقه در بین ارتفاع صفر تا ۲۹۵۰ متری از سطح دریا قرار دارد و در یک روند کلی، میزان ارتفاع از غرب به شرق و از جنوب به سمت شمال منطقه دارای روند افزایشی است. پس از تهیه نقشه وضعیت ارتفاعی منطقه، ضریب همبستگی آن با شاخص AOD محاسبه شده است. براساس نتایج

حاصله، ضریب به دست آمده معادل ۰/۶۰۲- بوده است که این مسئله بیانگر ارتباط غیرمستقیم و معنادار بین ارتفاع و میزان غلظت گردوغبار منطقه است.



شکل ۹- نقشه وضعیت ارتفاعی منطقه موردمطالعه

Fig. 9. Altitude map of the studied area

۳-۳-شناسایی کانون‌های گردوغبار

به‌منظور شناسایی کانون‌های گردوغبار از نتایج و پارامترهای مراحل قبل استفاده شده است. در این بخش ابتدا پارامترهای مورداستفاده استانداردسازی شده است که برای این منظور به مناطق با شاخص NDVI پایین‌تر، مناطق با میانگین سرعت باد بیش‌تر، مناطق دارای میانگین بارش کم‌تر، مناطق دارای میانگین دمای بیش‌تر، واحد تپه‌های ماسه‌ای و مناطق کم ارتفاع، ارزش نزدیک به ۱ داده شده است. همچنین به مناطق با شاخص NDVI بالاتر، مناطق با میانگین سرعت باد کم‌تر، مناطق دارای میانگین بارش بیش‌تر، مناطق دارای میانگین دمای کم‌تر، واحد کوهستان و مناطق مرتفع، ارزش نزدیک به۱ صفر داده شده است. پس از استانداردسازی لایه‌های مربوط به هر پارامتر، بر مبنای ضریب همبستگی به دست آمده در مرحله قبل

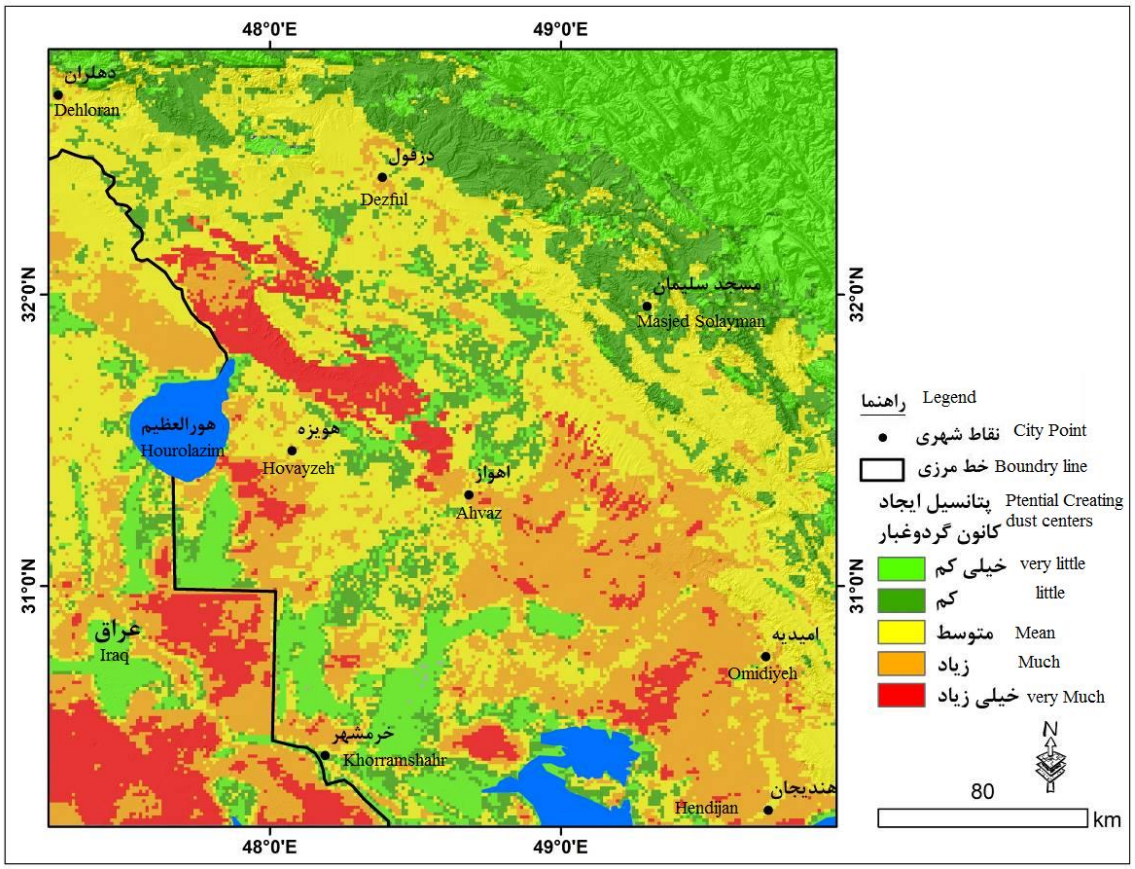
(ضریب همبستگی هر پارامتر با شاخص AOD)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است که بر این اساس لایه شاخص NDVI با وزن ۰/۶۳ (به دلیل اینکه ضریب همبستگی آن با شاخص AOD، ۰/۶۳ بوده است)، دارای بالاترین وزن بوده است. لازم به ذکر است که برای لایه واحدهای ژئومورفولوژی، به واحد تپه‌های ماسه‌ای، دشت، تپه‌ماهور و کوهستان به ترتیب وزن ۰/۷۱، ۰/۶۴، ۰/۴۷ و ۰/۲۳ داده شده است (جدول ۲).

جدول ۲- وزن پارامترهای مورداستفاده (ضریب همبستگی هر پارامتر با شاخص AOD)

Table 2- Weight of parameters used (correlation coefficient of each parameter with AOD index)

وزن Weight	پارامتر Parameter		وزن Weight	پارامتر Parameter
0.23	کوهستان Mountain		0.63	**NDVI**
0.47	تپه‌ماهور Mound	واحدهای ژئومورفولوژی Geomorphological units	0.156	**سرعت باد Wind speed**
0.71	تپه‌های ماسه‌ای Sand dunes		0.557	**بارش Rain**
0.64	دشت Plain		0.489	**دما Temperature**
			0.602	**ارتفاع Elevation**

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن به دست آمده بر روی هر لایه، به‌منظور تهیه نقشه نهایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار IDRISI شده است و با استفاده مدل WLC با هم ترکیب و تلفیق شده است و درنهایت نقشه نهایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار در ۵ کلاس تهیه شده است (شکل ۱۰). بر اساس نتایج حاصله، بخش زیادی از منطقه موردمطالعه ازجمله مناطق شمال غربی شهر اهواز و مناطق شمالی شهر هویزه که عمدتاً منطبق بر ریگزارهای منطقه است، پتانسیل خیلی زیادی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد. همچنین مناطق حدفاصل شهرهای امیدیه تا اهواز نیز پتانسیل زیادی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد.



شکل ۱۰- مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار در منطقه موردمطالعه

Fig.10. Areas prone to creating dust centers in the study area

۴-نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داده است که بخش زیادی از منطقه جنوب غربی کشور با مخاطره گردوغبار مواجه است. بر اساس نتایج حاصله از ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار منطقه، بیش‌ترین غلظت گردوغبار مربوط به مناطق میانی استان خوزستان و مناطق جنوبی استان ایلام بوده است و همچنین کم‌ترین میزان غلظت گردوغبار نیز مربوط به مناطق مجاور هورالعظیم، رودخانه اروند و خط ساحل جنوب بوده است. با توجه به اینکه ضریب همبستگی بین میزان غلظت گردوغبار منطقه با پارامترهای NDVI، سرعت باد، بارش، دما و ارتفاع به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۱۵۶، ۰/۵۵۷، ۰/۴۸۹ و ۰/۶۰۲ بوده است، بنابراین می‌توان گفت که همانند مناطق شرقی کشور (Fathallah zadeh et al., 2023)، عوامل محیطی نقش مهمی در تعیین وضعیت غلظت گردوغبار جنوب غربی کشور داشته است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که بخش زیادی از منطقه موردمطالعه ازجمله مناطق شمال غربی شهر اهواز و مناطق شمالی شهر هویزه که عمدتاً منطبق بر ریگزارهای منطقه است، همانند مناطق شمال غربی و شرقی استان همدان (Shayesteh et al., 2020) و مناطق مرکزی و شمالی استان قم (Karam et al., 2022)، پتانسیل خیلی زیادی جهت ایجاد کانون‌های گردوغبار دارد. مجموع

نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است تحت تأثیر عوامل محیطی، بخش زیادی از مناطق جنوب غربی کشور مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار است و در بین عوامل محیطی، وضعیت تراکم پوشش‌گیاهی، مهم‌ترین نقش را داشته است؛ بنابراین مهم‌ترین راهکار کنترل و کاهش گردوغبار منطقه، ایجاد پوشش‌گیاهی در مناطق فاقد پوشش‌گیاهی ازجمله ماسه‌زارهای منطقه است.

References

Azizi, G., Miri, M., & Nabavi, S. O. (2012). Tracking the phenomenon of dust in the western half of Iran. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, *3*(7), 63-81. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161302.html

Azizi, G., Neghah, S., Farid Mojtahedi, N., & Shojaie, Y. (2023). Detection of the new dust source for the north of the Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *10*(1), 157-174. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jsaeh.10.1.157

Beegum, S. N., Gherboudj, I., Chaouch, N., Temimi, M., & Ghedira, H. (2018). Simulation and analysis of synoptic scale dust storms over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, *199*, 62-81. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.003

Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J., & Zhou, N. (2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment*, *502*, 224-235. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.025

Cheki Forak, M., Doostan, R., & Minaei, M. (2023). Identification of Dust Centers in Birjand City. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, *13*(46), 61-84. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gaij.2023.42530.3034

Dargahian, F., Lotfi Nasab Asl, S., & Khosroshahi, M. (2019). Analysis of the role of internal dust sources in creating critical conditions in Ahvaz with an emphasis on the southeastern area. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, *16*(2), 157-170. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2019.118689

Deep, A., Pandey, C. P., Nandan, H., Singh, N., Yadav, G., Joshi, P. C., ... & Bhatt, S. C. (2021). Aerosols optical depth and Ångström exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(6), 324. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09048-4

Esfandiary Darabad, F., Layeghi, S., Mostafazadeh, R., & Haji, K. (2021). The zoning of flood risk potential in the Ghotorchay watershed with ANP and WLC multi-criteria decision making methods. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *8*(2), 135-150. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jsaeh.8.2.135

Fathallah zadeh, M., Ranjbar Barough, Z., Motamedirad, M., & Hajikarimi Dolabi, Z. (2023). Investigating the characteristics of wind and its relationship with the occurrence of dust in Zabol city using the system Google Earth Engine. *Quantitative Geomorphological Research*, *12*(3), 167-183. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.416114.1455

Guan, X., Huang, J., Zhang, Y., Xie, Y., & Liu, J. (2016). The relationship between anthropogenic dust and population over global semi-arid regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*(8), 5159-5169. http://dx.doi.org/10.5194/acp-16-5159-2016

Hermas, E., Leprince, S., & El-Magd, I. A. (2012). Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi-temporal optical remote sensing imagery, northwest Sinai Peninsula,

Egypt. *Remote Sensing of Environment, 121*(2), 51-60. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.002

Hu, Z., Huang, J., Zhao, C., Bi, J., Jin, Q., Qian, Y., ... & Ma, J. (2019). Modeling the contributions of Northern Hemisphere dust sources to dust outflow from East Asia. *Atmospheric Environment*, *202*, 234-243. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.022

Jooybari, S. A., Rezaee, P., Soleimani, F., & Davoodi, H. (2019). Dust and its centers: basics and methods of identifying and stabilizing, with a special attitude to the Khuzestan Plain. *Applied Sedimentology*, *7*(14), 129-142. [In Persian] https://doi.org/10.22084/psj.2019.3501

Karam, A., Sffari, A., Ahmadabadi, A., & Anari, A. (2022). Identification of dust centers based on wind characteristics and land cover condition (Case study: Qom province). *Quantitative Geomorphological Research*, *11*(1), 44-61. [In Persian] https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.296815.1290

Katra, I. (2020). Soil erosion by wind and dust emission in semi-arid soils due to agricultural activities. *Agronomy*, *10*(1), 89. http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10010089

Kim, J. (2008). Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965–2004). *Atmospheric Environment*, *42*(19), 4778-4789. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.040

Kok, J. F., Adebiyi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., ... & Wan, J. S. (2021). Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(10), 8169-8193. https://doi.org/10.5194/acp-21-8127-2021

Namdari, S., Hajibaglou, A., & Abazari, G. (2022). Analysis of changes in Iran's Dust hotspots in the last twenty years. *Journal of Geography and Planning*, *25*(78), 345-361. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gp.2021.42751.2739

Noroozi, A. A., & Shoaee, Z. (2020). Dust storm identification using satellite imagery & field observation. *Agricultural Information Sciences and Technology*, *2*(2), 29-35. [In Persian] https://doi.org/10.22092/aistj.2020.342192.1040

Parajuli, S. P., & Zender, C. S. (2017). Connecting geomorphology to dust emission through high-resolution mapping of global land cover and sediment supply. *Aeolian Research*, *27*, 47-65. http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2017.06.002

Ranjbar, H., Bazgir, M., Namdar Khojasteh, D., & Rostaminia, M. (2019). Identification of dust sources in Ilam province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *26*(3), 675-688. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120016

Rasouli, A. A., Mahmoudzadeh, H., Yazdchi, S., & Zarinbal, M. (2012). The Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Weighted Linear Combination (WLC) methods for landfill of Urban Solid Waste maerials Case Study: Marand County. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, *2*(4), 41-52. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gaij.2012.875

Shayeshteh, K., Gharib, S., Safikhani, M., & Arabi, S. A. (2020). Identifying Dust generation potential sources using fuzzy logic in Hamadan province. *Environmental Erosion Research Journal*, *10*(2), 59-74. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1399.10.2.4.7

Wei, T., Dong, Z., Kang, S., Rostami, M., Ulbrich, S., & Shao, Y. (2019). Hf-Nd-Sr isotopic fingerprinting for aeolian dust deposited on glaciers in the northeastern Tibetan Plateau region. *Global and Planetary Change*, *177*, 69- 80. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.015

Zhang, B., Tsunekawa, A., & Tsubo, M. (2015). Identification of Dust Hot Spots from MultiResolution Remotely Sensed Data in Eastern China and Mongolia. *Water, Air, & Soil Pollution*, *226*(117), 23-34. http://dx.doi.org/10.1007/s11270-015-2300-2

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

(Research Journal)

VOLUME 13, NO 52, Winter 2024

CONTENTS

- **Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm** 1
  Fariba Esfandyari Darabad, Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh
- **Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region** 27
  Mohammad Amin Izadipoor, Reza Dahmardeh Behrooz, Fatemeh Einollahipeer, Fatemeh Rajaei
- **Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)** 48
  Maryam Bayati Khatibi, Ruhullah Mohammadzadeh, Sadra Karimzadeh
- **Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards** 74
  Farideh Saeidianpour, Ali Jafari, Davood Mafi-Gholami
- **Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province** 102
  Roghayeh Jahdi, Mohammad Vasegh Alhaj khalaf
- **The Relationship Between Quantitative and Qualitative Networks of Groundwater with the Characteristics of Alluvial fan in The ...** 130
  Ali Rajabi Eslami, Manijeh Ghahroudi Tali, Alireza Salehipour Milani
- **Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrood sub-basins** 159
  Maryam Zare, Mahmood Azari, Mohsen Rezaei Arefi
- **Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia** 197
  Pouya Allahverdipour, Mohammad Taghi Sattari
- **Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023** 222
  Hamid Ganjaeian
- **Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed** 244
  SeyedAsdollah Hejazi, Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Jamshid Yarahmadi, Fariba Karami, Ali Bigham
- **Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin)** 269
  Mahin Saedpanah, Jamil Amanollahi
- **Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province)** 291
  Peyman Madanchi, Hamzeh Saeediyan, Mahmood Damizadeh
- **Spatial-Temporal behavior of the reactivation of the paleolandslide in Hossein abad Village, Kalpush, Northeast of Iran** 314
  Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan, Seyed Reza Hosseinzadeh, Gholam Reza Lashkaripour, Masoud Minaei, Hakimeh Morabbi Heravi
- **The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions (Case Study: Mashhad Township)** 344
  Mehri Jahansoozi, Hossein Farahani, Jamshid Einali, Behrooz Mohammadi Yeganeh
- **Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran)** 386
  Saeed Negahban, Hamid Ganjaeian, Seyed Saedi Ghisarian, Atrin Ebrahimi

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Editor-in-Chief:
Dr. S. R. Hosseinzadeh
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Director:
Dr. S. R. Hosseinzadeh
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Executive Manager:
Sayyed Mohammad Ali Moosavi

Managing Editor:
Dr.Masoud Rahimi

English Language Editor:
Maryam Mohammadi Shandiz

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

Iranian Editorial Board:

Dr. Morteza Akbari
Department of Natural Resources and Environment
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Hamid Ejtehadi
Department of Biology, Sciences
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Mohammad Reza Esfehani
Department of Civil Engineering
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Bakhtiar Feizizadeh
Department of Geography
University of Tabriz, Tabriz, Iran

Dr. Manijeh Ghahroudi Tali
Department of Geography
University of Alkharazmi, Tehran, Iran

Dr. Alireza Karimi
Department of Soil Sciences
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr.Golamreza Lashkaripour
Department of Geology Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Abolfazl Masudian
Department of Physical Geography
University of Isfahan, Isfahan, Iran

Dr. Masoud Minaei
Department of Geography Ferdowsi
University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Masoud Mirzaei Shahrabi
Department of Chemistry Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Hossein Mohammadzadeh
Department of Geology Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Alireza Rashki
Department of Natural Resources and Environment Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Hossein Shafizadeh-Moghadam
Department of Water Engineering and Management Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Dr. Shaban Shataee Joybari
Department of Forest Sciences
University of Gorgan, Gorgan, Iran

Dr. Kkalil ValizadehKamran
Department of Remote Sensing and GIS
Tabriz University, Tabriz, Iran

Dr. Mojtaba Yamani
Department of Physical Geography
University of Tehran, Tehran, Iran

Dr. Azar Zarrin
Department of Geography Ferdowsi
University of Mashhad, Mashhad, Iran

Geography and Environmental Hazards (ISSN:2322-1682) is published four times a year in June, September, December and March by Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Postal Code: 9177948883, Tel: +98(0) 5138805273 Fax: +98(0) 51 38794144
E-mail: geo.eh@um.ac.ir Website : http://geoeh.um.ac.ir

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

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).

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 13, NO 52, Winter 2024 Pages

- **Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm** **1**
  Fariba Esfandyari Darabad, Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh
- **Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region** **27**
  Mohammad Amin Izadipoor, Reza Dahmardeh Behrooz, Fatemeh Einollahipeer, Fatemeh Rajaei
- **Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)** **48**
  Maryam Bayati Khatibi, Ruhullah Mohammadzadeh, Sadra Karimzadeh
- **Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards** **74**
  Farideh Saeidianpour, Ali Jafari, Davood Mafi-Gholami
- **Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province** **102**
  Roghayeh Jahdi, Mohammad Vasegh Alhaj khalaf
- **The Relationship Between Quantitative and Qualitative Networks of Groundwater with the Characteristics of Alluvial fan in The ...** **130**
  Ali Rajabi Eslami, Manijeh Ghahroudi Tali, Alireza Salehipour Milani
- **Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrood sub-basins** **159**
  Maryam Zare, Mahmood Azari, Mohsen Rezaei Arefi
- **Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia** **197**
  Pouya Allahverdipour, Mohammad Taghi Sattari
- **Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023** **222**
  Hamid Ganjaeian
- **Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed** **244**
  SeyedAsdollah Hejazi, Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Jamshid Yarahmadi, Fariba Karami, Ali Bigham
- **Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin)** **269**
  Mahin Saedpanah, Jamil Amanollahi
- **Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province)** **291**
  Peyman Madanchi, Hamzeh Saeediyan, Mahmood Damizadeh
- **Spatial-Temporal behavior of the reactivation of the paleolandslide in Hossein abad Village, Kalpush, Northeast of Iran** **314**
  Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan, Seyed Reza Hosseinzadeh, Gholam Reza Lashkaripour, Masoud Minaei, Hakimeh Morabbi Heravi
- **The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions (Case Study: Mashhad Township)** **344**
  Mehri Jahansoozi, Hossein Farahani, Jamshid Einali, Behrooz Mohammadi Yeganeh
- **Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran)** **386**
  Saeed Negahban, Hamid Ganjaeian, Seyed Saedi Ghisarian, Atrin Ebrahimi

JOURNAL OF GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Research Journal

Volume. 13, No. 52, Winter 2024

- **Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm**
  Fariba Esfandyari Darabad, Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh
- **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
- **Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)**
  Maryam Bayati Khatibi, Ruhullah Mohammadzadeh, Sadra Karimzadeh
- **Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards**
  Farideh Saeidianpour, Ali Jafari, Davood Mafi-Gholami
- **Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province**
  Roghayeh Jahdi, Mohammad Vasegh Alhaj khalaf
- **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
- **Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrood sub-basins**
  Maryam Zare, Mahmood Azari, Mohsen Rezaei Arefi
- **Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia**
  Pouya Allahverdipour, Mohammad Taghi Sattari
- **Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023**
  Hamid Ganjaeian
- **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
- **Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin)**
  Mahin Saedpanah, Jamil Amanollahi
- **Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province)**
  Peyman Madanchi, Hamzeh Saeediyan, Mahmood Damizadeh
- **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
- **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
- **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

ISSN:2322-1682
Published by
Ferdowsi University of Mashhad