مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز

سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳

بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس) ۱-۱۷

محمدجعفر زارع، علی سلاجقه، سوسن سلاجقه، محسن کاظمی

میزان دستیابی به شاخص‌های حفاظت و استفاده پایدار از بوم‌سازگان‌ها در چارچوب اهداف توسعه پایدار در حوزه آبخیز شازند استان مرکزی ۱۸-۴۹

سیّدحمیدرضا صادقی، محدثه علیمحمدی‌ثانی، سیده‌هاجر اکبری، فاطمه نیکنام، فروزان جام‌گوهری، میترا جلیلیان، محمدمهدی ملک، رضا یاقوتی، مرجان بهلکه، رضا چمنی

مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار ۵۰-۷۲

محسن ذبیحی، حمیدرضا مرادی، عبدالواحد خالدی درویشان، مهدی غلامعلی‌فرد

سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران: تحلیلی کتاب‌سنجی بر پایه منابع بین‌المللی ۷۳-۹۴

سعید برخوری

مقایسه عملکرد مدل‌های XBeach، LightGBM و DBN به‌منظور پیش‌بینی سیلاب (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز طالقان) ۹۵-۱۱۱

رامتین طاوسی‌راد، صدف پیری، محمد انصاری قوجقار

واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (مبانی نظری، ابعاد کاربردی و تحلیل عوامل) ۱۱۲-۱۳۱

اردشیر مصباح، علی توحیدلو، اسماعیل کرمی‌دهکردی، امین صالح‌پور جم، توفیق سعدی

اقلیم‌شناسی حوزه‌های آبریز اصلی ایران ۱۳۲-۱۴۸

سید محمد حسینی

ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب ۱۴۹-۱۶۴

محمدرضا رئیسی دهکردی، امیرحسین یگانه مظهر

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز

سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

شاپا الکترونیکی **۴۵۸۱-۲۷۸۳**

صاحب امتیاز **دانشگاه ایلام با همکاری انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر ایران**

مدیر مسئول **دکتر نورالدین رستمی**

سردبیر **دکتر حاجی کریمی**

اعضای هیأت تحریریه

دکتر حسین ارزانی: استاد گروه آموزشی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دکتر غلامرضا زهتابیان: استاد مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دکتر فرود شریفی: استاد گروه پژوهشی هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

دکتر حاجی کریمی: استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر حمیدرضا ناصری: استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دکتر حسن پوربابایی: استاد گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دکتر محسن رضایی: استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دکتر ضرغام محمدی: استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دکتر حمیدرضا پورقاسمی: استاد گروه منابع طبیعی و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دکتر اباذر اسمعلی عوری: استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

دکتر مهدی حیدری: استاد گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر محسن توکلی: استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر نورالدین رستمی: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر مرزبان فرامرزی: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر لحسن بن عبیدات: استاد دانشکده علوم و تکنیک/ محیط زیست، دانشگاه سید محمد بن عبدالله، مراکش

دکتر پدرو جی. ام. کاستا: استادیار گروه علوم زمین، دانشگاه کویمبرا، پرتغال

مدیر داخلی **دکتر مهدی حیدری**

ویراستار انگلیسی **دکتر نورالدین رستمی**

ویراستار فارسی **دکتر نورالدین رستمی، دکتر رضا امیدی‌پور**

صفحه آرا و طراح جلد **دکتر رضا امیدی‌پور**

کارشناس نشریه **مریم ربانی**

نشانی: **ایلام، بلوار پژوهش، دانشگاه ایلام، دبیرخانه مجلات علمی دانشگاه.**

تلفکس: **۰۸۴۳۲۲۲۲۷۰۳**

صندوق پستی: **۵۱۶-۶۹۳۱۵**

پست الکترونیک: **iwm@ilam.ac.ir**

وب سایت مجله: **http://iwm.ilam.ac.ir**



فهرست

بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس)
محمدجعفر زارع، علی سلاجقه، سوسن سلاجقه، محسن کاظمی
۱-۱۷

میزان دستیابی به شاخص‌های حفاظت و استفاده پایدار از بوم‌سازگان‌ها در چارچوب اهداف توسعه پایدار در حوزه آبخیز شازند استان مرکزی
سیّدحمیدرضا صادقی، محدثه علیمحمدی‌ثانی، سیده‌هاجر اکبری، فاطمه نیکنام، فروزان جام‌گوهری، میترا جلیلیان، محمدمهدی ملک، رضا یاقوتی، مرجان بهلکه، رضا چمنی
۱۸-۴۹

مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار
محسن ذبیحی، حمیدرضا مرادی، عبدالواحد خالدی درویشان، مهدی غلامعلی‌فرد
۵۰-۷۲

سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران: تحلیلی کتاب‌سنجی بر پایه منابع بین‌المللی
سعید برخوری
۷۳-۹۴

مقایسه عملکرد مدل‌های *XBeach*، *LightGBM* و *DBN* به‌منظور پیش‌بینی سیلاب (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز طالقان)
رامتین طاوسی‌راد، صدف پیری، محمد انصاری قوجقار
۹۵-۱۱۱

واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (مبانی نظری، ابعاد کاربردی و تحلیل عوامل)
اردشیر مصباح، علی توحیدلو، اسماعیل کرمی‌دهکردی، امین صالح‌پور جم، توفیق سعدی
۱۱۲-۱۳۱

اقلیم‌شناسی حوزه‌های آبریز اصلی ایران
سید محمد حسینی
۱۳۲-۱۴۸

ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب
محمدرضا رئیسی دهکردی، امیرحسین یگانه مظهر
۱۴۹-۱۶۴

۱. نکات قابل‌توجه نویسندگان پیش از نگارش مقاله

۱-۱. اصول اخلاقی انتشار مقاله مندرج در اطلاعات نشریه را به دقت مطالعه فرمایید.

۱-۲. تمامی مقالات ارسالی به نشریه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، پیش از ورود به فرآیند داوری با نرم‌افزار مشابهت‌یاب بررسی خواهند شد.

۱-۳. با توجه به قلمرو و چشم‌اندازهای بخش اطلاعات نشریه و به‌دلیل تخصصی بودن، تنها موضوعات مربوط به مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز برای فصلنامه پذیرفته می‌شود.

۱-۴. نام و مشخصات نگارندگان باید به‌طور دقیق نوشته شود و نویسنده مسئول، هدایت اصلی نگارش مقاله را بر عهده دارد.

۱-۵. چاپ مقاله در این نشریه رایگان است.

۱-۶. نشریه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز آمادگی خود را برای چاپ چهار نوع مقاله اعلام می‌کند؛ لذا خواهشمند است پیش‌تر نوع مقاله خود را تعیین کنید تا بتوانید عنوان‌بندی مقاله را بر اساس آن تنظیم کنید.

۱-۷. پذیرش مقاله تنها از طریق سایت فصلنامه (iwm.ilam.ac.ir) امکان‌پذیر است.

۱-۸. مقاله ارسال شده باید حاصل کار پژوهشی و علمی باشد و نباید در هیچ نشریه داخلی یا خارجی یا مجموعه مقالات خارجی چاپ شده باشد و نویسندگان محترم تا هنگامی که جواب پذیرش یا رد از این نشریه دریافت نکرده‌اند، نباید مقاله خود را به نشریه دیگری برای چاپ یا بررسی ارسال نمایند.

۱-۹. زبان رسمی نشریه فارسی است؛ با این وجود، تهیه چکیده مبسوط انگلیسی برای همه مقالات ضروری است.

۱-۱۰. متن داخل جداول و شکل‌ها و عناوین آن‌ها به دو زبان انگلیسی و فارسی نوشته شوند. اعداد داخل جدول‌ها و شکل‌ها به‌صورت انگلیسی نوشته شود.

۱-۱۱. مقاله باید سلیس، روان و از نظر دستور زبان صحیح باشد و واژه‌ها با دقت کافی انتخاب شده باشد؛ همچنین پاراگراف‌بندی متن مقاله و تمامی قواعد ادبی (آیین نگارش فارسی) و ویراستاری ادبی و علمی باید رعایت گردد.

۱-۱۲. حجم مقاله شامل متن، شکل‌ها، جدول‌ها، نقشه‌ها، منابع و چکیده لاتین، با رعایت استانداردهای نشریه نباید از ۱۵ صفحه بیشتر شود.

۱-۱۳. مقالات برگرفته از پایان‌نامه و رساله دانشجویان با نام استاد راهنما، مشاور/مشاوران و دانشجو و با مسئولیت استاد راهنما منتشر می‌شود.

۱-۱۴. مسئولیت صحت‌وسقم مقاله، به لحاظ علمی و حقوقی بر عهده نویسنده یا نویسندگان است.

۱-۱۵. نشریه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، در راستای همگامی با استانداردهای نشر بین‌المللی، بنا را بر داوری هم‌تراز و دسترسی آزاد گذاشته است. در همین راستا این نشریه رویه داوری دوسو ناشناس (Double Blind Peer Review) را برگزیده است.

۱-۱۶. لازم است نویسندگان محترم فرم تعارض منافع و تعهدنامه مجله را تنظیم و به همراه فایل اصلی مقاله در قسمت فایل‌های پیوست بارگذاری فرمایند. برای شروع فرآیندهای ارزیابی مقاله، بارگذاری این فرم‌ها الزامی است.

۲. نکات قابل‌توجه نویسندگان برای نگارش مقاله

۲-۱. ساختار مقاله

ساختار مقاله بر اساس نوع آن تعیین می‌گردد. چهار نوع عمده مقالات عبارت‌اند از مقالات پژوهشی، مقالات فنی و ترویجی، مقالات مروری و مقالات کوتاه. در این نشریه حداکثر تعداد کلمات مقاله‌های پژوهشی و فنی و ترویجی ۵۰۰۰، مقاله‌های مروری ۲۵۰۰۰ و مقاله‌های کوتاه ۲۵۰۰ کلمه در نظر گرفته شده است. تعداد منابعی که برای هر مقاله لازم است به‌ترتیب حداقل ۳۰، ۵۰ و ۵ مورد است. از نظر تعداد جدول‌ها و شکل‌ها تنها مقالات کوتاه محدودیت دارند و آن نیز در مجموع سه جدول یا شکل را شامل می‌شود.

ساختار همه مقاله‌ها از چکیده، کلید واژه‌ها، متن اصلی و منابع تشکیل می‌شوند، ولی متن آن‌ها بر اساس نوع مقاله فرق می‌کند. متن مقاله‌های پژوهشی و فنی و ترویجی باید دارای مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری باشند، ولی متن اصلی مقالات مروری ساختار مشخصی ندارند؛ با وجود این، لازم است که در آن‌ها طرح مسئله، عنوان‌بندی بحث و نتیجه‌گیری، به‌خوبی و با روال مشخصی صورت گیرد. متن مقالات کوتاه نیز دارای بخش‌های عادی مانند مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث نیستند، ولی باید در آن‌ها طرح مسئله شود و توصیف مشاهدات به‌صورت منظم و پیوسته در قالب نتایج و بحث صورت گیرد.

در نوشتار باید توجه داشت که جملات، پاراگراف‌ها و حتی عنوان‌های مقاله باید از پیوستگی و انسجام برخوردار باشند. این امر به‌ویژه در مقدمه و بحث مقاله باید رعایت شود. شیوه طرح مسئله در مقدمه بسیار مهم است، لازم است نویسنده با سلیقه خود و با تکیه بر پیشینه و مبانی نظری پژوهش، خواننده را مجاب به ضرورت و نوآوری پژوهش خویش نماید. در بحث مقاله با استفاده از همین مبانی و پیشینه، مشاهدات مکمل، تجربیات دیگران، تجزیه‌وتحلیل‌های آماری و تفسیرهای منطقی به روایی و پایایی پژوهش بپردازد و در صورت امکان نشان دهد که پژوهش وی تا چه اندازه می‌تواند به محیط‌های دیگر تعمیم داده شود و در کدام نواحی می‌تواند کارایی داشته باشد.

در مقاله‌های مستخرج از پایان‌نامه از نگارش هر نوع فرضیه پژوهش یا آزمون آن‌ها در بحث یا نتایج پژوهش پرهیز شود و سعی بر آن باشد تا در سرتاسر مقاله، اهداف پژوهش دنبال شود.

۲-۲. سبک نگارش بخش‌های مختلف مقالات

به‌طور کلی متن هر بخش مقاله از مفاهیم ویژه‌ای و به‌منظور خاصی تشکیل می‌شود که نویسنده باید سعی کند در سرتاسر مقاله از خلط مطالب بپرهیزد، در هر جزء مطالب مربوط به آن را بیان کند و از حاشیه‌نویسی به‌منظور پر کردن مطالب دوری کند.

فایل نحوه آماده سازی مقاله جهت ارسال به نشریه را می توانید از اینجا دریافت نمایید. لازم به ذکر است در هنگام ارسال مقاله، این فایل می بایست بدون اسامی و مشخصات نویسندگان ارسال گردد و مشخصات نویسندگان در یک فایل جداگانه ارسال گردد و در مرحل نهایی و در صورت پذیرش مقاله، اسامی نویسندگان مطابق با قالب ذکر شده به مقاله اضافه می گردد.

۲-۲-۱. چکیده مبسوط انگلیسی

چکیده مبسوط انگلیسی با حداقل ۶۰۰ و حداکثر ۱۰۰۰ کلمه در ابتدای مقاله آورده شود. این چکیده، باید خلاصه‌ای از مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و درنهایت واژگان کلیدی باشد.

“Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusion, Keywords”

۲-۲-۲. چکیده مبسوط فارسی

چکیده مبسوط فارسی معادل دقیق چکیده مبسوط لاتین بوده و به‌طور عمده مشتمل بر موضوع پژوهش، روش و نتایج است و باید در آن از مقدمه‌چینی پرهیز شود. این چکیده، باید شامل بخش‌های مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و واژه‌های کلیدی باشد. تعداد کلمات این چکیده حداقل ۶۰۰ و حداکثر ۱۰۰۰ کلمه است.

۲-۲-۳. واژه‌های کلیدی

کلیدواژه‌ها حاوی سه تا پنج واژه مهم مرتبط با متغیرهای پژوهش یا موضوع است که نگارنده می‌خواهد در صورت جست‌وجوی این واژگان توسط پژوهشگران دیگر در اینترنت، مقاله خود را در معرض مطالعه آن‌ها قرار دهد.

۲-۲-۴. مقدمه

در مقدمه، مبانی نظری همراه با پیشینه به گونه‌ای منسجم، یکپارچه و پیوسته بیان می‌شود تا در نهایت بتواند موضوع و مسئله موردنظر پژوهش و آنچه در بوته ابهام است را مشخص کند. هدف نویسنده در نگارش این بخش از مقاله چینش پشت سرهم نقل‌قول‌ها به‌طور مجزا و نامربوط به هم نیست؛ بلکه هدف روایت یک جریان و بیان خلأ موجود است. در

انتهای مقدمه باید هدف از این تحقیق و نوآوری به کار رفته در انجام پژوهش بیان گردد.

۲-۲-۴-۱. استفاده از اختصارات انگلیسی و فارسی در متن مقاله ایرادی ندارد؛ اما باید معادل فارسی و انگلیسی کامل آن در اولین باری که در متن آمده است، به‌صورت زیرنویس نوشته شود.

۲-۲-۵. مواد و روش‌ها

نویسنده در روش پژوهش باید از بیان کلیات و تعاریف مربوط به روش پژوهش بپرهیزد و به تفصیل توضیح دهد که چگونه داده‌ها را جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل کرده است تا هدف یا اهداف پژوهش (حل خلأ علمی که در مقدمه بیان شد) را برآورد کند. این توضیحات باید به‌قدری دقیق باشد که هر خواننده‌ای در صورت نیاز بتواند مرحله به مرحله آن‌ها را انجام داده و به همان نتیجه‌ای برسد که نگارنده به آن رسیده است. منطقه مورد مطالعه نیز می‌تواند در این بند معرفی شود، ولی نویسنده می‌تواند در صورت ضرورت برای توضیحات تفصیلی، عنوان مستقلی به نام "منطقه مورد مطالعه" باز کند و این عنوان را در محل مناسب که به‌طور ابتدای بخش مواد و روش‌ها است، قرار دهد.

۲-۲-۶. نتایج

در بخش نتایج، تنها باید مواردی بیان شود که درباره اهداف پژوهش است. از بیان روش پژوهش یا پیشینه یا هر موضوعی که ذهن خواننده را از موضوع دور می‌کند پرهیز شود. اگر نتایج پژوهش خیلی گسترده هستند، آن‌ها را به‌طور منظم طبقه‌بندی کرده و ذیل عنوان‌های مناسب، درباره آن‌ها توضیح دهید. در توضیحات خود از جدول‌ها و نمودارهای مناسب استفاده کنید و نتایج آماری را به شیوه‌ای گویا بیان کنید.

۲-۲-۷. بحث

بحث مقاله به‌دلیل سنگین بودن آن و نیاز به تفکری عمیق و شاید وقت‌گیر، به‌طور معمول در معرض خطر است. در این بخش، به استناد مشاهدات بیشتر، مبانی نظری علم، سابقه پژوهش‌ها و تجربیات گذشتگان و همچنین تجزیه‌وتحلیل‌های آماری یا هر تحلیلی که نویسنده فکر می‌کند مناسب است باید نشان داده شود که نتایج پژوهش تا چه حد به واقعیت نزدیک‌اند. در متن مقاله نوشتن این مطلب که با پژوهش دیگری همسویی دارد یا ندارد، مناسب نیست و این مسئله را تحلیل نویسنده باید نشان دهد نه ادعای وی؛ به‌عبارتی، نویسنده باید بکوشد با مقایسه پژوهش‌های متعدد نشان دهد که واگرایی‌ها و همگرایی‌های بین پژوهش وی با دیگران در کجاست و به چه دلیل رخ داده است.

۲-۲-۸. نتیجه‌گیری کلی

بخش پایانی متن مقاله، نتیجه‌گیری است. این مبحث چکیده یا تکرار نتایج پژوهش نیست؛ بلکه نویسنده در این بخش به استناد بحثی که انجام داده است، حکم قطعی خود را به‌صورت کلی صادر می‌کند؛ به‌عبارتی، اکنون نتایج پژوهش نویسنده از صافی ارزیابی‌ای به‌نام بحث گذشته‌اند و برد اثرگذاری و کاربرد آن مشخص شده است و نتیجه‌گیری بهترین مبحثی است که نویسنده فرصت می‌یابد تا نتیجه به‌دست آمده و میزان اثرگذاری آن را گزارش کند. اگر نویسنده بر اساس تجربه‌ای که به‌دست آورده است احساس کند می‌تواند پژوهش خود را به شیوه خاصی ارتقا داده و حجم تعمیم‌پذیری آن را گسترش دهد یا به مدل‌های جدیدی دست یابد یا حل مسئله‌ای را بهبود بخشد، می‌تواند پیشنهادهای خود را در نتیجه‌گیری ارائه دهد.

۲-۲-۹. سپاسگزاری

چنانچه نویسنده یا نویسندگان در تهیه مقاله از منابع مالی سازمان یا نهادهای خاصی استفاده کرده‌اند، یا قصد تشکر و قدردانی از کسانی را دارند که در نگارش مقاله از آن‌ها یاری گرفته‌اند، باید در بخش سپاسگزاری به این مطلب اشاره کنند.

۲-۲-۱۰. نحوه ارجاع به منابع در متن

در داخل متن، منابع فارسی باید به زبان انگلیسی ترجمه و ارجاع داده شوند. ارجاع، بسته به لحن بیان نویسنده ممکن است در شروع یا پایان جمله یا متن آورده شود. ارجاعات در

متن مقاله باید به شیوه داخل پرانتز باشد، به‌گونه‌ای که ابتدا نام‌خانوادگی نویسنده یا نویسندگان و سال انتشار آورده شود. برای مثال، در صورت وجود یک نویسنده با ذکر نام‌خانوادگی نویسنده و سال انتشار؛ مانند (Rostami, 2014)؛ برای دو نویسنده با ذکر نام‌خانوادگی هر دو نویسنده و سال انتشار؛ مانند (Rostami & Ahmadi, 2021) باشد. در صورت وجود چندین نگارنده، ارجاع به منبع باید به‌صورت (نام‌خانوادگی نگارنده اول و همکاران، سال انتشار) مانند (Rostami et al., 2021) باشد. در صورتی‌که در شروع جمله به منبعی استناد شود به این صورت نگارش شوند:

Rostami (۲۰۱۴) گزارش کرد

Mohseni Saravi و Rostami (۲۰۰۶) گزارش کردند

Rostami و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند

۲-۲-۱۱. منابع پایانی

نشریه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز برای استناددهی یا شیوه ارجاع، سبک انجمن روان‌شناسی آمریکا که به اختصار (APA; American Psychological Association) گفته می‌شود را برگزیده است.

۲-۲-۱۱-۱. منابع مورد استفاده نباید از ۳۰ منبع کمتر باشد. ترجیحاً به منابعی که در ۱۰ سال اخیر چاپ شده‌اند (نه منابع قدیمی‌تر) ارجاع داده شود.

۲-۲-۱۱-۲. تنها منابعی باید در پایان مقاله ذکر شوند که در متن نیز استفاده شده باشند و از ذکر منابع مشابه و کم اهمیت خودداری شود.

۲-۲-۱۱-۳. همه منابع مورد استفاده اعم از فارسی و لاتین در پایان مقاله به زبان انگلیسی برگردانده و به‌ترتیب حروف الفبای نام‌خانوادگی اولین نگارنده مرتب می‌شوند. در انتهای منابع فارسی عبارت (In Persian) نوشته می‌شود.

نکته ۱: برای ترجمه منابع فارسی، حتماً به چکیده انگلیسی مقاله، صفحه عنوان انگلیسی کتاب، صفحه عنوان انگلیسی پایان‌نامه و غیره مراجعه کنید یا از مترجم کمک بگیرید. برنامه "Google Translate" پاسخ مناسبی به شما نمی‌دهد.

نکته ۲: منابع با اسامی نویسندگان یکسان چنانچه دارای سال انتشار متفاوت باشند، به‌ترتیب صعودی سال انتشار و چنانچه مربوط به یک سال مشخص باشند با افزودن حروف "a"، "b" و "c" و غیره پس از سال انتشار آورده شوند.

۲-۲-۱۱-۴. آدرس هر منبعی که در متن آورده شده است باید در آخر مقاله نیز بیاید.

۲-۲-۱۱-۵. شیوه نگارش مشخصات منابع، در انتهای مقاله باید بر اساس شیوه‌نامه APA و مانند مثال‌های زیر باشد:

در صورت استفاده از سایر منابع اطلاعاتی که در اینجا ذکر نشده از شیوه‌نامه APA استفاده کنید.

الف) کتاب

نام‌خانوادگی نویسنده اول، نام نویسنده اول؛ نام‌خانوادگی نویسنده دوم، نام نویسنده دوم و نام‌خانوادگی نویسنده چندم، نام نویسنده چندم. (سال انتشار). عنوان کتاب (به‌صورت کج‌نویسی). محل انتشار: ناشر.

Briggs, D., Smithson, P., Addison, K., & Atkinson, K. (1997). *Fundamentals of the physical environmental*. London: Routledge.

ب) کتاب ترجمه شده

نام‌خانوادگی، نام. (تاریخ انتشار ترجمه). نام کتاب (به‌صورت کج نویسی). مترجم: نام و نام‌خانوادگی مترجم. محل انتشار ترجمه: ناشر.

Mohseni Saravi, M., & Rostami, N. (2006). *Watershed management: issues and approaches*. (Timothy, R.). University of Tehran Press. (In Persian)

ج) مقالات نشریات

نام‌خانوادگی نویسنده اول، نام نویسنده اول؛ نام‌خانوادگی نویسنده دوم، نام نویسنده دوم و نام‌خانوادگی نویسنده چندم، نام نویسنده چندم. (سال انتشار). عنوان مقاله. نام نشریه (به‌صورت کج‌نویسی)، سال یا دوره (شماره)، صفحه آغاز مقاله- صفحه پایان مقاله. در صورت دارا بودن شناسه رقومی مقاله یا (doi)، درج آن ضروری می باشد

Baghalani, M., Rostami, N., & Tavakoli, M. (2019). Identification of factors affecting urban flood in Ilam City Watershed. *Journal*

of Watershed Engineering and Management, 11(2), 523-536. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120069.1417 (In Persian)

Rostami, N., Sohrabi, T., & Kazemi, Y. (2021). Stability analysis of flood spreading systems in arid regions, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 1819-1829. https://doi.org/10.1007/s40996-020-00424-7

Rostami, N., & Fathizad, H. (2022). Spatial and temporal changes of land uses and its relationship with surface temperature in western Iran. *Atmosfera*, 35(4), 701-717. https://doi.org/10.20937/ATM.52985

د) پایان‌نامه و رساله

نام‌خانوادگی نویسنده، نام نویسنده. (تاریخ انتشار). عنوان پایان‌نامه/ رساله (به‌صورت کج نویسی). پایان‌نامه مقطع رشته، نام دانشگاه.

Rostami, N. (2013). *Modeling the relationship between effective precipitation and flood hydrograph by joint probability aproach*. Ph.D. Thesis of Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tehran University. (In Persian)

ه) مجموعه مقالات

نام‌خانوادگی نویسنده، نام نویسنده. (تاریخ انتشار). نام مقاله. در: نام ویراستار، نام مجموعه (به‌صورت کج‌نویسی)، (صص شماره صفحات). محل انتشار: ناشر.

و) کتاب منتشرشده در سازمان‌ها یا نهادها

نام سازمان یا نهاد. (سال انتشار). عنوان کتاب (به‌صورت کج‌نویسی). محل انتشار: ناشر.

ز) وبگاه اینترنتی

نام‌خانوادگی نویسنده، نام نویسنده. (در صورت وجود تاریخ انتشار). عنوان مطلب مورد استفاده (به‌صورت کج‌نویسی). برگرفته از: آدرس اینترنتی.

Food and Agriculture Organization. (2000). Biodiversity: Agricultural biodiversity in FAO. Retrieved January 12, 2009, from http://www.fao.org/biodiversity.

ر) نمونه تنظیم یک مقاله یا یک فصل در یک کتاب وابسته (Edited book)

Bradford, J. M. & R. F. Piest. (1978). *Erosion development of valley-bottom gullies in the upper mid weastern United States*. In D. R. Coates & J. D. Vitek (Eds.), Thresholds in Geomorphology. (pp. 75-101)

د) نمونه تنظیم یک سند از یک کنفرانس

Rostami, N. (2014). Extraction of rainfall temporal patterns using Monte Carlo simulation technique (case study: Joustan Watershed, Iran). *Second National Conference on Water Crisis, Shahrekord*. September 9-10. (In Persian)

۳. شکل ظاهری مقاله

۳-۱. حروف‌چینی مقاله باید در برنامه Word، در اندازه کاغذ A4 و با رعایت حاشیه ۲/۵ سانتی‌متر از طرفین باشد و فاصله میان سطرها یک سانتی‌متر (Single) باشد.

۳-۲. لازم است متن فارسی مقاله با قلم B Nazanin 13 و متن لاتین با قلم Times New Roman 11 نوشته شود. متن چکیده فارسی با قلم B Nazanin 10 Bold نوشته شود. عنوان اصلی مقاله با قلم B Titr 14 و سایر عنوان‌ها با قلم B Nazanin 14 Bold تنظیم شوند. منابع پایانی با قلم Times New Roman 11 نوشته شوند. عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی (B Nazanin 11 به‌صورت Bold) و انگلیسی (Times New Roman 10 به‌صورت Bold) نوشته شود. اعداد داخل جدول‌ها به‌صورت انگلیسی (Times New Roman 9) نوشته شوند و سایر اطلاعات داخل شکل‌ها و جداول به دو صورت فارسی (B Nazanin 10) و انگلیسی (Times New Roman 9) نوشته شوند.

۳-۳. شکل‌ها و جدول‌ها

در تنظیم جدول‌ها، منحنی‌ها، شکل‌ها و تصاویر، رعایت نکات زیر الزامی است:

۳-۳-۱. در ترسیم نقشه‌ها سعی شود همه اصول کارتوگرافی رعایت شود. مختصات، مقیاس (مقیاس خطی)، راهنما، جهت نقشه و بهویژه عناوین عوارض مهم متن نقشه باید به‌صورت خوانا در آن درج شوند، به گونه‌ای که حتی پس از کوچک شدن نقشه، از وضوح آن‌ها کاسته نشود.

۳-۳-۲. شکل‌ها و تصاویر باید به‌صورت رنگی یا سیاه و سفید و با کیفیت مناسب و مطلوب تهیه شده (رزولوشن ۳۰۰ dpi) و شماره و عنوان آن‌ها در پایین آورده شود.

۳-۳-۳. نقشه‌ها باید واضح، مطالب آن‌ها خوانا و دارای مقیاس باشند. ذکر مأخذ نقشه‌ها، عکس‌ها یا شکل‌هایی که از منابع دیگر اقتباس شده‌اند الزامی است.

۳-۳-۴. نمودارها به‌طور ساده ترسیم شوند، راهنمای عددی نمودارها باید انگلیسی باشد و بهتر است از ترسیم نمودارهای چندبُعدی خودداری شود.

۳-۳-۵. همه عنوان‌ها، اعداد، واحدها و مقیاس‌ها در جدول‌ها و شکل‌ها باید به انگلیسی باشند. واحدهای استفاده شده نیز بر اساس سیستم متریک ذکر شوند.

۳-۳-۶. ارائه تصویری جدول‌ها، معادلات، مرجع‌ها یا نوشته‌های مستقیم روی شکل‌ها امکان ویرایش را از ویراستار سلب می‌کند؛ از این‌رو لازم است این موارد به‌صورت تایپ شده در متن آورده شوند.

۳-۳-۷. شماره و عنوان هر جدول در بالای آن به‌صورت وسط‌چین با دو زبان فارسی و انگلیسی نوشته شود.

۳-۳-۸. عنوان شکل‌ها با دو زبان فارسی و انگلیسی در پایین تصاویر آورده شود.

۳-۳-۹. در متن نیز حتماً به شماره‌های جدول و شکل‌ها اشاره شود.

۳-۳-۱۰. بهتر است شکل‌ها و جدول‌ها بلافاصله پس از توضیحات متن و در نزدیکترین جای ممکن آورده شوند.

۴. ارسال مقاله

۴-۱. مطمئن شوید اصول پیش گفته از جمله اصول اخلاقی، قلمرو و اهداف و همچنین اصول نگارش نشریه به‌ویژه عنوان‌های متن مقاله به‌درستی نوشته شده است.

۴-۲. با آدرس iwm.ilam.ac.ir وارد سامانه نشریه و سپس وارد صفحه شخصی شوید. ورود به صفحه شخصی با کلمه کاربری و رمز عبور امکان‌پذیر است؛ بنابراین، اگر پیش‌تر آن‌ها را دریافت نکرده‌اید، به‌سادگی می‌توانید با انتخاب محیط ثبت‌نام از طریق گزینه ورود به سامانه (واقع در بخش سمت چپ و بالای صفحه) اطلاعات درخواستی را وارد و کلمه کاربری و رمز عبور را در رایانامه‌ای که در حین ثبت‌نام اعلام کرده‌اید، دریافت کنید. در صورت تمایل به تغییر آن‌ها می‌توانید از خود سامانه کمک بگیرید. توجه داشته باشید که شما برای ورود به سامانه همواره به این دو کلمه نیاز دارید؛ بنابراین بکوشید تا آن‌ها را فراموش نکنید.

۴-۳. از نوار ارسال مقاله، گزینه ارسال مقاله جدید را انتخاب کرده و طی ۱۰ مرحله شامل انتخاب نوع مقاله، وارد کردن عنوان، اضافه کردن نویسندگان، وارد کردن چکیده، وارد کردن کلیدواژه‌ها، توضیحات تکمیلی، داوران پیشنهادی (حداقل سه داور)، اضافه کردن فایل‌ها، نامه به سردبیر و چک لیست و در نهایت تکمیل ارسال مقاله، اقدام به ارسال مقاله نمایید.

۴-۴. در بخش اضافه کردن فایل، لازم است دو فایل اصلی را (به همراه فرم های تکمیل شده تعهدنامه و تعارض منافع) بارگذاری کنید. ۱- فایل صفحه مشخصات نویسنده یا نویسندگان در محیط Word؛ ۲- فایل متن اصلی مقاله در محیط Word بدون مشخصات نویسندگان.

در فایل اول (فرم مشخصات نویسندگان)، مشخصات کامل مقاله و نام نویسنده یا نویسندگان (نام نویسنده مسئول مکاتبات با ستاره مشخص شود)؛ آخرین مدرک تحصیلی، مرتبه علمی و محل اشتغال؛ نشانی کامل نویسنده مسئول مکاتبات شامل آدرس پستی، شماره تلفن، شماره دورنگار، نشانی پیام‌نگار (پست الکترونیک)؛ نام مؤسسه تأمین‌کننده مخارج مالی پژوهش یا تهیه مقاله (در صورت وجود) در فایل

جداگانه‌ای ارسال شود. لازم به ذکر است تمام اطلاعات فوق به دو زبان فارسی و انگلیسی نوشته شوند.

در فایل دوم (فایل متن اصلی مقاله بدون نام نویسندگان)، مقاله را که در ساختار مناسب بر اساس نوع مقاله تنظیم شده است بارگذاری می‌شود.

۴-۵. در بخش نامه به سردبیر قید شود که مقاله حاصل کدام‌یک از فعالیت‌های پژوهشی (فعالیت کلاسی، پایان‌نامه، طرح پژوهشی و غیره) است.

۵. پیگیری فرایند انتشار مقاله

۱-۵. در صورت تأیید سردبیر و ارسال مقاله به داوری، نویسنده مسئول به صفحه شخصی خود در سامانه نشریه مراجعه کند و اگر تأخیری در فرآیند داوری (بیش از یک ماه) مشاهده کرد از طریق پست الکترونیکی یا تماس تلفنی با نشریه روند بررسی مقاله را پیگیری کند.

۲-۵. در صورتی‌که مقاله برای چاپ پذیرفته شود بعد از آماده شدن برای چاپ، در سامانه و در قسمت فهرست مقالات آماده به انتشار درج می‌گردد. ضمن اینکه نسخه ویراستاری شده برای نویسنده هم ارسال میگردد و نویسنده ضمن اعمال اصلاحات خواسته شده می تواند اگر نیاز به هرگونه تغییر و اصلاحی باشد در این مرحله اعلام نماید. بعد از چاپ مقاله امکان هیچ گونه تغییر و اصلاحی در مقاله وجود ندارد.

۳-۵. بعد از چاپ مقاله، اطلاعات آن در صفحه شخصی درج می‌گردد و نویسنده می‌تواند وضعیت مقاله خود را با عنوان مقاله منتشر شده به‌صورت الکترونیکی مشاهده کند.

۴-۵. نشریه «مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز» حق رد یا قبول و نیز ویراستاری مقالات را برای خود محفوظ می‌دارد و از بازگرداندن مقالات دریافتی معذور است.

۵-۵. مقالات رد یا انصراف داده شده، پس از سه ماه از مجموعه آرشیو نشریه خارج خواهد شد و نشریه هیچ‌گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهد داشت.

مجموعه مقالات

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 1-17 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2061973.1230 **Online ISSN: 2783-4581**

An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province)

Mohammad Jafar Zare[1], Ali Salajegheh[*1], Sousan Salajegheh[2], Mohsen Kazemi[1]

1. Restoration Group of Arid and Mountainous Areas, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Environmental Group, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
***Corresponding author:** salajegh@ut.ac.ir

(Received: 28 May 2025 Revised: 07 June 2025 Accepted: 07 July 2025)

Extended Abstract

Introduction: Land subsidence is one of the most destructive yet hidden environmental hazards caused by various factors. In recent years, this phenomenon has become increasingly noticeable across the country. Land subsidence can result from natural processes such as tectonic and volcanic activities. However, human activities—particularly excessive groundwater extraction and the imposition of heavy loads on the earth's surface—have recently been identified as its primary causes Moreover, climate change, reduced precipitation, and rising temperatures have decreased renewable water resources, thereby increasing reliance on groundwater and exacerbating land subsidence.

Materials and Methods: This study investigate and analyzes ground surface changes within the Marvdasht aquifer using advanced radar interferometry techniques. Initially, the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) methodology, utilizing Sentinel-1A satellite imagery, was employed to extract the land subsidence rate from 2015–2022. Subsequently, cumulative subsidence across the entire aquifer was calculated for the study period. Additionally, average groundwater level changes during the overlapping period with interferometric data were computed to analyze the correlation between groundwater decline and land subsidence.

Results and Discussion: The results from the Marvdasht aquifer between 2015 and 2022 revealed an alarming trend of land subsidence. The highest annual subsidence rate was recorded between 2015 and 2016, reaching 24.1 cm per year, indicating the severity of the phenomenon during that period. The overall trend of subsidence over the seven years shows that, except for 2019–2020 (which experienced sharp increases in subsidence rates), the remaining years exhibited a decreasing trend. The lowest annual subsidence rate was observed in 2018–2019 at 16.3 cm.A comparison of groundwater level changes with subsidence rates during 2016–2017 and 2019–2020 indicates a significant and direct relationship. Specifically, noticeable drops in groundwater levels coincided with substantial rises in subsidence rates. The coefficient of determination between groundwater level changes and land subsidence was 0.26 across the entire aquifer and 0.50 in subsiding areas, indicating a relatively strong and statistically significant correlation between the two variables. This suggests a meaningful relationship between land subsidence and groundwater fluctuations in the Marvdasht aquifer. Additionally, This finding confirms the detrimental impact of excessive groundwater extraction on the intensification of land subsidence. Spatial analysis shows that the highest rates of subsidence occurs in the central and southern parts of the aquifer, areas known for a high density of groundwater extraction wells. Conversely, in urban areas of Marvdasht, where construction restrictions and extraction regulations limit the number of wells, subsidence is negligible. This findings highlight the critical importance of proper water resource management and strict monitoring of extraction activities in controlling and preventing land subsidence.

Conclusion: Land subsidence, as one of the serious environmental hazards in the Marvdasht aquifer, was investigated over the period from 2015 to 2022. The results indicate a significant relationship between groundwater level decline and the rate of land subsidence. The highest annual subsidence rate occurred during 2015–2016, reaching approximately 24.1 cm, while the lowest was recorded in 2018–2019 at 16/3 cm per year. In subsiding areas, the relationship between groundwater level changes and vertical ground displacement—considering a time lag of about two years—yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.50, statistically significant at the 5% level. Spatial analysis further revealed that the highest subsidence occurred in regions with a high density of groundwater extraction wells (central and southern parts of the aquifer), while minimal subsidence was observed in areas with low well density (northeastern and southeastern regions). This underscores the substantial role of excessive groundwater withdrawal in driving land subsidence in the region. Ultimately, this study emphasizes the urgent need for sustainable groundwater management. Recommended strategies include controlling over-extraction through the installation of smart water meters, implementing artificial recharge programs, improving irrigation efficiency, developing land subsidence risk zoning plans, and enhancing public awareness and education for groundwater users. These measures can significantly contribute to reducing subsidence rates and mitigating associated risks.

Keywords: Marvdasht aquifer, interferometry, Sentinel-1A imagery, land subsidence

Citation: Zare, M., Salajegheh, A., Salajegheh, S. & Kazemi, M. (2026). An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province). *Integrated Watershed Management*, 6(3), 1-17. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2061973.1230

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۷-۱) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2061973.1230

بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس)

محمدجعفر زارع[۱]، علی سلاجقه[۱*]، سوسن سلاجقه[۲]، محسن کاظمی[۱]

۱- گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: salajegh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶)

چکیده مبسوط

مقدمه: پدیده فرونشست زمین از مخربترین مخاطرات پنهان محیطی است که در اثر عوامل مختلف ایجاد می‌شود. این پدیده در سال‌های اخیر به صورت چشمگیری در کشور در حال رخ دادن است. فرونشست زمین ممکن است در اثر فرآیندهای طبیعی مانند فعالیت‌های تکتونیکی و آتشفشانی رخ دهد. با این حال، در سال‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی به‌ویژه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و وارد آوردن بارهای سنگین بر سطح زمین، به‌عنوان عوامل اصلی این پدیده شناخته می‌شوند. افزون بر این، تغییرات اقلیمی، کاهش میزان بارندگی و افزایش دمای هوا باعث کاهش منابع آب تجدیدپذیر شده‌اند که در نتیجه، وابستگی به آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و این مسئله سبب تشدید پدیده فرونشست شده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری، تغییرات سطح زمین در محدوده آبخوان مرودشت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. برای این منظور، در گام نخست با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-A۱، نرخ فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۱۵ استخراج شد. سپس تغییرات تجمعی فرونشست در سطح آبخوان در کل بازه مورد مطالعه محاسبه شد. در ادامه، تغییرات میانگین سطح آب زیرزمینی طی دوره‌ای که با داده‌های تداخل‌سنجی هم‌پوشانی دارد، محاسبه گردید تا ارتباط و همبستگی میان افت آب زیرزمینی و میزان فرونشست زمین تحلیل شود.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از این پژوهش در آبخوان مرودشت، طی دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، نشان‌دهنده روندی نگران‌کننده از فرونشست زمین در این منطقه است. بیشینه نرخ فرونشست سالانه در سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ به ثبت رسیده که برابر با ۲۴/۱سانتی‌متر در سال بوده و نشان‌دهنده شدت بالای این پدیده در آن بازه زمانی است. بررسی روند کلی فرونشست طی این هفت‌سال، حاکی از آن است که به‌جز سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹ که با افزایش چشمگیر نرخ فرونشست همراه بوده، در سایر سال‌ها نرخ فرونشست با شیبی کاهشی مواجه بوده است. کمترین نرخ سالانه فرونشست در سال ۲۰۱۹–۲۰۱۸ و به میزان ۱۶/۳ سانتی‌متر ثبت شده است. مقایسه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با نرخ فرونشست زمین در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۶ و ۲۰۲۰-۲۰۱۹ بیانگر وجود یک رابطه مستقیم و معنادار میان افت سطح آب زیرزمینی و افزایش نرخ فرونشست است؛ به‌طوری‌که کاهش محسوس تراز آب زیرزمینی در این سال‌ها، با افزایش محسوس نرخ فرونشست همراه بوده است. از سوی دیگر ضریب تعیین بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین درکل آبخوان و در مناطق دارای فرونشست برابر با ۰/۲۶ و ۰/۵۰ بوده که دارای همبستگی بالا و معنی‌داری بین این دو متغیر در آبخوان مرودشت است. همچنین این یافته به‌روشنی نقش مخرب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را در تشدید پدیده فرونشست تأیید می‌کند. افزون بر این، تحلیل‌های فضایی نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست در نواحی مرکزی و جنوبی آبخوان رخ داده است؛ مناطقی که با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شناخته می‌شوند. در مقابل، در محدوده‌های شهری مرودشت، که به‌سبب محدودیت‌های ساخت‌وساز و مقررات بهره‌برداری، تعداد چاه‌ها کمتر بوده، نشانه چشمگیری از فرونشست مشاهده نشده است. این موضوع اهمیت مدیریت اصولی منابع آب و نظارت دقیق بر فعالیت‌های بهره‌برداری را در کنترل و پیشگیری از فرونشست زمین به‌خوبی نمایان می‌سازد.

نتیجه‌گیری: فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات جدی در آبخوان مرودشت، در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه معناداری بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین وجود دارد. بیشترین نرخ فرونشست سالانه مربوط به سال ۲۰۱۶–۲۰۱۵ با حدود ۲۴/۱ سانتی‌متر و کمترین آن در سال ۲۰۱۹–۲۰۱۸ با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است. ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین در مناطق دارای فرونشست، با لحاظ تأخیر زمانی حدود دو ساله، ضریب تعیین ۰/۵۰ به‌دست آمده که در سطح ۵ درصد از نظر آماری معنادار است. بررسی مکانی نیز نشان داد که بیشترین فرونشست در نواحی با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری (مرکز و جنوب آبخوان) و کمترین آن در مناطق با تراکم کم چاه‌ها (شمال و جنوب‌شرق آبخوان) رخ داده است. این موضوع بیانگر نقش پررنگ برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در فرونشست منطقه است. در نهایت، این تحقیق بر لزوم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تأکید دارد. پیشنهادهایی نظیر کنترل برداشت با کنتورهای هوشمند، تغذیه مصنوعی، ارتقاء بهره‌وری آبیاری، تهیه پهنه‌بندی خطر فرونشست و آموزش بهره‌برداران به‌عنوان راهکارهای کاربردی جهت کاهش نرخ فرونشست و کاهش مخاطرات ناشی از آن مطرح می‌شود.

کلمات کلیدی: آبخوان مرودشت، تداخل‌نما، تصاویر Sentinel-1A، فرونشست زمین

استناد: زارع، م.ج.، سلاجقه، ع.، سلاجقه، س.، و کاظمی، م. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۷-۱. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2061973.1230

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

فرونشست زمین[1] یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در سطح جهان می‌باشد که به فروریزش یا نشست سطح زمین در مقیاس گسترده اطلاق می‌گردد (Shemshaki *et al.*, 2005). این پدیده می‌تواند ناشی از فرآیندهای طبیعی مانند تغییرات تکتونیکی و آتشفشانی باشد اما در دهه‌های اخیر عوامل انسانی بویژه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و تحمیل بارهای سنگین به‌عنوان عوامل اصلی فرونشست شناخته شده‌اند (Abedini, 2017). تشدید تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی و افزایش دما نیز منجر به کاهش منابع آب تجدیدپذیر و در نتیجه افزایش وابستگی به آب‌های زیرزمینی شده است، که این امر بر شدت فرونشست افزوده است (Taylor *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2022). براساس نتایج پژوهش‌ها، حدود ۱۹ درصد جمعیت جهان در معرض خطر بالای فرونشست قرار دارند (Herrera-Garcia *et al.*, 2021). در ایران نیز، بویژه در دشت‌های مرکزی و نیمه‌خشک، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی که با خشکسالی‌ها و توسعه صنایع و کشاورزی (سیستم‌های آبیاری سنتی) تشدید شده است، مهم‌ترین عامل فرونشست می‌باشد (Abedini, 2013) که این پدیده خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها، شبکه‌های حمل‌ونقل، ساختمان‌ها و منابع طبیعی وارد کرده و زمینه‌ساز بحران‌های اجتماعی و اقتصادی متعددی شده است. نرخ و الگوهای فرونشست زمین در طول زمان و مکان دچار تغییر هستند، از این رو نیاز به اندازه‌گیری دقیق و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی برای پایش آن ضروری است. یکی از ابزارهای نوین در این زمینه، تکنیک تداخل‌سنجی راداری[2] است که به‌ویژه در مناطقی که فاقد نقاط ترازیابی هستند، کارآمد و کم‌هزینه به شمار می‌آید(Amighpey *et al.*, 2023). در حال حاضر، روش‌های پایش فرونشست زمین به دو دسته کلی اندازه‌گیری‌های سطح زمین و اندازه‌گیری‌های زیرزمینی تقسیم می‌شوند. روش‌های پایش سطح زمین شامل ترازیابی دقیق، تداخل‌سنجی راداری و سامانه ناوبری جهانی[3] (GNSS) هستند(Abidin *et al.*, 2001; Burbey, 2003; Figueroa-Miranda *et al.*, 2018). روش تداخل‌سنجی راداری در زمینه اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین کارایی بالایی دارد. اولین بار Gabriel و همکاران (۱۹۸۹) روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری تعدادی از پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه‌جایی سطحی زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزنه مجازی[4] اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. در این روش با استفاده از حداقل سه (دو تصویر+ DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری، تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت بسیار بالا (برای مثال، میلی‌متر) آشکارسازی نمود. در عین حال، دقت تصویر تابعی از طول موج داده مورد استفاده خواهد بود (Shafiai *et al.*, 2021). پژوهش‌های زیادی در ایران و سایر کشورها در زمینه فرونشست انجام شده است به طوری که اولین گزارش از نشست زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۴۶، در دشت رفسنجان ثبت شده است (Abbasnejad, 1998). در پژوهشی Tourani و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در غرب استان گلستان، نشان دادند که محدوده فرونشست

[1]. Land subsidence
[2]. Radar interferometry
[3]. Global Navigation Satellite System
[4]. Synthetic Aperture Radar

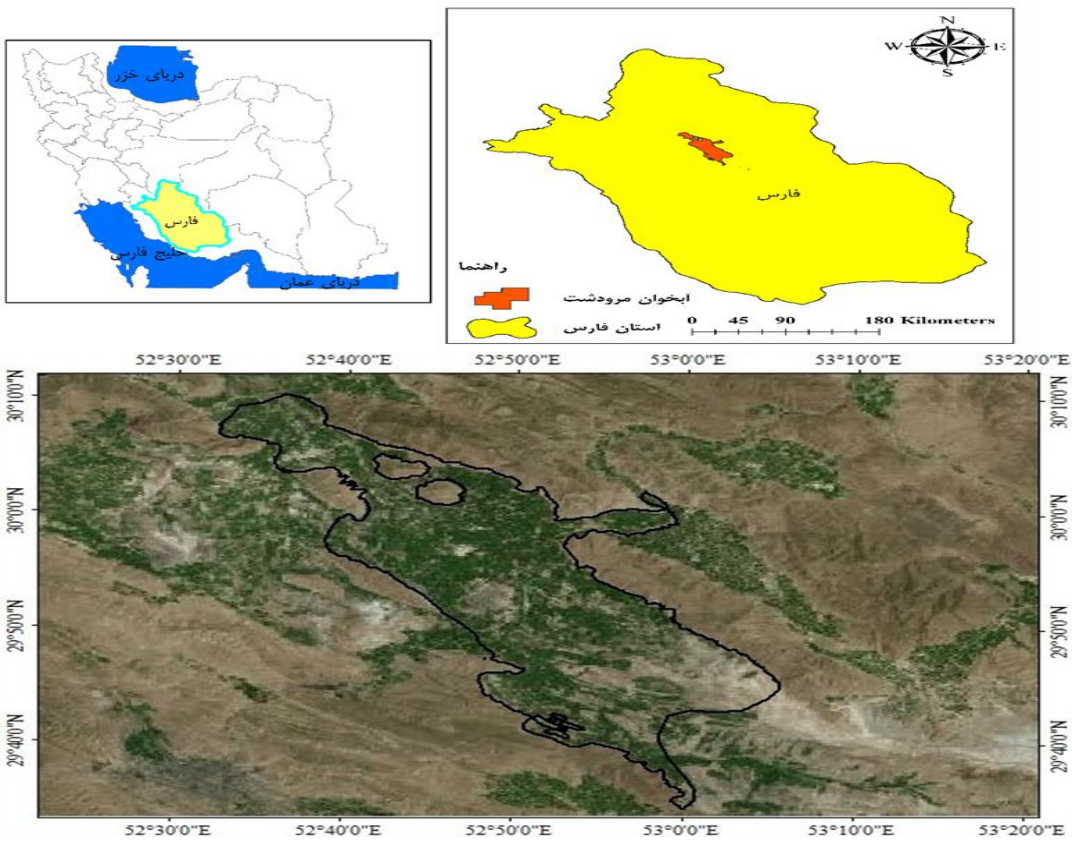
دارای روندی شرقی-غربی است که با ساختارهایی نظیر گسل خزر همخوانی دارد. در تحقیقی دیگر، بررسی میزان فرونشست در دشت اراک ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی نشان داد که نواحی مرزی و حاشیه‌ای دشت با افت بیشتری در سطح آب مواجه‌اند و تمرکز رسوبات ریزدانه رسی در غرب، احتمال فرونشست را افزایش می‌دهد(Shahkarami *et al.*, 2020). پژوهشی در دشت ایوانکی در استان سمنان نشان داد که میزان فرونشست در این منطقه در دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ بین ۸/۳- تا ۳۳/۲- سانتی‌متر بوده و بیشترین آن در مرکز دشت، نزدیک روستای چشمه نادی رخ داده است (Asadi *et al.*, 2021). همچنین در بررسی ارتباط بین فرونشست و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در دشت کرج، در بازه زمانی ۸ سال، نشان داد که فرونشست بین ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر در سال بوده که به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی رخ داده است(Ranjbar Baruq *et al.*, 2022). پژوهش‌های Motedayen و همکاران (۲۰۲۳) در دشت گرگان نشان داد که بیشترین فرونشست در مناطقی با تقاضای آب بالا برای کشاورزی و تراکم چاه‌ها اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، نتایج تحقیق Kazemi و همکاران (۲۰۲۴) در آبخوان کرمانشاه نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، برای هر سال ۶/۳- تا ۳/۴- سانتی‌متر بوده که بیشتر در قسمت شمالی و غربی آبخوان گسترش داشته است. علاوه بر این در آبخوان کرمانشاه بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و مقادیر فرونشت همبستگی معنی‌داری وجود نداشته است. Aghayari و همکاران (۲۰۲۲) نیز در دشت اردبیل، طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ نشان دادند که میانگین سالانه فرونشست حدود ۴/۴ میلی‌متر بوده است. در کراچی پاکستان، میزان فرونشست سالانه بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی‌متر گزارش شده که ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی است(Hussain *et al.*, 2022). همچنین Liu و همکاران (۲۰۲۳) در دلتای رودخانه مروارید غربی چین با استفاده از روش INSAR و تصاویر Sentinel-1، نشان دادند که فرونشست در مناطق با کاربری آبزی‌پروری، شهری و کشاورزی رخ می‌دهد. در پژوهشی Hung و همکاران (۲۰۲۴) فرونشست زمین در مخروط‌افکنه رودخانه چوشویی تایوان مورد بررسی قرار دادند که با تحلیل داده‌های آب زیرزمینی و GNSS، ارتباط افت سطح آب با فرونشست زمین نشان داده شد. نتایج بیانگر افت شدید آب زیرزمینی (تا ۵۴ سانتی‌متر در سال) و نرخ بالای فرونشست (۴/۲ تا ۵/۲ سانتی‌متر در سال) در برخی مناطق می‌باشد که یافته‌های تحقیق بر لزوم مدیریت پایدار منابع آب تأکید دارد(Hung *et al.*, 2024). Qasemi و همکاران (۲۰۲۳) در دشت کبودرآهنگ، فرونشست تجمعی به میزان ۱۲۴/۷ میلی‌متر و متوسط فرونشست هر شش‌ماه حدود ۱۳ میلی‌متر را گزارش کردند. همچنین در دشت قائنات استان خراسان جنوبی، نرخ فرونشست از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است (Hosseinzadeh *et al.*, 2023). نتایج پژوهش Guo و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که با بهره‌گیری از مدل‌های DEM و PS-InSAR، نرخ سالانه فرونشست زمین در منطقه وان‌آن (Wan'an) طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ در بازه‌ای بین ۶ تا ۱۰ میلی‌متر بود. همچنین، Yeh و همکاران (۲۰۲۵) طی پژوهشی فرونشست زمین در غرب تایوان را با استفاده از داده‌های GNSS و InSAR مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ نرخ فرونشست ۹ سانتی‌متر در چانگ‌هوا و ۱۹ سانتی‌متر در یونلین بود. با توجه به اینکه شهرستان مرودشت به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی در استان فارس و حتی در سطح کشور شناخته می‌شود. در این منطقه، به دلیل حاصلخیزی بالای خاک، کشت‌های متوالی و مستمر (تا سه کشت در سال) در سطح وسیعی از اراضی زراعی رایج

است. این الگوی زراعی فشرده منجر به مصرف بالای منابع آب زیرزمینی شده و فشار مضاعفی بر آبخوان وارد می‌سازد. بر این اساس، هدف این پژوهش پایش دقیق نرخ فرونشست زمین در دشت مرودشت، شناسایی نوع کاربری‌های زمین با بیشترین میزان فرونشست، و تحلیل رابطه آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی است. در این راستا، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های آماری استفاده می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند ضمن ارائه بینش علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، به کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، حفاظت از محیط‌زیست و ارتقای امنیت اجتماعی در راستای توسعه پایدار منطقه کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مرودشت، واقع در استان فارس، بین طول‌های جغرافیایی ´۴۴ °۵۱ تا ´۳۰ °۵۳ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ´۱۵ °۲۹ تا ´۵۹ °۳۰ شمالی واقع شده است. ارتفاع متوسط این شهرستان از سطح دریا به ۱۶۲۰ متر می‌رسد و در ۴۵ کیلومتری شمال‌شرقی شیراز، روی دشت وسیع و حاصلخیز مرودشت با مساحت ۴۶۴۹ کیلومترمربع قرار دارد که تقریباً ۳ درصد از مساحت کل استان فارس را در بر می‌گیرد. از منظر زمین‌شناسی، مرودشت در کمربند چین‌خورده زاگرس واقع شده و روند عمومی چین‌خوردگی‌ها در این منطقه، با امتداد شمال‌غربی – جنوب‌شرقی مشخص می‌شود. مهم‌ترین جریان‌های سطحی در شهرستان مرودشت شامل رودخانه‌های کر و سیوند است. میانگین بارش سالانه در این شهرستان حدود ۵۰۰ میلی‌متر است که عمدتاً در فصل سرد و با نفوذ جبهه‌های آب و هوایی غربی اتفاق می‌افتد. تابستان‌های مرودشت گرم و خشک بوده و میانگین دمای سالانه آن بین ۱۱ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد متغیر است. بر اساس ضریب خشکی دمارتن، این شهرستان در زمره مناطق نیمه‌خشک ایران طبقه‌بندی می‌شود. شهرستان مرودشت به پنج بخش سعادت‌آباد، سیدان، مرکزی، کامفیروز و درودزن تقسیم شده است (شکل ۱)، (Khosh Akhlaq *et al.* 2010; Nasiri *et al.* 2012). این ویژگی‌ها، مرودشت را به منطقه‌ای با پتانسیل‌های طبیعی و اقتصادی قابل توجه تبدیل کرده است.



شکل ۱ – موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1 – Location of the Study Area

روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا به منظور پایش نرخ فرونشست زمین در آبخوان مرودشت از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. در این روش، فاز حاصل از دو تصویر گرفته شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل‌نگار تطبیق داده می‌شود. در راستای بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین، تعداد ۵۱ چاه مشاهده‌ای با داده‌های کامل و پراکندگی یکسان در سطح آبخوان انتخاب شدند. سپس میانگین تغییرات سالانه سطح آب محاسبه گردید. برای تعیین همبستگی بین تغییرات تراز آب زیرزمینی در سطح آبخوان و در مناطق دارای فرونشست، نقشه فرونشست زمین تهیه و میانگین مقادیر فرونشست محاسبه شد. این همپوشانی با هدف شناسایی الگوهای همبستگی فضایی و تعیین میزان تأثیر متقابل بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل رگرسیون خطی و با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. از طریق این فرآیند، امکان بررسی دقیق‌تر روابط پیچیده میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست فراهم می‌شود و الگوهای مکانی و زمانی این تغییرات به‌طور جامع‌تری تحلیل می‌گردند. مراحل تفصیلی انجام این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

تداخل سنجی راداری

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های راداری، شامل ۷ سری تصاویر سنتینل A-1 جهت محاسبه نرخ فرونشست طی بازه زمانی ۲۰۲۲- ۲۰۱۵ استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC با

پلاریزاسیون VV طی ۶ سال است. تحلیل تصاویر در محیط سیستم عامل ویندوز و با نرم‌افزار SNAP انجام گرفت (جدول ۱). انتخاب مناسب و بهینه زوج تصاویر راداری جهت تداخل‌سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل موجود در عملیات تداخل‌سنجی است. از مهم‌ترین عوامل پایه در انتخاب زوج تصاویر می‌توان به فرکانس سنجنده مورد استفاده، خط مبنای عمود مکانی، هم‌پوشانی مکانی و همچنین هم‌پوشانی طیفی در راستای پرواز اشاره کرد. سپس با در نظر داشتن موارد فوق مبادرت به تهیه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش از سایت asf.alaska.edu گردید.



شکل ۲ – مراحل انجام پژوهش
Figure 2 – Research Methodology Steps

هم مرجع‌سازی

پس از افزودن زوج تصاویر به نرم‌افزار SNAP، مبادرت به انجام مرحله هم‌مرجع‌سازی تصاویر به همراه مدل رقومی ارتفاعی منطقه و استفاده از نقاط پراکنش‌گر گردید. بدین منظور ابتدا محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی به‌خاطر سرعت در پردازش تصاویر جدا شد. سپس به منظور تصحیح مداری تصویر، فرایند Apply- orbit- file روی آنها انجام گردید. در مرحله بعد با عملگر Back Geocoding، دو تصاویر جدا شده از منطقه در دو بازه زمانی مختلف با زیر نوار یکسان را با استفاده از بردارهایی

از دو فرآورده و یک مدل رقومی ارتفاعی ثبت نموده و در ادامه به‌منظور استفاده از یک آزیموت و برد ثابت برای کل تصاویر از عملگر Enhanced Spectral Diversity استفاده شد.(Foumelis *et al*., 2018)

جدول ۱-مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

Table 1 – Specification of the Radar Images

سال	نوع ماهواره	تاریخ تصاویر	نوع پردازش تصاویر	نوع گذر تصاویر	کانال	قطبش	جهت مدار
2015	Sentinel-1A	2015/09/04	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2016/09/22	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2016	Sentinel-1A	2016/09/22	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2017/09/29	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2017	Sentinel-1A	2017/09/29	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2018/09/24	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2018	Sentinel-1A	2018/09/24	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2019/09/19	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2019	Sentinel-1A	2019/09/19	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2020/09/13	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2020	Sentinel-1A	2020/09/13	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2021/09/08	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
2021	Sentinel-1A	2021/09/08	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2022/09/03	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending

اینترفروگرام

پس از اتمام هم‌مرجع‌سازی بین دو تصویر ماهواره‌ای سنتینل۱-A در نرم‌افزار SNAP[5]، مراحل تولید اینترفروگرام به شرح زیر انجام شد: نخست، اختلاف فاز بین دو تصویر با استفاده از عملگر تداخل‌سنجی راداری محاسبه گردید. در روش تداخل‌سنجی راداری[6]، تصویری به نام تداخل‌نما[7] تولید می‌شود که حاوی اختلاف فاز بین دو تصویر راداری ثبت‌شده از یک منطقه در دو زمان مختلف است. این اختلاف فاز، بیانگر تغییر فاصله بین سطح زمین و ماهواره در بازه زمانی تصویربرداری بوده و امکان بررسی تغییرات سطح زمین مانند نشست یا بالا آمدگی را فراهم می‌سازد. تداخل‌نما از حاصل‌ضرب تصویر راداری اول در مزدوج مختلط تصویر دوم به دست می‌آید که در آن فاز، نشان‌دهنده اختلاف فاز بین دو موج و دامنه، حاصل‌ضرب دامنه‌های دو تصویر است. در این فرآیند، تصویر اول به عنوان تصویر مرجع[8] و تصویر دوم که با آن هم‌تراز شده است، تصویر پیرو[9] نامیده می‌شود. هر زوج تصویر راداری قابلیت تولید یک تداخل‌نما را دارد و در صورت وجود N تصویر از یک منطقه، می‌توان تعداد N(n-1)/2 تداخل‌نما تولید کرد (Ferretti, 2002). تداخل‌سنجی بر اساس اندازه‌گیری فاز امواج الکترومغناطیسی عمل می‌کند. انتخاب بهترین اینترفروگرام با ارزیابی پارامتر همدوستی انجام می‌شود که نمایانگر کیفیت فرآیند تداخل‌سنجی است. پس از تشکیل اینترفروگرام اولیه، اثر فاز توپوگرافی با استفاده از DEM SRTM حذف شد. به‌منظور حذف مؤلفه توپوگرافی از فاز کل، از مدل ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰

5. Sentinel Application Platform
6. InSAR
7. Interferogram
8. Master
9. Slave

متر استفاده شد. در SNAP، این مرحله به طور خودکار در فرآیند Interferogram Formation در زبانه‌های مربوطه با انجام می‌شود. همچنین جهت کاهش نویزها از فیلتر گلدشتاین[۱۰] استفاده شد. فیلتر گلدشتاین یکی از فیلترهای پرکاربرد در پردازش اینترفروگرام‌هاست که در شرایط با نسبت سیگنال به نویز[۱۱] بالا عملکرد مؤثری دارد. این فیلتر با کاهش نویز، به آشکارسازی بهتر نوارها[۱۲] و کاهش لبه‌های ناخواسته کمک می‌کند. پارامتر آلفا، که نشان‌دهنده قدرت فیلتر است، به‌صورت تطبیقی بر اساس همدوسی[۱۳] محلی تنظیم می‌شود تا مناطق ناهمدوس بیشتر فیلتر شوند.

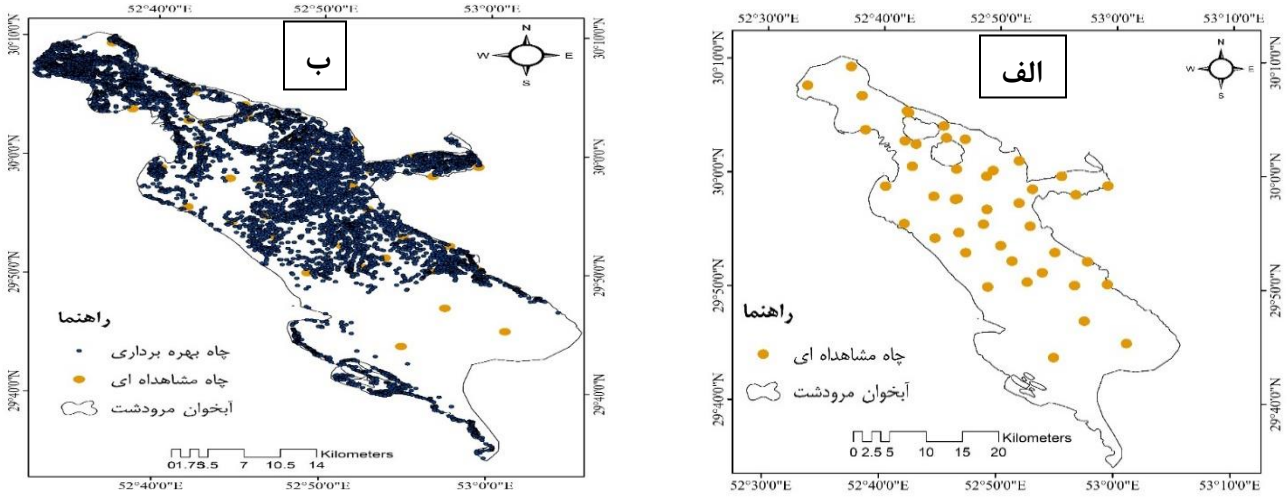
ساخت فاز جابجایی

پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی راداری و تهیه اینترفروگرام، با استفاده از عملگر Export Snaphu، یک فایل Unphase به دست آمد. در مرحله بعد، فایل اختلاف فازها، به جابجایی عمودی تبدیل می‌شوند. سپس با استفاده از روش شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات[۱۴]، مقدار فرونشست را به صورت میانگین محاسبه کرده و اعوجاجات هندسه تصویربرداری راداری را تصحیح و به مختصات جغرافیایی تبدیل می‌شوند. در نهایت، نرخ فرونشست در بازه‌های زمانی مورد مطالعه استخراج گردید. به منظور افزایش دقت و اطمینان از صحت داده‌های حاصل از پردازش تصاویر راداری، مقادیر فرونشست استخراج‌شده با استفاده از داده‌های ایستگاه دائمی[۱۵] موجود در منطقه مورد مطالعه واسنجی گردید. این ایستگاه‌ها به عنوان مرجع زمینی دقیق، امکان تصحیح خطاهای احتمالی در داده‌های سنجش از دور را فراهم کرده‌اند.

تغییرات سطح آب زیرزمینی

در این بخش، به منظور بررسی میزان کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت، داده‌های مربوط به ۵۱ حلقه چاه پیزومتری در فاصله زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ مورد تحلیل قرار گرفت. اطلاعات جغرافیایی و میانگین سطح ایستابی این چاه‌ها به نرم‌افزار ArcGIS منتقل شد. تحلیل‌ها بر اساس تراکم چاه‌های بهره‌برداری و نوع کاربری زمین و رابطه همبستگی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و مقادیر فرونشست بررسی شد. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان مرودشت به همراه چاه‌های مشاهده‌ای در شکل۳-الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بالاترین تراکم چاه‌ها در نواحی شمالی و مرکزی آبخوان، عمدتاً به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص دارد. در مقابل، نواحی جنوبی و انتهایی آبخوان کمترین تراکم چاه‌های بهره‌برداری را دارند (شکل۳-ب).

[10].Goldstein
[11]. SNR
[12] . French
[13] . Coherence
[14] . Regularized least squares
[15]. GNSS



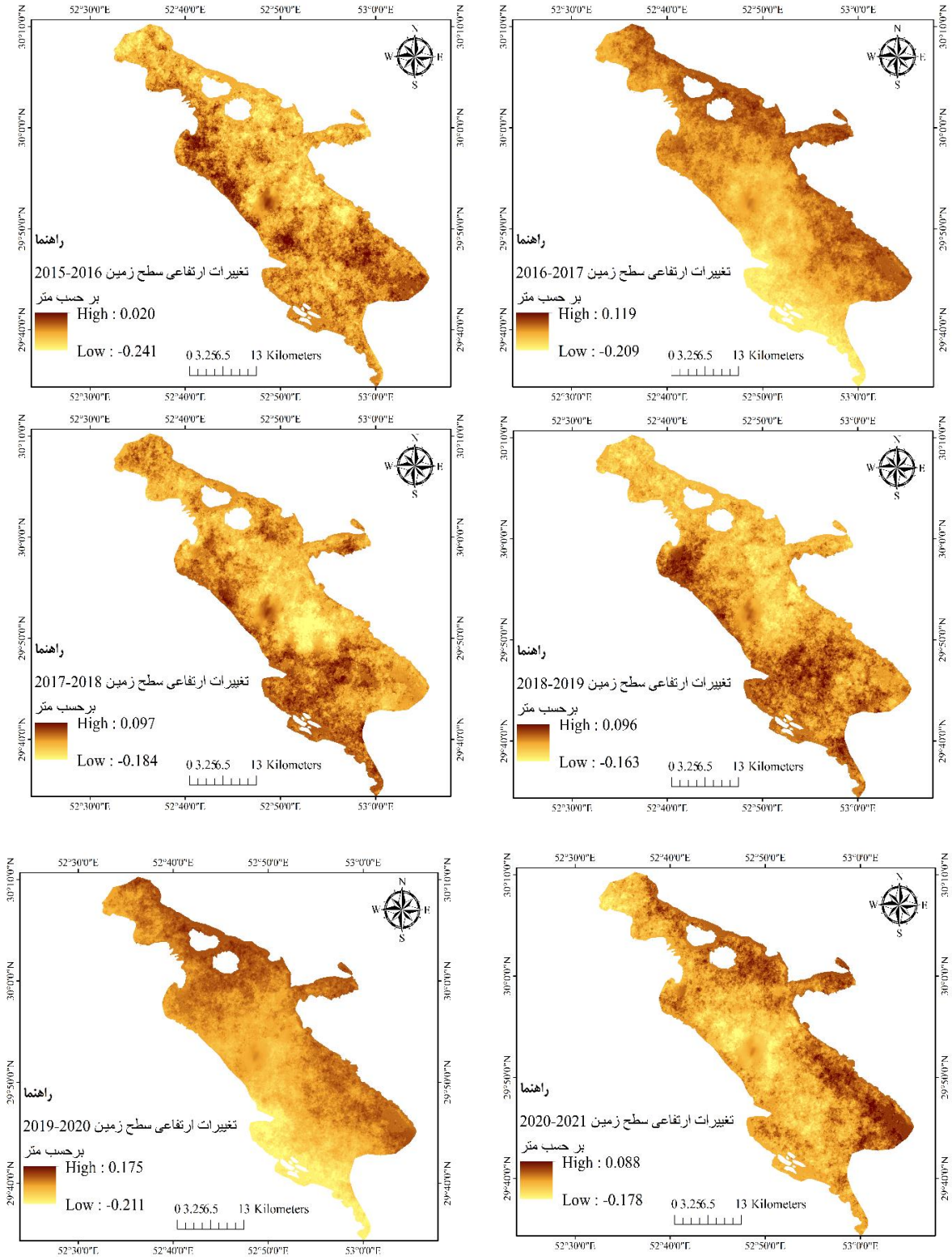
شکل ۳ الف – موقعیت چاه‌های پیزومتری، ب – موقعیت چاه‌های بهره‌برداری

Figure 3a – Location of piezometric wells, b – Location of water exploitation wells

نتایج

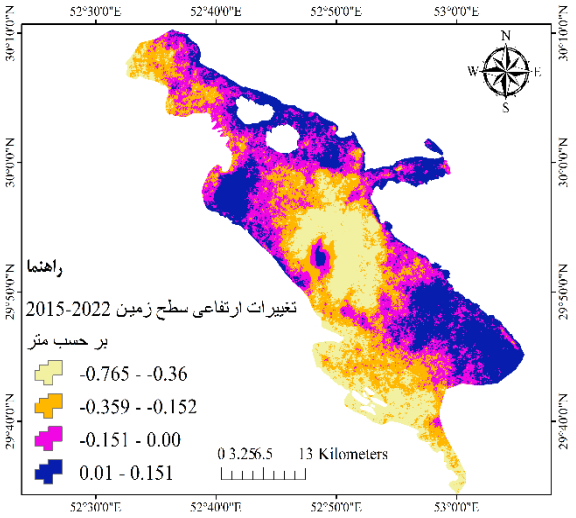
تغییرات جابه‌جایی سالانه سطح زمین

بررسی تغییرات زمانی و مکانی فرونشست زمین در آبخوان مرودشت بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های راداری نشان‌دهنده تشدید قابل توجه این پدیده است. نتایج تحلیل داده‌های مربوط به فرونشست زمین در بازه زمانی هفت‌ساله نشان داد که نرخ فرونشست در این مدت دارای تغییرات متناوب بوده است. در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶، حداکثر نرخ فرونشست زمین ۲۴/۱ سانتی‌متر در سال در بخش مرکزی آبخوان بوده است. الگوی تغییرات حداکثر نرخ فرونشست در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ برابر با ۲۰/۹ سانتی‌متر در سال، دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ حداکثر ۱۸/۴ سانتی‌متر در سال و در دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ برابر با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است که روند کاهشی داشته است؛ اما دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ حداکثر نرخ فرونشست ۲۱/۱ سانتی‌متر در سال که نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته است، در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ و ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ نرخ حداکثر فرونشست ۱۷/۸ سانتی‌متر در سال رسیده است. الگوی مکانی حداکثر نرخ فرونشست نشان داد که بالاترین نرخ فرونشست در بخش‌های مرکزی و در مناطق کشاورزی رخ داده است (شکل ۴).



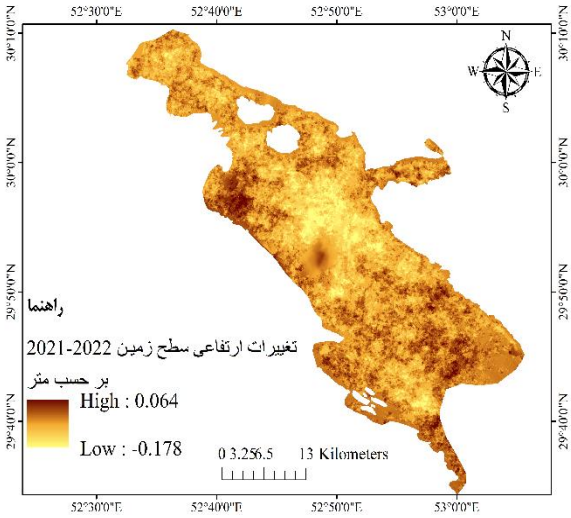
شکل۴- نرخ فرونشست سالانه

Figure 4 – Annual subsidence rate



شکل ۵- تغییرات نرخ فرونشست تجمعی

Figure 5-Cumulative subsidence rate variat



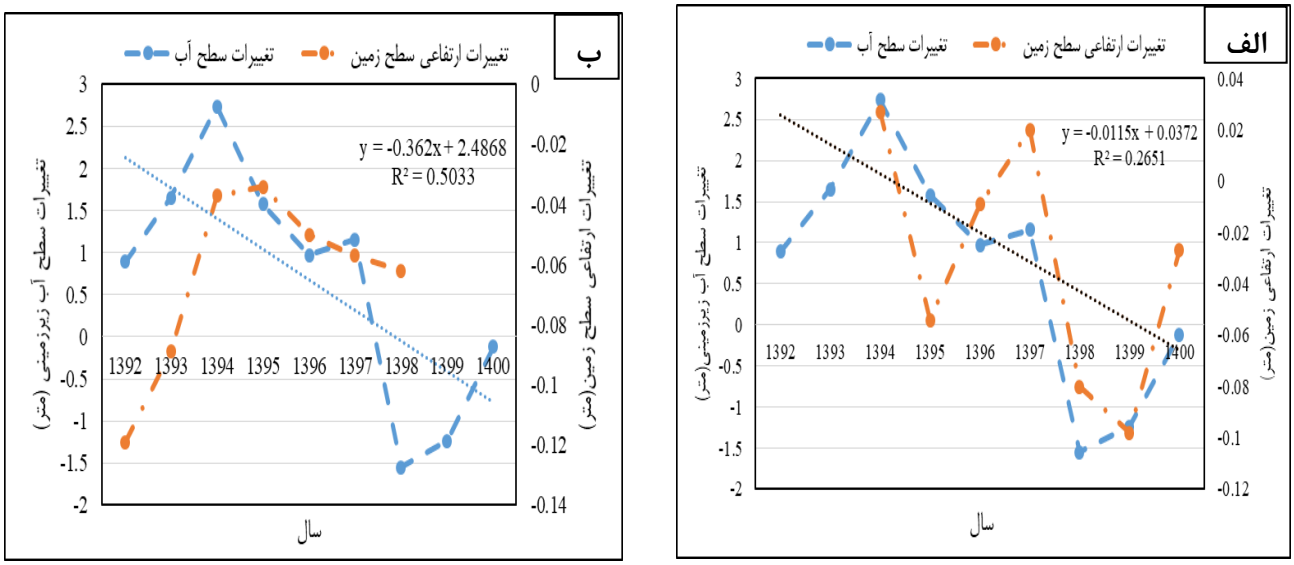
ادامه شکل ۴-نرخ فرونشست سالانه

Continuation of Figure 4 – Annual subsidence rate

تغییرات نرخ فرونشست و سطح آب زیرزمینی

میانگین نرخ فرونشست بین سال ۲۰۲۲-۲۰۱۵ در شکل۵ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نرخ فرونشست در قسمت‌های مرکزی و جنوبی آبخوان مرودشت از ۷۰/۵ - تا ۳۶ - سانتی‌متر در بازه ۷ سال متغیر است. در قسمت جنوب‌شرقی و بخشی از شمال آبخوان نرخ فرونشست برابر با صفر بوده است. سپس در اطراف این بخش مقادیر فرونشست دارای کمترین میزان در طی بازه ۷ ساله بوده که دارای نرخی کمتر از ۱۵ سانتی‌متر هستند. شهر مرودشت نیز در مرکز آبخوان قرار دارد که با توجه به شکل۵ در محدوده فرونشست قرار نداشته است. شکل۶- الف نمودار میانگین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در کل آبخوان بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۲ را نشان می‌دهد. از سال ۲۰۱۳ تغییرات سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۱۵ روند افزایشی داشته است. در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۵ سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و تغییرات ارتفاعی سطح زمین نیز کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش نرخ فرونشست است. از سال ۲۰۱۸-۲۰۱۷ با افزایش سطح آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست کاهش یافته است. سپس در سال ۲۰۱۹-۲۰۱۸ با کاهش بسیار زیاد سطح آب زیرزمینی، روند تغییرات سطح زمین نیز کاهش یافته به صورتی که بیشترین مقادیر رخداد فرونشست را نشان می‌دهد. تغییرات سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۲۱-۲۰۱۹ روند افزایشی داشته و روند تغییرات ارتفاعی زمین نیز افزایش یافته که نشان‌دهنده کاهش مقادیر فرونشست در آبخوان مرودشت است. از سوی دیگر ضریب تعیین(تشخیص) بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در کل آبخوان مرودشت برابر با $R^2 = 0.26$ است که نشان از همبستگی ضعیف بین میانگین تغییرات نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت است. شکل ۶-ب میانگین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین را در مناطق دارای فرونشست نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با یک تأخیر زمانی حدود دو ساله، بیشترین همبستگی بین

تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست مشاهده شده است. به‌گونه‌ای که از سال ۲۰۱۳ با افزایش سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست روند کاهشی داشته و در مقابل، از سال ۲۰۱۵ با کاهش سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست افزایش یافته است. ضریب تعیین بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در این مناطق برابر با $R^2 = 0.50$ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد بین این دو متغیر می‌باشد. این یافته بیانگر تأثیر مستقیم و قابل توجه افت سطح آب زیرزمینی بر شدت فرونشست زمین در مناطق دارای جابه‌جایی است.



شکل ۶ الف-روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در کل آبخوان، ب- روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در مناطق دارای فرونشست

Figure 6a- Trends in groundwater level changes and land subsidence rate across the entire aquifer, b-Trends of groundwater level changes and subsidence rates in subsiding area

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخاطره‌آمیزی است که خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورد. شناخت علل اصلی وقوع آن می‌تواند به جلوگیری از گسترش شدت آن کمک کند. نتایج حاصل از این پژوهش در آبخوان مرودشت از سال ۲۰۲۲-۲۰۱۵ نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست سالانه در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ با ۲۴/۱ سانتی‌متر در سال رخ داده است. همچنین روند نرخ فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ بجز سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹ کاهشی بوده، به طوری که کمترین نرخ فرونشست در سال۲۰۱۹-۲۰۱۸ برابر با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است. روند تغییرات میانگین سالانه نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت در طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۶ و ۲۰۲۰-۲۰۱۹ با تغییرات تراز آب زیرزمینی در این دو بازه زمانی همخوانی دارد به صورتی که با کاهش تراز آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست در این دو بازه افزایش یافته است و این امر بیانگر آن است که بین نرخ فرونشست و تغییرات تراز آب زیرزمینی رابطه معنی‌داری وجود دارد.

اما نتایج همبستگی بین میانگین تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی در کل این آبخوان نشان از همبستگی پایین بین آن‌ها است. می‌توان دلیل آن را درنظر گرفتن میانگین تغییرات تراز آب زیرزمینی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین در کل سطح آبخوان نه در مناطق دارای فرونشست دانست. از طرفی، بررسی ارتباط بین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در مناطق دارای فرونشست نشان داد که رابطه معنی‌دار بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین وجود دارد. نتایج بیانگر آن است که با یک تأخیر زمانی حدود دو ساله، الگوی تغییرات نرخ فرونشست از تغییرات سطح آب زیرزمینی پیروی می‌کند. افزایش سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۳ با کاهش نرخ فرونشست همراه بوده است، در حالی که افت محسوس سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۵ به بعد با افزایش نرخ فرونشست هم‌زمان شده است. این روند در داده‌های آماری نیز منعکس شده، به‌طوری‌که ضریب تعیین بین میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست برابر با ۰/۵ به‌دست آمده است. این مقدار بیانگر همبستگی نسبتاً قوی و از لحاظ آماری معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل کلیدی و مستقیم در افزایش نرخ فرونشست زمین در این مناطق است. این یافته اهمیت مدیریت منابع آب زیرزمینی را در کاهش و کنترل پدیده فرونشست به‌خوبی نشان می‌دهد. از سوی دیگر مجموع نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست در بخش مرکزی و جنوبی آبخوان در مناطقی که حداکثر تراکم چاه‌های بهره‌برداری بوده در حدود ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر است این در صورتی که بخش جنوب شرقی و شمال آبخوان که دارای کمترین تراکم چاه بهره‌برداری است، مقادیر فرونشست آن برابر با صفر بوده به صورتی که شهر مرودشت نیز در این محدوده قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده نقش تراکم چاه‌های بهره‌برداری و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در تغییرات ارتفاعی سطح زمین در آبخوان مرودشت است. نتایج این پژوهش با تحقیقات Shahkarami و همکاران (۲۰۲۰)، Ranjbar Baruq و همکاران (۲۰۲۲)، Motedayen و همکاران (۲۰۲۳)، Hussain و همکاران (۲۰۲۲) و Liu و همکاران (۲۰۲۳)، که تقریباً برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را علت پدیده فرونشست بیان نموده‌اند، مطابقت دارد. بنابراین از آنجایی که بیشترین نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت در مناطق کشاورزی و کمترین آن در بخش انتهایی آبخوان یعنی اراضی بایر و شهری رخ داده است نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین تعداد چاه‌های بهره‌برداری و به‌تبع آن نقش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار منابع آب نقش کلیدی در کاهش نرخ فرونشست زمین دارد. بر این اساس، راهکارهایی نظیر کنترل برداشت‌های بی‌رویه از طریق نصب کنتورهای هوشمند، توسعه تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها با استفاده از منابع آب سطحی و پساب تصفیه‌شده، ارتقاء بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی با بهره‌گیری از روش‌های نوین آبیاری، و تدوین طرح‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست با هدف هدایت توسعه شهری پیشنهاد می‌شود. همچنین، آموزش و آگاه‌سازی بهره‌برداران در خصوص پیامدهای فرونشست می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌ها و ارتقاء مشارکت مردمی ایفا کند. تحقق این اقدامات در چارچوب سیاست‌های یکپارچه مدیریت منابع آب، می‌تواند به کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست و پایداری توسعه در مناطق آسیب‌پذیر منجر شود.

References

Aghayari, L., Abedini, M., & Asghari Saraskanroud, S. (2022). Estimation of land subsidence using radar interferometry technique and groundwater and land use parameters (Case study: Ardabil Plain). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(1), 117-132.

Asadi, M., Ganjavian, H., Javdani, M., & Ghaderi Hesab, M. (2021). Assessment of the relationship between natural factors and the rate of land subsidence in the Eyvanekey plain using radar imagery. *Hydrogeology*, 6(1), 13–22. https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016.

Amighpey, M., Arabi, S., Gharaeian, F., & Molaei, A. (2023). Investigation of land subsidence around lake Urmia using geodetic observations. *Iranian Water Resources Research*, 19(2), 196–206.

Abedini, M. (2017). *Fundamentals of land subsidence* (*Hydrogeomorphological Hazards and Environmental Management*). Ardabil University Press, First Edition, pp. 1–230.

Abedini, M. (2013). Investigation of the causes of land subsidence in Ardabil plain and its effects within the city limits. *Scientific-Research Quarterly, Physical Geography*, 6 (19), 71–84.

Abbasnejad, A. (1998). Investigation of geological conditions and environmental issues of Rafsanjan plain. *Proceedings of the Second Conference of the Geological Society of Iran (Abstracts)*.

Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Akbar, A., Rajiyowiryono, H., Sudibyo, Y., & et al. (2001). Land subsidence and its geodetic system in Jakarta, Indonesia. *Natural Hazards* 23, 365–387. https://doi.org/10.1023/A:1011144602064

Burbey, T. J. (2003). Use of time–subsidence data during pumping to characterize specific storage and hydraulic conductivity of semi-confining units. *Journal of Hydrology*, 281 (1-2), 3–22. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00197-5

Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater overexploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: a review. *Engineering Geology*. 246, 91–106. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. https://doi.org/10.1109/36.898661

Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., & Wong, C. (2018). ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545

Gabriel, AK., Goldestein, R.M., & H.A. Zebker. (1989). Mapping small elevation changes over large areas – Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7): 9183-9191. https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183

Guo, H., Martínez-Graña, A. M., & González-Delgado, J. A. (2024). Monitoring the subsidence in Wan'an Town of Deyang based on PS-InSAR technology (Sichuan, China). *Sustainability*, 16(16), 10010. https://doi.org/10.3390/su162210010

Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S., Khan, J., & Ying, Z., (2022). Sentinel1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using persistent Scatterers In-SAR technique., *Sci Rep* 12 ,5294. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09359-7

Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4): 99- 125.

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169 (In Persian)

Hung, W. C., Hwang, C., Lin, S.H., Wang, C. S., Chen, Y.A., Tsai, P. C., & Lin, K. C. (2024). Exploring groundwater depletion and land subsidence dynamics in Taiwan's Choushui river alluvial fan: insights from integrated GNSS and hydrogeological data analysis. *Frontiers in Earth Science*, 12:1370626. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1370626

Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., & et al. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371, 34–36. https://doi.org/10.1126/science.abb8549

Kazemi, M., Khosravi, H., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, Sh., & Mohammadkhan, Sh. (2024). Monitoring land subsidence based on differential radar interferometry and groundwater level changes (Case study: Kermanshah Aquifer). *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 18(67), 31–43. https://doi.org/10.22034/18.67.3

Khosh Akhlagh, F., Ranjbar, F., Toulabi, S., & Masoompour Samakoosh, J. (2010). Investigation of the drought in the water year 2007-2008 and its effects on water resources and agriculture (Case study: Marvdasht county). *Geography (Iranian Geographical Association)*, 8(24), 119–148.

Liu, z., Ng, A. H. M., Wang, H., Chen, J., Du, Z., & Ge, L. (2023). Land subsidence modeling and assessment in the West Pearl River Delta from combined InSAR time series, land use and geological data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 118, 103228. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103228

Motedayen, M. H., Esfandiari, M., Moeini, A., Mohammadi Torkashvand, A. (2023). Evaluation of land subsidence in the Gorgan plain. *Hydrogeomorphology*, 10(35): 102-119. https://doi.org/10.22034/HYD.2023.55996.1688

Nasiri, Alavi Panah, Matinfar, Azizi, & Hamzeh (2012). Implementation of an ecological agricultural model using PROMETHEE II and Fuzzy AHP approaches in a GIS environment (Case study: Marvdasht County). *Environmental Studies*, 38(3), 109–122.

Qasemi, A., Bahmani, O., Akhavan, S., & Por Qasemi, H. R. (2023). Investigating the subsidence of kobodar Ahang plain based on radar interferometric technique and changes in underground water level. *Journal of Water and soil science*, 33(2): 201-183. https://doi.org/10.22034/ws.2021.48295.2442 (In Persian)

Ranjbar Baruq, Z., & Fathollazadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence using radar image time series and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj Metropolis). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 138–155. https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.313426.1313.

Shafiai, N., Goli Mokhtari, L., Amir Ahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Spatial analasis of ground subsidence and groundwater loss using GWR model (Case staudy: Noorabad Mamasani aquifer). *Scientific Journal of Geography and Planning*, 25(76): 159-171. https://doi.org/10.22034/gp.2021.11306 (In Persian)

Shemshaki, A., Bloorchi, M., & Ansari, F. (2005). Investigation of land subsidence in the Tehran–Shahriar plain. research project, *Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*, Report No. 20/06-84 Engeo, pp. 1–84.

Shahkarami, N., & Ghasemi, S. (2020). Subsidence Areas Due to excessive groundwater extraction in the Arak plain. *The Fourth Technology Development Congress and International Conference on New Findings in Civil Engineering, Architecture, and Building Industry of Iran*, pp. 1–13.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change* 3 (4), 322–329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744

Tourani, M., Agh Atabay, M., & Roostaei, M. A. (2018). Study of land subsidence in Gorgan city using radar interferometry method. *Spatial Planning Journal*, 8(27), 117–128.

Wang, S. J., Nguyen, Q. C., Lu, Y. C., Doyoro, Y. G., & Tran, D. H. (2022). Evaluation of geological model uncertainty caused by data sufficiency using groundwater flow and land subsidence modeling as example. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 81 (8), 331. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02832-7

Yeh, T.-K., Lee, T.-Y., Lee, I.-H., & Ni, C.-F. (2025). Combination on GNSS precise point positioning and InSAR data fusion to monitor the land subsidence in Taiwan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2445632

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 18-49 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2026.2083818.1263 **Online ISSN: 2783-4581**

Level of Achievement of Ecosystem Conservation and Sustainable Use Indicators within the Framework of the Sustainable Development Goals in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

Seyed Hamidreza Sadeghi1[1]*, Mohaddeseh Alimohamadisani[1], Seyedeh Hajar Akbari[2], Fatemeh Niknam[2], Foruzan Jamgohari[2], Mitra Jalilian[1], Mohammadmehdi Malek[2], Reza Yaghoti[2], Marjan Bahlekeh[1] and Reza Chamani[2]

1 .Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
2. Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.

***Corresponding author**: sadeghi@modares.ac.ir

(Received: 27 January 2026 Revised: 13 February 2026 Accepted: 05 June 2026)

Extended Abstract

Introduction: Watersheds, as natural systems, are influenced by both internal and external factors and face ongoing challenges related to declining performance and the fulfillment of their inherent functions. Economic development, the expansion of international trade, cultural changes, and the emergence of new technologies—combined with increasing droughts, desertification, and floods—have intensified the demand for securing essential resources for human life. These pressures have made the management and sustainable use of soil and water resources, along with environmental preservation, critical necessities that now rank among the main concerns of developmental planning. Despite this urgency, there is limited integration in watershed management between proper planning, risk reduction, environmental concerns, and performance comparison at regional and global levels. Consequently, the assessment of watershed performance using globally acceptable criteria has received insufficient attention. This study aims to fill this gap by assessing the performance of sustainable development indicators that affect ecosystem conservation and sustainable utilization in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran, through the systematic identification and analysis of relevant indicators.

Materials and Methods: To assess the performance of sustainable development indicators affecting ecosystem conservation and sustainable use, the study first selected the most influential indicators from the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) relevant to the Shazand Watershed's ecosystems. Multiple field visits were subsequently conducted to collect data and determine the current condition of the watershed. Based on these investigations, 19 ecosystem-related indicators were selected for analysis. For performance calculation, the values for each indicator were derived using a multi-source approach incorporating global SDG metadata and international reports. Thresholds for certain indicators were defined based on national and regional standards from official Iranian sources and subsequently validated by expert committees. To determine the performance level of each indicator, values were normalized on a scale of 0 to 100 using defined upper and lower bounds. Finally, the spatial distribution of performance was determined for each sub-watershed within the study area.

Results and Discussion: Among the 19 indicators analyzed, the highest performances were observed for indicators related to mortality and missing persons due to natural disasters (100%) and disruptions in basic services caused by disasters (94%). In contrast, the lowest performances were recorded for indicators such as the ratio of productive and sustainable agricultural areas (1%), green cover of mountainous regions (1.21%), and protected plant and animal areas (11.90%). Spatial analysis revealed that the Shazand Watershed, particularly its central sub-watersheds, is generally in a declining average condition. Key factors affecting these changes include extensive industrial activities such as refineries and petrochemical plants, as well as increased mining operations, all of which have negatively impacted the region's ecosystems.

Conclusion: To prevent further resource degradation, all stakeholders at global, national, and especially local levels must recognize that progress and development must follow a sustainable path. Achieving an acceptable level of growth and development in the human communities of the Shazand Watershed requires planning based on a deep understanding of the environment and the strategic leveraging of the region's existing capabilities. Recognizing, reviewing, and analyzing both human and natural capacities can serve as a foundation for critical development objectives. Given the high rate of industrial growth and resulting pollution in the Shazand Watershed, combined with efforts to leverage agricultural potential and modernization, a significant step can be taken toward achieving sustainable development goals. It is therefore recommended that in both short- and long-term planning, provincial and local managers allocate a higher proportion of public budget investments to the agricultural sector. Additionally, increasing the share of agricultural development from banking facilities and directing banking resources toward equipping and modernizing agricultural enterprises can play a key role in improving productivity and employment in this sector.

Keywords: Ecosystem Sustainability, Global Standards, Integrated Watershed Management, Sustainable Development Goals, Watershed Performance.

Citation: Sadeghi, S. H., Alimohamadisani, M., Akbari, S. H., Niknam, F., Jamgohari, F., Jalilian, M., Malek, M., Yaghoti, R., Bahlekeh, M. & Chamani, R. (2026). Level of Achievement of Ecosystem Conservation and Sustainable Use Indicators within the Framework of the Sustainable Development Goals in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 18-49. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2083818.1263

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۴۹-۱۸) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2083818.1263

میزان دستیابی به شاخص‌های حفاظت و استفاده پایدار از بوم‌سازگان‌ها در چارچوب اهداف توسعه پایدار در حوزه آبخیز شازند استان مرکزی

سیّدحمیدرضا صادقی[1*]، محدثه علیمحمدی‌ثانی[1]، سیده‌هاجر اکبری[1]، فاطمه نیکنام[1]، فروزان جام‌گوهری[1]، میترا جلیلیان[1]، محمدمهدی ملک[1]، رضا یاقوتی[1]، مرجان بهلکه[1]، رضا چمنی[2]

۱- گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۲- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

[*]نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵)

چکیده مبسوط

مقدمه: آبخیزها به عنوان سامانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل داخلی و بیرونی با کاهش عملکرد و تأمین نیازهای گرودارن خود مواجه می‌شوند. به عبارتی دیگر توسعه اقتصادی و گسترش تجارت‌های بین‌المللی، تغییرات فرهنگی و شکل‌گیری فن‌آوری‌های نوین، توأم با افزایش خشک‌سالی، بیابان‌زایی و سیلاب، تقاضا برای تأمین منابع موردنیاز حیات انسانی را افزایش داده است. این امر سبب شده مدیریت و استفاده اصولی از منابع خاک‌وآب و حفظ محیط‌زیست ضرورتی دوچندان یابد و به یکی از دغدغه‌های اصلی در برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای تبدیل شود. بااین‌حال در مدیریت آبخیزها ارتباط چندانی بین برنامه‌ریزی صحیح، کاهش و مدیریت خطر، نگرانی‌های محیط‌زیستی و مقایسه عملکرد در سطح منطقه‌ای و جهانی برقـرار نیسـت. در عین حال ارزیابی عملکرد سامانه آبخیز با استفاده از معیارهای مقبول جهانی کم‌تر انجام شده است. براین اساس دراین پژوهش عملکرد شاخص‌های توسعه پایدار مؤثر بر حفاظت و بهره‌برداری پایدار از بوم‌سازگان‌ها در آبخیز شازند استان مرکزی از طریق شناسایی و تحلیل شاخص‌های مرتبط موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: برای ارزیابی عملکرد شاخص‌های توسعه پایدار مؤثر بر حفاظت و بهره‌برداری پایدار از بوم‌سازگان‌ها، در گام نخست از ۱۷ هدف توسعه پایدار، شاخص‌های با بیش‌ترین تأثیر بر بوم‌سازگان‌های آبخیز شازند انتخاب شدند. در ادامه بازدیدهای متعددی از آبخیز شازند به‌عمل آمد و با استفاده از گزارش بازدیدهای صحرایی و جمع‌آوری داده‌ها، شرایط فعلی آن تعیین شد. در نهایت ۱۹ شاخص مرتبط با بوم‌سازگان‌ها انتخاب شدند. برای محاسبه عملکرد، مقادیر هر یک از شاخص‌ها از طریق یک رویکرد چندمنبعی با استفاده از فراداده‌های جهانی اهداف توسعه پایدار و گزارش‌های بین‌المللی، اتخاذ شدند. برای برخی از شاخص‌ها، آستانه‌ها بر اساس استانداردهای ملی و منطقه‌ای از منابع رسمی ایران تعریف و با اعتبارسنجی از هیئت متخصصان تکمیل شدند. سپس برای تعیین عملکرد هر یک از شاخص‌ها با استفاده از کران بالا و پایین، شاخص‌ها به مقیاسی بین صفر تا ۱۰۰ نرمال‌سازی شدند. در ادامه پراکنش مکانی عملکرد هر یک از زیرآبخیزها مشخص شد.

نتایج و بحث: براساس نتایج پژوهش حاضر، از بین ۱۹ شاخص موردبررسی، دستیابی به شاخص‌های مرگ‌ومیرها و مفقودین متأثر از بلایای طبیعی و اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا به‌ترتیب با ۱۰۰ و ۹۴ درصد بالاترین عملکرد را داشته و شاخص‌های نسبت مناطق کشاورزی مولد و پایدار، شاخص پوشش سبز کوهستان و مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری به‌ترتیب با ۱، ۱/۲۱ و ۱۱/۹ درصد کم‌ترین عملکرد را به خود اختصاص داده است. هم‌چنین پهنه‌بندی صورت گرفته نشان داد که آبخیز شازند با برخورداری از شرایط نامطلوب‌تر در زیرآبخیزهای مرکزی در مجموع در شرایط متوسط رو به افول قرار دارد. عوامل کلیدی مؤثر بر این تغییرات شامل فعالیت‌های گسترده صنعتی مانند پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های پتروشیمی و افزایش عملیات معدنی است که اثرات منفی خود بر بوم‌سازگان منطقه را گذاشته است.

نتیجه‌گیری: برای جلوگیری از تخریب بیش‌تر منابع، تمام افراد در ابعاد جهانی، ملی و به‌ویژه در سطح محلی باید این واقعیت مهم را دریابند که پیشرفت و توسعه باید روندی پایدار داشته باشد. لذا در آبخیز شازند دستیابی به وضعیت قابل‌قبولی از فرآیند رشد، توسعه در جوامع انسانی نیازمند مهیا نمودن زمینه‌های برنامه‌ریزی بر پایه شناسایی محیط و بهره‌گیری از قابلیت‌های موجود در منطقه است. هم‌چنین شناخت، بررسی و تحلیل توانمندی‌های انسانی و طبیعی موجود می‌تواند به‌عنوان زیربنا و اصلی مهم مدنظر قرارگیرد. توجه به رشد بالای صنعت و آلودگی‌های ناشی از آن در آبخیز شازند، با در نظر گرفتن توانمندی‌های زراعی و مدرنیزه کردن آن می‌توان گامی مهم در بهبود اهداف توسعه پایدار برداشت. به‌این‌منظور پیشنهاد می‌شود در برنامه‌ریزی‌های کوتاه و بلندمدت مدیران استانی و محلی، افزایش سهم بخش کشاورزی از اعتبارات سرمایه‌ای در بودجهٔ عمومی صورت گیرد. هم‌چنین، افزایش سهم بخش کشاورزی از تسهیلات بانکی و نیز هدایت منابع بانکی به تجهیز و نوسازی بنگاه‌های بخش کشاورزی می‌تواند نقش مؤثری در زمینهٔ افزایش بهره‌وری و اشتغال در این بخش ایفا کند.

کلمات کلیدی: استاندارد جهانی، اهداف توسعه پایدار، پایداری بوم‌سازگان، عملکرد آبخیز، مدیریت جامع آبخیز

استناد: صادقی، س.ح.ر.، علیمحمدی‌ثانی، م.، اکبری، س.ه.، نیکنام، ف.، جام‌گوهری، ف.، جلیلیان، م.، ملک، م.م.، یاقوتی، ر.، بهلکه، م.، و چمنی، ر. (۱۴۰۵). میزان دستیابی به شاخص‌های حفاظت و استفاده پایدار از بوم‌سازگان‌ها در چارچوب اهداف توسعه پایدار در حوزه آبخیز شازند استان مرکزی. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۴۹-۱۸. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2083818.1263

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

با توسعه اقتصادی، گسترش تجارت‌های بین‌المللی، تغییرات فرهنگی و شکل‌گیری فن‌آوری‌های نوین، توأم با افزایش خشک‌سالی، بیابان‌زایی، سیلاب و در کل تخریب آبخیزها، تقاضا برای تأمین منابع موردنیاز حیات انسانی افزایش‌یافته که باعث فشار بیش‌تر بر منابع طبیعی و محیط‌زیست شده است (Saberifar, 2025). این امر سبب شده مدیریت و استفاده اصولی از منابع خاک‌وآب و حفظ محیط‌زیست ضرورتی دوچندان یابد و به یکی از دغدغه‌های اصلی در برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای تبدیل شود (Chamani *et al.*, 2024). در همین ارتباط، محدودیت منابع خاک‌وآب در کشور و الزام به تحقق آرمان خودکفایی موجب شده است که از منابع خاک‌وآب موجود بیش‌ترین استفاده به عمل آید (López *et al.*, 2026).

بوم‌سازگان‌ها[1] یکی از مهم‌ترین منابع ارائه خدمات و کارکردهای موردنیاز بشر در جهان به‌شمار می‌روند و بخش بزرگی از خدمات متوقع را برای میلیون‌ها انسان فراهم می‌کنند. مشکلات موجود به‌طورجدی تعادل بوم‌سازگان‌ها را ضعیف کرده و بقای انسان را تهدید می‌کند (Wang *et al.*, 2024a; Nasiri *et al.*, 2025). باتوجه به اهمیت بوم‌سازگان‌ها در حفظ تعادل زمین و تنوع‌زیستی، بررسی زمان، مکان و ماهیت بروز تغییر در آن‌ها، مدیریت بهتر و هم‌چنین تخمین عدم‌توانایی یک بوم‌سازگان در تحمل عوامل تنش‌زا به‌عنوان یک چالش اساسی مطرح شده است (Karami *et al.*, 2025).

حوزه‌های آبخیز کشور به‌عنوان بستر شکل‌گیری و رشد و توسعه بوم‌سازگان، به سبب تغییرات حاصل از فعالیت‌های انسانی روزبه‌روز به سمت ناپایداری میل می‌کنند. چنان‌چه برخی از این تغییرات از آستانه حفاظتی حوزه‌های آبخیز عبور نماید، موجب کاهش سلامت و افت خدمات مورد انتظار از آبخیز خواهد شد (Mousavi *et al.*, 2021). از همین‌رو اطلاع از تنش‌های موجود و وضعیت حوزه آبخیز در پی تغییرات ایجادشده با هدف حفظ عملکرد خدمات و سلامت بوم‌سازگان‌های تأمین‌کننده نیازهای حیاتی موردنیاز انسان ضرورت می‌یابد (Sadeghi *et al.*, 2022; Talampas *et al.*, 2025). در چنین حالتی می‌توان با تکیه‌بر منابع و ظرفیت‌ها و هم‌چنین یادگیری شیوه برخورد صحیح با تنش‌ها، موجبات خودسامان‌دهی[2] و بازیابی[3] تعادل حوزه‌های آبخیز و درنهایت بهبود وضعیت آبخیز را فراهم کرد. در این ارتباط ارزیابی عملکرد بوم‌سازگان‌های مختلف آبخیزها را می‌توان به‌عنوان گامی در جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار (SDGs)[4] نیز تلقی کرد، چراکه توسعه پایدار، آرمانی با چشم‌انداز بلندمدت است که برای دست‌یابی به آن باید از رویکردهای واقعی با راهبردهای کوتاه‌مدت استفاده نمود که ضمن تأمین نیازها، به برابری و بهبود کیفیت بوم‌سازگان نیز توجه شود.

پژوهش‌های متعددی شاخص‌های اهداف توسعه پایدار را موردبررسی قرارداده‌اند؛ به‌طورنمونه Frank و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی ذهن آگاه و آموزش در جهت اهداف جهانی توسعه پایدار در آلمان پرداختند. در این پژوهش به آموزش برای کاهش پیامدها، سازگاری و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و مصرف پایدار پرداخته و برخی دیدگاه‌های انتقادی و راهکارهای مناسب در راستای اهداف جهانی توسعه پایدار ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که آموزش برای توسعه پایدار مستلزم رویکردی جامع است که نه‌تنها بر انتقال دانش، بلکه بر توسعه شایستگی‌ها، ارزش‌ها و نگرش‌هایی تمرکز کند تا رفتارهای محیط‌زیستی پایدار را تقویت کند. Riahi و همکاران (۲۰۲۴) نیز به ارزیابی هم‌سویی شاخص‌های توسعه پایدار حوزه آبخیز نکارود با اهداف جهانی توسعه پایدار سازمان ملل متحد پرداختند. در این

[1] Ecosystems
[2] Self-Organization
[3] Storation
[4] Sustainable Development Goals (SDGs)

پژوهش شاخص‌ها نرمال‌سازی[1]، وزن‌دهی، تجمیع و در چهار دسته از قابل‌دستیابی تا بسیار چالش‌برانگیز رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که از میان اهداف توسعه پایدار، پنج هدف بالاتر از میانگین جهانی عملکرد داشتند که اهداف ۳ (سلامت کامل و رفاه) و ۱ (جامعه بدون فقر) به‌ترتیب با ۶۹/۸۲ و ۵۷/۹۷ درصد بالاترین اهداف ۷ (دسترسی به انرژی پاک) و ۱۶ (صلح و عدالت) به‌ترتیب با ۵۱/۰۸ و ۵۴/۶۲ درصد کم‌ترین عملکرد را بالاتر از میانگین جهانی نشان دادند. شاخص‌های هدف ۳ و شاخص ۱۰۰ درصدی هدف ۱ تأثیر مثبت، و عملکرد نه هدف پایین‌تر از میانگین جهانی بود که کم‌ترین مربوط به هدف ۲ (۱۵/۲۴ درصد) و سپس اهداف ۹، ۱۷، ۱۰ و ۶ قرار داشت. شاخص‌های مربوط به اهداف ۲، ۹ و ۱۰ بیش ترین تأثیر منفی را بر عملکرد آن اهداف داشتند. برهمین اساس این پژوهش عملکرد کلی ۳۶/۴۲ درصد با شرایط بسیار چالش‌برانگیز در دستیابی به اهداف جهانی توسعه پایدار برای حوزه آبخیز نکارود را تأیید کرد. هم‌چنین Naseer و همکاران (۲۰۲۵) به ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی بر پایه سهم کیفیت حکمرانی[2]، انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و رشد اقتصادی در کشورهای توسعه‌یافته پرداختند. یافته‌های حاصل از تحلیل‌های پیشرفته اقتصادسنجی، نحوه تأثیر عوامل مذکور بر پایداری محیط‌زیستی و اقتصادهای نوظهور و توسعه‌یافته را نشان داد. هم‌چنین در این پژوهش رشد اقتصادی به‌عنوان یک عامل مؤثر بر عملکرد محیط‌زیستی و پیشرفت اهداف جهانی توسعه پایدار مطرح شده است. Bahlekeh و Sadeghi (۲۰۲۶) به ارزیابی زیستایی[3] آبخیز شازند براساس ۱۱۷ شاخص توسعه پایدار و آستانه‌های تاب‌آوری[4] و گسست[5] پرداختند. در این پژوهش ارتباط متقابل معیارهای مختلف بر وضعیت زیستایی با استفاده از مدل ساختاری-تفسیری ISM[6] و روش MICMAC[7] مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج ارزیابی عملکرد آبخیز شازند نشان داد که هدف ۱۳ (اقدام برای سازگاری با تغییرات آب‌وهوا) با ۸۰/۶۳ درصد بالاترین عملکرد و هدف ۱۷ (تقویت مشارکت جهانی) با ۳۰/۷۱ درصد کم‌ترین عملکرد را داشته‌اند. اخیراً نیز Chen و همکاران (۲۰۲۶) به اهمیت اجرای اهداف توسعه پایدار با توجه به روند افزایشی جمعیت پرداختند. این پژوهش یک چارچوب ارزیابی یکپارچه شامل ۱۷ هدف و ۸۰ شاخص برای Beijing-Tianjin-Hebei چین ارائه داده است. از نظر روش‌شناختی، نتایج ترکیبی از امتیاز اهداف توسعه پایدار[8]، امتیاز یکنواختی[9] و یک مدل ارزیابی اثر هم‌افزایی است که نابرابری‌های مکانی-زمانی در تراکم‌های شهری را موردبررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان داد که امتیاز اهداف توسعه پایدار به میزان ۱۷/۳ درصد افزایش یافته که با دستاوردهای قابل‌توجهی در اهداف اجتماعی و اقتصادی همراه بوده، اما پیشرفت در اهداف محیط‌زیستی ازجمله هدف ۱۳ (اقدام برای سازگاری با تغییرات آب‌وهوا) و ۱۵ (حفاظت از بوم‌سازگان) محدود مانده است.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی در ارتباط با بررسی اهداف توسعه پایدار انجام شده است؛ اما یک روش یکپارچه برای ارزیابی عملکرد فعلی حوزه‌های آبخیز در دستیابی به اهداف جهانی توسعه پایدار کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از بومی‌سازی بالاترین و پایین‌ترین جهانی آستانه شاخص‌ها و مقایسه آن با شرایط فعلی آبخیز به ارزیابی نقاط قوت و ضعف منطقه پرداخته شده است. زیرا ارائه یک برنامه اقدام با رویکرد آینده‌پژوهی

[1] Normalization
[2] Governance
[3] Viability
[4] Resilence
[5] Release/ Rupture
[6] Interpretive Structural Modeling (ISM)
[7] Matrix of Crossed Impact Multiplications Applied to a Classification (MICMAC)
[8] SDG Score (SS)
[9] Evenness Score (ES)

ازجمله سنجش عملکرد آبخیزها ضروری است تا دریچه‌ای نو برای عملکرد مطلوب مدیران توسعه‌ای ایجاد شود. لذا در این پژوهش سعی شده است تقویت عملکرد شاخص‌های توسعه پایدار در آبخیز شازند استان مرکزی از طریق شناسایی و تحلیل شاخص‌های مرتبط با حفاظت و بهره‌برداری پایدار از بوم‌سازگان‌ها موردبررسی قرارگیرد. برای این منظور، از میان شاخص‌های توسعه پایدار، شاخص‌های دارای بیش‌ترین ارتباط موضوعی با حفاظت و پایداری بوم‌سازگان‌ها انتخاب و راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفظ تنوع زیستی، بهبود کارکرد بوم‌سازگان‌ها و بهبود معیشت بهره‌برداران به صورت نمونه در آبخیز شازند مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

پژوهش حاضر در آبخیز شازند واقع در استان مرکزی با مساحت ۱۷۴۰ کیلومترمربع و مختصات جغرافیایی "۱۵ '۴ °۴۹ تا "۱۲ '۵۲ °۴۹ طول شرقی و "۴۲ '۴۴ °۳۳ تا "۱۳ '۱۲ °۳۴ عرض شمالی مندرج در شکل ۱ برنامه‌ریزی شد. کاربری اراضی منطقه عمدتاً از مرتع، اراضی زراعی و باغ‌های میوه تشکیل شده است. آبخیز شازند دارای خاک‌های متنوعی ازجمله لس، خاک آبرفتی رودخانه‌ها و خاک شور-قلیایی است، انواع مختلف خاک به بهره‌وری کشاورزی و بهره‌برداری از زمین در این منطقه کمک می‌کند (Sharafi, 2023). طرح‌های توسعه‌ای انجام شده ازجمله پتروشیمی، پالایشگاه و نیروگاه حرارتی در این منطقه باعث تغییر جمعیت و تبدیل اراضی طبیعی به اراضی زراعی و مناطق مسکونی شده است (Hazbavi *et al.*, 2018; Nasiri *et al.*, 2025). در نتیجه این توسعه، تغییرات سریعی ازجمله تغییرات گسترده در شیوه‌های زراعی، کاهش فعالیت‌های زراعی در برخی مناطق، گسترش بی‌رویه شهرها، توسعه جاده‌ها و هم‌چنین فشار مهاجرت، آمدوشد متراکم و فعالیت‌های تفریحی رخ داده است (Davudirad *et al.*, 2016; Silabi *et al.*, 2025).

مراحل پژوهش

انتخاب و محاسبه شاخص‌های موضوعی اهداف جهانی توسعه پایدار

در ابتدا با توجه به هدف پژوهش در خصوص بررسی عملکرد حفاظت از بوم‌سازگان‌های آبخیز شازند، ۳۳ شاخص از بین ۲۶۲ شاخص توسعه پایدار انتخاب شدند. شاخص‌های استفاده شده و روش محاسبه آن‌ها در جدول پیوست ارائه شده است. سپس ضریب نسبی روایی گویه (CVR)[1] "ضرورت معیار" با کمینه قابل‌قبول ۰/۲۹ با استفاده از سه گزینه و رابطه (۱) به‌دست آمد.

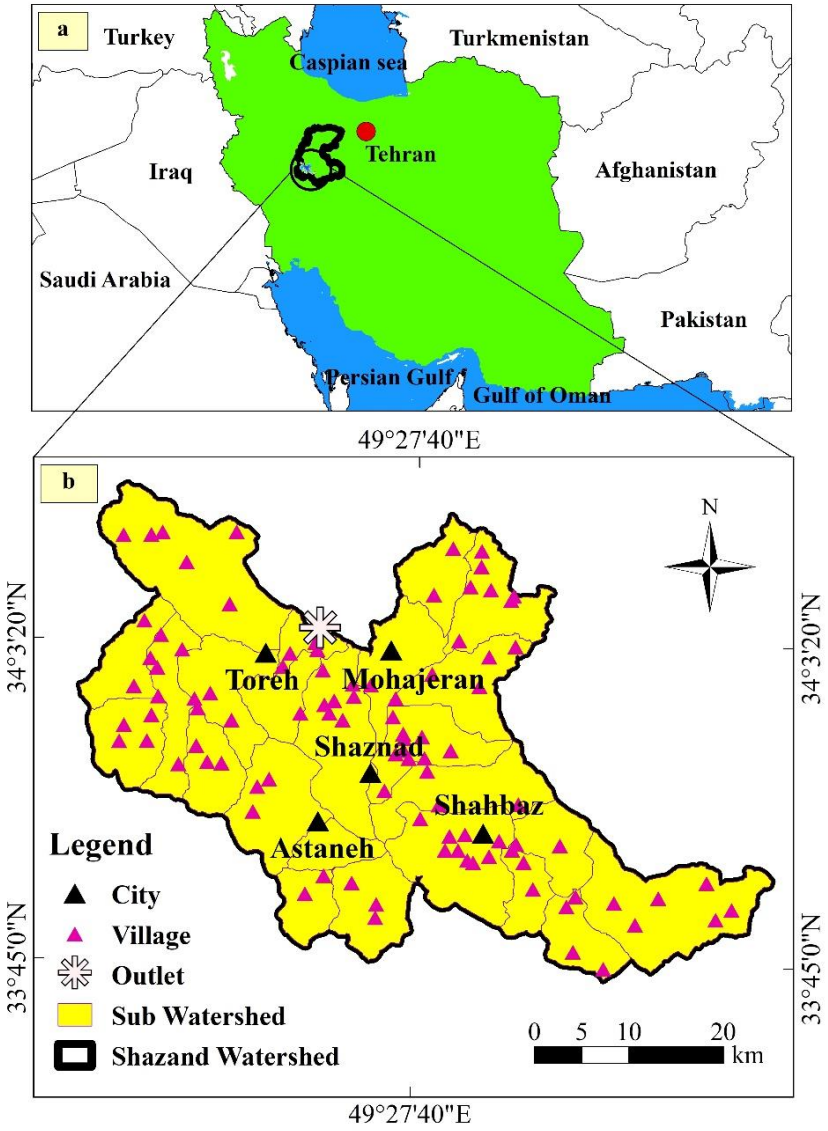
$$CVR = \frac{n_e - 0.5N}{0.5N} \qquad (۱)$$

که در آن n_e تعداد متخصصین با انتخاب گزینه ضروری و N تعداد کل متخصصین مصاحبه‌شده است. هم‌چنین شاخص روایی گویه (CVI)[2] "مرتبط بودن معیار" با کمینه قابل‌قبول ۰/۷۹ نیز با استفاده از چهار گزینه از طریق تقسیم تعداد خبرگان با انتخاب گزینه‌های ۳ و ۴ بر تعداد کل خبرگان محاسبه شد (Lindell & Brandt, 1999). کاربست شاخص‌های مزبور با نظرخواهی از ۴۰ متخصص از دانشگاه‌ها، سازمان‌ها و اداره‌های مرتبط با استفاده از پرسشنامه آزمون شدند. در این راستا تعداد متخصصان با استفاده از روش نمونه‌گیری هدف‌مند انتخاب شدند تا از شمول افراد آگاه، طبق پژوهش Etikan و همکاران (۲۰۱۶) اطمینان حاصل شود. این هیئت شامل نمایندگان دانشگاه‌ها، مؤسسات پژوهشی و سازمان‌های دولتی مربوطه است تا طیف وسیعی از صلاحیت‌ها در مدیریت حوزه آبخیز را داشته باشند. متخصصین بر اساس دلایل از پیش تعیین‌شده شامل (۱) حداقل پنج سال سابقه حرفه‌ای یا پژوهشی در علوم حوزه آبخیز، مدیریت محیط‌زیست یا یک حوزه مرتبط و (۲) سابقه اجرایی بیش از پنج سال در مدیریت حوزه آبخیز باشد. در ادامه ۱۲ معیار با توجه به نظر

[1] Content Validity Ratio (CVR)

[2] Content Validity Index (CVI)

متخصصین حذف و برای شاخص‌های باقی‌مانده حدود آستانه‌ها تعیین شد.



شکل ۱- موقعیت مکانی آبخیز شازند در ایران (الف)، استان مرکزی (ب)

Figure 1- Location of Shazand Watershed in Iran (a), Markazi Province (b)

تعیین حدآستانه شاخص‌های مورد استفاده

برای محاسبه عملکرد هر یک از شاخص‌های ارائه شده نیازمند تعیین حدآستانه بالاترین جهانی، حد استاندارد (بهینه) و پایین‌ترین جهانی است، به این منظور مقادیر هر یک از شاخص‌ها از طریق یک رویکرد چندمنبعی تعیین شدند. در صورت وجود، شاخص‌های استاندارد از فراداده‌های جهانی اهداف توسعه پایدار و گزارش‌های بین‌المللی[1]، اتخاذ شدند. برای برخی شاخص‌ها، آستانه‌ها بر اساس استانداردهای ملی و منطقه‌ای از منابع رسمی ایران تعریف و با اعتبارسنجی از هیئت متخصصان تکمیل

[1] https://unstats.un.org/sdgs/metadata/?Text=&Goal=2&Target=2.a

و هم‌چنین آستانه‌های اعمال‌شده با پژوهش‌های مشابه در حوزه‌های آبخیز ایران مطابقت داده شد. در مرحله بعد، آستانه‌ها با استفاده از پژوهش‌های Lafortune و همکاران (۲۰۱۸)، Riahi و همکاران (۲۰۲۴) و Bahlekeh و Sadeghi (۲۰۲۶)، گزارش‌های اهداف جهانی توسعه پایدار، مقالات مرتبط، درگاه ملی آمار، مراجعه‌های متعدد به اداره‌ها و سازمان‌های مرتبط به شرح مندرج در جدول ۱ تکمیل شد.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار

(بالاترین جهانی، بهینه، پایین‌ترین جهانی، ایران و آبخیز شازند در استان مرکزی)

Table 1- Values of Sustainable Development Goals of ecosystem conservation indicators (highest global, optimal, lowest global, Iran and Shazand Watershed in Markazi Province, Iran)

شاخص	کد	آبخیز شازند	ایران	بالاترین جهانی	حد بهینه	پایین‌ترین جهانی	ضریب‌نسبی‌روایی	شاخص روایی
شیوع ناامنی غذایی ناشی از اقتصاد (درصد)	EN1	19.00	24.00	0.00	5.12	30.00	0.60	0.93
نسبت مناطق کشاورزی مولد و پایدار (درصد)	EN2	1.00	-	100.00	50.00	0.00	0.90	1.00
تعداد چاه‌های کشاورزی	EN3	78.00	-	10.00	70.00	130.00	0.45	0.98
نسبت نژادهای محلی گیاهی در معرض خطر انقراض (درصد)	EN4	15.00	25.00	0.00	12.50	25.00	0.50	0.85
عملکرد غلات (تن بر هکتار)	EN5	2.04	1.80	7.00	2.50	0.20	0.65	0.93
پهنه‌های آبی باکیفیت و بهداشتی (درصد)	EN6	65.00	-	100.00	80.00	13.00	0.75	0.93
سطح تنش کشاورزی کشت آبی (درصد)	EN7	4.00	10.00	0.00	21.00	42.00	1.00	0.90
مشارکت جوامع محلی در بهبود مدیریت آب (درصد)	EN8	42.00	-	100.00	60.00	0.00	0.70	0.88
جمعیت برخوردار از سوخت‌های پاک و فناوری برای پخت‌وپز (درصد)	EN9	92.30	96.40	100.00	85.00	2.00	0.50	0.88
اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا (درصد)	EN10	6.00	-	0.00	50.00	100.00	0.40	0.90
سرانه فضای سبز (مترمربع به ازای هر نفر)	EN11	16.00	12.00	38.00	20.50	3.00	0.40	0.90
مصرف نیتروژن وارداتی (کیلوگرم به ازای هر نفر جمعیت)	EN12	21.00	27.00	0.00	5.00	45.00	0.50	0.80
مرگ‌ومیرها و مفقودین متأثر از بحران‌ها (به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت)	EN13	0.00	0.15	0.00	3.00	300.00	0.55	0.88
رخداد بلایای طبیعی (درصد)	EN14	4.00	12.00	2.00	15.50	29.00	0.50	0.83
میانگین غلظت گازهای آلاینده هوا (میکرومول بر مترمربع)	EN15	199.00	318.00	89.00	218.00	347.00	0.70	0.95
مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری (درصد)	EN16	11.90	43.50	100.00	85.00	0.00	0.80	0.93
شاخص پوشش سبز کوهستان (درصد)	EN17	18.00	34.30	99.35	80.00	17.00	0.65	0.93
میزان شکار غیرقانونی (درصد)	EN18	10.00	-	0.00	32.50	65.00	0.45	0.85
همکاری آبخیزنشینان در فعالیت‌ها و سیاست‌های دولتی (درصد)	EN19	40.00	-	85.00	70.00	0.00	0.90	0.88

دو معیار با توجه به عدم دسترسی به داده‌ها حذف شد. لازم به ذکر است طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های اهداف جهانی توسعه پایدار بر حسب بالاترین تا پایین‌ترین وضعیت جهانی و در شش طبقه انجام شده بود که با توجه

به هدف پژوهش و جایگاه منطقه در جهان و ایران برای هریک از شاخص‌ها بومی‌سازی صورت گرفت. سپس مقادیر هر یک از شاخص‌ها در ایران و آبخیز شازند محاسبه شد. هم‌چنین مقدارهای آزمون CVR و CVI در جدول ۱ ذکر شده است. برای ارزیابی عملکرد، شرایط فعلی آبخیز شازند نسبت به بالاترین جهانی و پایین‌ترین جهانی موردسنجش قرار گرفت.

نرمال‌سازی و طبقه‌بندی شاخص‌های مورد استفاده

با استفاده از کران بالا و پایین، شاخص‌ها به صورت خطی براساس رابطه‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب برای شاخص‌ها با تاثیر مثبت و منفی، به مقیاسی بین صفر تا ۱۰۰ نرمال‌سازی شدند.

$$X_n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۲)$$

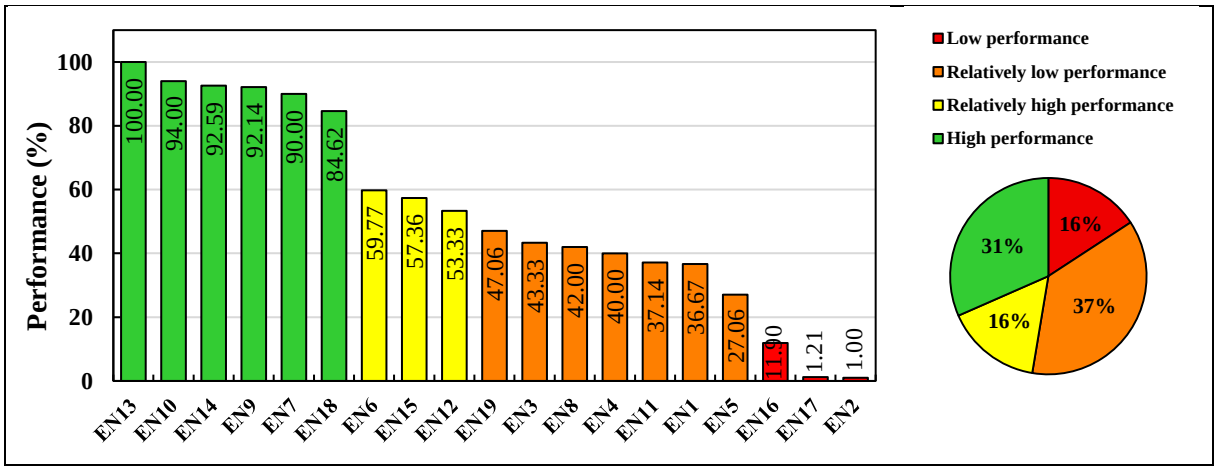
$$X_n = \frac{X_{max} - X_i}{X_{max} - X_{min}} \quad (۳)$$

که در آن X_n ، X_i، X_{min} و X_{max} به‌ترتیب بیان‌گر عدد نرمال‌شده، مقدار عددی داده خام، حدپایینی و بالایی شاخص موردنظر است. مقدار عددی نرمال‌شده نیز، بیان‌گر فاصله از بدترین و بهترین حالت شاخص موردنظر است. سپس براساس گزارش Lafortune و همکاران (۲۰۱۸) و پژوهش Riahi و همکاران (۲۰۲۴)، اهداف و شاخص‌ها با چهار رنگ سبز (بالاتر از ۷۵ درصد جهانی و عملکرد بالا، زرد بین ۵۰ تا ۷۵ درصد جهانی و عملکرد نسبتاً بالا، نارنجی بین ۲۵ تا ۵۰ درصد جهانی با عملکرد نسبتاً پایین و قرمز کم‌تر از ۲۵ درصد با عملکرد پایین رتبه‌بندی شدند. سپس پراکنش مکانی هر یک از زیرآبخیزها با توجه به هدف پژوهش مشخص شد. طبقه‌بندی هر زیرآبخیز به‌صورت عملکرد بالا (۰/۹۱ تا ۱)، بالا با گرایش منفی (۰/۸۱ تا ۰/۹۰)، نسبتاً بالا با گرایش مثبت (۰/۷۱ تا ۰/۸۰)، نسبتاً بالا با گرایش منفی (۰/۶۱ تا ۰/۷۰)، متوسط بالا با گرایش مثبت (۰/۵۱ تا ۰/۶۰)، متوسط بالا با گرایش منفی (۰/۴۱ تا ۰/۵۰)، نسبتاً پایین با گرایش مثبت (۰/۳۱ تا ۰/۴۰)، نسبتاً پایین با گرایش منفی (۰/۲۱ تا ۰/۳۰)، پایین با گرایش مثبت (۰/۱۱ تا ۰/۲۰) و پایین (۰ تا ۰/۱۰) انجام گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد شاخص‌های مرتبط با حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار

در این پژوهش ابتدا به محاسبه عملکرد هریک از شاخص‌های مرتبط با حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار جهانی پرداخته شد. نتایج عملکرد شاخص‌ها منتج از محاسبه شرایط آبخیز شازند نسبت به آستانه‌های بالا و پایین در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج عملکرد شاخص‌های ارائه شده در شکل ۲، آبخیز شازند در دستیابی به شاخص‌های مرگ‌ومیرها و مفقودین متأثر از بلایای طبیعی و اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا به‌ترتیب با ۱۰۰ و ۹۴ درصد بالاترین عملکرد را داشته و در دستیابی به شاخص‌های نسبت مناطق کشاورزی مولد و پایدار، شاخص پوشش سبز کوهستان و مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری به‌ترتیب با ۱، ۱/۲۱ و ۱۱/۹درصد کم‌ترین عملکرد را به خود اختصاص داده است. دلایل وضعیت هر یک از شاخص‌ها به تفکیک در ذیل ارائه شده است:



شکل ۲- عملکرد شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار در آبخیز شازند، استان مرکزی

Figure 2- Performance of ecosystem conservation indicators of sustainable development goals in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

شیوع ناامنی غذایی ناشی از اقتصاد

امنیت غذایی از اهداف مهم توسعه پایدار است که همچنان در دستور کار توسعه سازمان مل متحد و دست اندرکاران توسعه قرار دارد. با توجه به نتایج این پژوهش شاخص شیوع ناامنی غذایی در ایران با امتیاز ۲۴ درصد نزدیک به پایین‌ترین مقدار جهانی ۳۰ درصد است. در سطح کشور برای کاهش ناامنی غذایی از راهبردهای مقابله‌ای مانند تغذیه کودکان در مدارس، کمک به خانوارهای محروم و کم‌توان (تحت پوشش نهادهای رسمی چون کمیته امداد و بهزیستی) و راهبرد یارانه و کمک‌های معیشتی استفاده می‌شود (Jozi *et al.*, 2020). در این راستا در سال‌های گذشته تخصیص یارانه به نهاده‌های زراعی و دامی، کاهش هزینه‌های تولید و به دنبال آن تعدیل و ثبات در مواد غذایی ضروری برای گرواران را بهبود می‌بخشید که در حال حاضر این یارانه حذف شده و نهاده‌های زراعی و دامی با قیمت آزاد در اختیار تولیدکننده قرار می‌گیرد. به عبارتی دیگر قیمت بالای تمام شده محصولات زارعی و دامی، کاهش مصرف آن و افزایش ناامنی غذایی را در سطح کشور در پی خواهد داشت.

آبخیز شازند نیز از این قاعده مستثنی نیست و برای بهبود امنیت غذایی خانوارها، نیاز به همکاری و اقدام هماهنگ و همه‌جانبه ارگان‌های مختلف دولتی و غیردولتی است تا بتوان الگوهای پایدار تولیدی و مصرفی را ایجاد نمود. حال آن‌که آبخیز شازند با مقدار ۱۹ درصد وضعیت بهتری نسبت به متوسط کشور برخوردار است. از آن‌جایی‌که حوزه آبخیز شازند یک آبخیز صنعتی به‌شمار می‌رود و ساکنین منطقه دارای وضعیت معیشتی وابسته به آن می‌باشند. در این راستا ظرفیت و توانایی سازگاری و مقابله خانوار با ناامنی غذایی بستگی به موقعیت مالی، اجتماعی، طبیعی و فیزیکی دارد (Antwi-Agyei *et al.*, 2013; Islam & Al Mamun, 2020). هم‌چنین توانایی یک فرد برای مقابله با دوره ناامنی غذایی به شدت به دسترسی به بازار کار و دارایی او وابسته است (Radimer *et al.*, 1992) که تأثیر خیلی‌شدید و مستقیم وضعیت درآمدی خانوار نسبت به ناامنی غذایی را نشان می‌دهد و می‌توان این موارد را از دلایل امنیت غذایی بالاتر آبخیز شازند نسبت به ایران برشمرد.

نسبت مناطق کشاورزی مولد و پایدار

رشد و توسعه پایدار کشاورزی یکی از شاخص‌ترین و مهم‌ترین اهداف هر کشوری است که تحقق آن از طریق تحولات اساسی و همه‌جانبه در ساختار کشاورزی، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع و امکانات، سازماندهی و هدایت مناسب فعالیت‌ها در چارچوب

برنامه‌ریزی دقیق، علمی و منطقی امکان‌پذیر می‌شود (Khorami *et al.*, 2023). با توجه به بررسی‌های انجام شده و عدم وجود آمار کافی در این بخش در سطح کشور، با این‌حال تمرکز بر افزایش بازدهی و بهبود نظام ساختاری کشاورزی با تمرکز بر شرایط طبیعی و اقتصادی شکننده کشور ایران، از ضروریات لازم‌الاجرا در این بخش محسوب می‌شود (Hajarian, 2025). آبخیز شازند نیز در بخش مناطق کشاورزی مولد و پایدار با دارا بودن امتیاز ۱ درصد و در حد پایین‌ترین جهانی (صفر) پایین‌ترین عملکرد در بین تمامی شاخص‌ها را به خود اختصاص داده است. در این راستا عملکرد پایین بخش کشاورزی طبق گزارش مستند از سازمان جهادکشاورزی استان مرکزی، وجود قطعات کوچک و پراکنده زمین‌های زراعی، کمبود و گرانی نهاده‌ها، عدم سرمایه‌گذاری کشاورزان برای سامانه‌های جدید و پائین بودن سطح سواد کشاورزان بوده است، در نتیجه این عوامل موجب افت عملکرد این شاخص در آبخیز شازند شده است. در این ارتباط با به‌کارگیری فن‌آوری‌هایی مانند سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، علاوه بر کاهش اتلاف آب، می‌توان حداکثر استفاده از منابع آبی را به‌دست آورد و سطح زیرکشت محصولات را تا ۵۰ درصد افزایش داد (Piramoon *et al.*, 2024). هم‌چنین افزایش بهره‌وری در بخش زراعت با ایجاد گلخانه‌ها از راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد این شاخص به شمار می‌رود (Rahimi Haghighi *et al.*, 2022). در این راستا بهبود دسترسی به نهاده‌های کشاورزی، دسترسی به ماشین‌آلات نوین، عضویت در سازمان‌های مرتبط و دریافت مشوق‌های دولتی را می‌توان از عوامل مؤثر بر بهبود وضعیت معیشتی کشاورزان منطقه به‌شمار آورد.

تعداد چاه‌های کشاورزی

کشاورزی و تولید غذا مسئله‌ای حیاتی برای هر کشوری است؛ اما در کنار آن منابع آبی و مدیریت صحیح آن نیز موضوع مهم و راهبردی دیگری است که با توجه به شرایط اقلیمی باید مورد توجه قرار گیرد (Lavhengwa *et al.*, 2025). افزایش کمبود آب کشاورزی نه‌تنها گسترش سطح آبیاری را محدود می‌کند، بلکه مستقیماً تولیدات کشاورزی را کاهش می‌دهد و امنیت غذایی و درآمد روستاییان را تهدید می‌کند (Zhu *et al.*, 2019)، لذا حفاظت از آب کشاورزی جز مهم‌ترین عوامل در جهت نیل به توسعه پایدار محسوب می‌شود (Pang *et al.*, 2020). هم‌چنین کشت محصولات آب‌بر در مناطق کم‌بهره از آب، استفاده از روش‌های سنتی و منسوخ آبیاری و افزایش چاه‌های آب مجاز و غیرمجاز در دهه‌های اخیر از مواردی است که به بحران آب در کشور دامن زده است (Ehsani Kolikand *et al.*, 2023). با توجه به نتایج این پژوهش، عملکرد شاخص تعداد چاه‌های کشاورزی در کشور نامشخص و در آبخیز شازند در وضعیت مطلوبی قرار ندارد و تعداد آن از استاندارد جهانی نیز بالاتر است. در این راستا مشارکت کشاورزان در خاموش کردن چاه‌های کشاورزی در فصول غیرزراعی و استفاده از جریان آب‌های سطحی و رودخانه‌ها، نقش به‌سزایی در کاهش افت سالیانه مخازن دشت‌های این منطقه خواهد داشت. هم‌چنین با توسعه سامانه نوین آبیاری و تغییر الگوی کشت، کاهش در برداشت منابع آبی محقق خواهد شد. زیرا بازدهی بخش کشاورزی در سامانه آبیاری غرقابی ۳۰ درصد است و عملاً ۷۰ درصد آب هدر می‌رود. لذا ارائه راهبردهای اصولی در بخش کشاورزی به دلیل نقش آن در رشد اقتصادی، امنیت غذایی، ارزآوری و توسعه از اهمیت بالایی برخوردار است. براین اساس آموزش و اطلاع‌رسانی در بخش کشاورزی می‌تواند کمک شایانی به مدیریت آن کند. علاوه‌براین توسعه و تقویت زیرساخت‌ها، تجهیزات و دسترسی به فناوری‌های به‌روز و تهیه برنامه راهبردی در جهت بهبود دانش و مهارت کشاورزی بسیار حائز اهمیت است (Sadeghi *et al.*, 2024b; Arabi *et al.*, 2024).

نسبت نژادهای محلی گیاهی در معرض خطر انقراض

از آن‌جا که گیاهان نقش بنیادینی در ساختار و عملکرد بوم‌سازگان و تأمین خدمات ایفا می‌کنند، این شاخص به‌عنوان ابزاری معتبر برای سنجش اثربخشی

سیاست‌ها و برنامه‌های حفاظت محیط‌زیست در مسیر توسعه پایدار مورد توجه نهادهای بین‌المللی قرار گرفته است (Butchart *et al.*, 2007). هم‌چنین کاهش مقدار این شاخص، نشان‌دهنده تضعیف ظرفیت بوم‌سازگان در حفظ تعادل بوم‌شناختی محسوب می‌شود (Nic Lughadha *et al.*, 2020). بهترین وضعیت این شاخص در سطح جهانی، مربوط به مناطقی است که مقدار این شاخص برابر با صفر است، در حالی که پایین‌ترین وضعیت جهانی مقدار ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که ایران با مقدار ۲۵ درصد در وضعیت نامطلوبی از نظر این شاخص قرار دارد که بیان‌گر فشار قابل‌توجه بر تنوع زیستی گیاهی در سطح کشور است. هم‌چنین گویای این است که بخش قابل‌توجهی از گیاهان در حال حاضر در معرض خطر انقراض قرار دارند و روند تغییرات شاخص فهرست قرمز در سال‌های اخیر، افزایش فشارهای انسانی بر تنوع زیستی گیاهی بوده است؛ روندی که تداوم آن می‌تواند دستیابی به اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه هدف توقف کاهش تنوع زیستی تا افق ۲۰۳۰، را با چالش‌های اساسی مواجه سازد. در راستای نتایج این پژوهش Jalili و Jamzad (۱۹۹۹) پراکنش محدود جغرافیایی، تأثیرهای انسانی و محدودیت زیستی گیاه را به‌ترتیب به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وضعیت مخاطره گونه‌های در معرض خطر ایران بیان نمودند. در مقابل، آبخیز شازند با مقدار ۱۵ درصد وضعیت بهتری نسبت به متوسط ایران دارد. این موضوع نشان می‌دهد در آبخیز شازند علی‌رغم وجود چالش‌ها، شرایط نسبت به سطح ملی مطلوب‌تر است. طبق پژوهش Jalili و Jamzad (۱۹۹۹) نیز فلور استان مرکزی در مقایسه با فلور ایران از وضعیت حفاظتی بهتری برخوردار است، زیرا گونه‌های در معرض خطر انقراض در واحد سطح در استان از موارد مشابه برای کل کشور کم‌تر است. با این حال، فاصله قابل‌توجه آبخیز شازند با بهترین وضعیت جهانی بیان‌گر آن است که اقدامات حفاظتی موجود کافی نبوده و ضرورت برنامه‌ریزی هدف‌مند برای حفظ و احیای تنوع زیستی گیاهی در این منطقه وجود دارد. در این راستا تهیه و اجرای طرح‌های حفاظت پایدار از بوم‌سازگان‌ها و افزایش سطوح ذخیره‌گاه‌های جنگلی و مرتعی در این مناطق در کنار برنامه‌های حفاظت از تنوع زیستی خارج از رویش‌گاه‌ها (تقویت باغ‌های گیاه‌شناسی و بانک ژن منابع طبیعی) بایستی در اولویت قرار گیرد.

عملکرد غلات

عملکرد غلات، نشان‌دهنده میزان بهره‌وری زمین در تولید محصولات اصلی غذایی است و تحت تأثیر عوامل متعددی ازجمله فناوری‌های کشاورزی، مدیریت نهاده‌ها، شرایط اقلیمی و سیاست‌های حمایتی قرار دارد (Yamini *et al.*, 2025). فقدان بهبود عملکرد در برخی مناطق می‌تواند تهدیدی برای امنیت غذایی و رفاه جمعیت‌های آسیب‌پذیر باشد، زیرا جمعیت جهان تا ۲۰۵۰ به حدود ۱۰ میلیارد نفر خواهد رسید و تقاضا برای غلات افزایش می‌یابد (Dai *et al.*, 2025). بنابراین، شاخص عملکرد غلات هم به‌عنوان ابزاری کلیدی برای پایش وضعیت فعلی و هم برای برنامه‌ریزی راهبردی به‌منظور بهبود پایداری کشاورزی و امنیت غذایی در سطح ملی و جهانی اهمیت دارد (Roy *et al.*, 2024). در سطح جهانی، بالاترین عملکرد غلات حدود هفت تن بر هکتار و پایین‌ترین مقدار آن حدود ۰/۲ تن بر هکتار است. براساس نتایج پژوهش حاضر عملکرد غلات در ایران برابر با ۱/۵ تن بر هکتار است که این مقدار نشان‌دهنده فاصله قابل‌توجه کشور با سطح مطلوب جهانی و بیان‌گر محدودیت‌های موجود در بهره‌وری کشاورزی است که با راهبردهای کشاورزی یکپارچه مانند مدیریت بهینه کود، کنترل آفات و به‌کارگیری فناوری‌های نوین می‌توان به‌طور قابل‌توجهی عملکرد غلات را افزایش داد. در آبخیز شازند، عملکرد غلات حدود ۲/۰۴ تن بر هکتار برآورد شده است که نسبت به متوسط ملی ایران وضعیت بهتری دارد. با این وجود، مقایسه این مقدار با بالاترین سطح جهانی نشان می‌دهد که آبخیز شازند هم‌چنان با چالش‌هایی در زمینه بهبود بهره‌وری، بهبود فناوری‌های کشاورزی و مدیریت بهینه منابع آب‌وخاک مواجه است که می‌توان با استفاده بهتر از زمین‌های موجود به کاهش فشار بر منابع طبیعی و احیای

بوم‌سازگان کمک کرد. در این راستا پژوهش Ghaffari و همکاران (۲۰۱۸) در شازند بیان‌گر آن است که با حذف مزارع کوچک و پراکنده و افزایش مقیاس واحدهای بهره‌برداری می‌توان موجب توسعه روستایی و به‌تبع آن توسعه ملی شد.

پهنه‌های آبی باکیفیت و بهداشتی

پهنه‌های آبی باکیفیت و بهداشتی، یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی پایداری محیط‌زیست و سلامت انسانی در چارچوب اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. در این راستا کمبود منابع آب سالم نه‌تنها بر اقتصاد و سلامت محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد، بلکه بر سلامت انسان نیز تأثیر می‌گذارد، دسترسی به منابع آب سالم یک نیاز اساسی توسعه پایدار است. بنابراین، نظارت و بهبود منابع آب، استفاده پایدار از منابع آب و حفاظت از آن‌ها برای بهبود سلامت محیط‌زیستی و اقتصاد منطقه بسیار مهم است (Sharma *et al.*, 2024). نتایج جهانی نشان می‌دهد که بالاترین مقدار این شاخص معادل ۱۰۰ و پایین‌ترین مقدار آن حدود ۱۳ درصد است که بیان‌گر تفاوت قابل‌توجه میان مناطق مختلف جهان است. در این میان، به دلیل محدودیت داده‌های ملی، امکان مقایسه مستقیم وضعیت ایران در این شاخص وجود ندارد. بررسی‌های انجام‌شده در آبخیز شازند نشان می‌دهد که حدود ۶۵ درصد از پهنه‌های آبی این منطقه از کیفیت و شرایط بهداشتی مطلوب برخوردار هستند. این مقدار بیان‌گر وضعیت نسبتاً مناسب آبخیز شازند در مقایسه با بسیاری از مناطق جهان و فاصله قابل‌قبول آن با حداقل جهانی است. با این حال، فاصله موجود تا سطح ایده‌آل جهانی نشان می‌دهد که هم‌چنان نیاز به اقدامات مدیریتی، کنترلی و برنامه‌ریزی دقیق به منظور بهبود کیفیت منابع آبی وجود دارد. در رابطه با شاخص پهنه‌های آبی باکیفیت و بهداشتی و منابع آلاینده آبخیز شازند می‌توان به فاضلاب‌های روستایی شامل زباله‌ها و فاضلاب‌های خانگی، کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات و وجود سازندهای آهکی در منطقه اشاره کرد که موجب پایین آمدن کیفیت آب‌ها شده است و برای بهبود سطح این شاخص بایستی اقدامات مدیریتی لازم انجام شود (Vaezihir *et al.*, 2017). از آن‌جایی که آلودگی منابع آب یکی از مسائل مهمی است که بر آبخیزها تأثیر منفی می‌گذارد؛ لذا مداخلات هدف‌مند برای کاهش آلودگی، مانند اجرای بهترین شیوه‌های مدیریتی[1] و تقویت چارچوب‌های نظارتی، برای کاهش این اثرات و حفاظت از منابع آب ضروری است (Li *et al.*, 2024).

سطح تنش کشاورزی کشت آبی

شاخص سطح تنش کشاورزی آبی، معیاری کلیدی برای سنجش پایداری بهره‌برداری از منابع آب در بخش کشاورزی است و تحت تأثیر اقلیم، الگوی کشت، روش‌های آبیاری و مدیریت منابع آب قرار دارد (FAO، 2018). این شاخص به‌طور مستقیم میزان فشار واردشده بر منابع آب تجدیدپذیر را منعکس می‌کند (UN-Water, 2016). ماهیت شاخص سطح تنش کشاورزی آبی به‌گونه‌ای است که افزایش آن در هر منطقه‌ای به‌عنوان نشانه‌ای از ناپایداری بهره‌برداری از منابع آب تلقی می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، تداوم برداشت بیش از ظرفیت منابع آب تجدیدپذیر می‌تواند به تضعیف امنیت معیشتی، کاهش تاب‌آوری کشاورزی و تشدید ناپایداری حوزه‌های آبخیز منجر شود (Falkenmark & Rockstrom, 2006). در سطح جهانی، بالاترین سطح تنش کشاورزی کشت آبی، ۴۲ درصد و پایین‌ترین مقدار آن صفر گزارش شده است (Lafortune, 2018). مقدار این شاخص در آبخیز شازند برابر با چهار درصد برآورد شده است که نشان‌دهنده پایین بودن تنش آبی کشاورزی است. این مقدار به مراتب پایین‌تر از استاندارد جهانی (۲۱ درصد) و هم‌چنین کم‌تر از مقدار

[1] Best Management Practices (BMPs)

گزارش‌شده برای ایران (۱۰ درصد) است. برخلاف متوسط کشور، در آبخیز شازند نتایج حاکی ازآن است که برداشت آب برای کشاورزی در این حوزه آبخیز متناسب با ظرفیت منابع آب تجدیدپذیر بوده و فشار قابل‌توجهی بر منابع آب وارد نشده است. هم‌چنین این عملکرد مطلوب را می‌توان نتیجه مجموعه‌ای از عوامل مدیریتی و طبیعی دانست. به‌عبارت‌دیگر این رویکرد در آبخیز شازند به‌طور نسبی محقق شده و زمینه‌ساز پایداری این شاخص بوده است. اگرچه حفظ وضعیت مطلوب فعلی در آبخیز شازند مستلزم تداوم مدیریت یکپارچه خاک‌وآب، افزایش نفوذ مؤثر بارش، کاهش تبخیروتعرق در چارچوب برنامه‌های توسعه کشاورزی و آبخیزداری است. چنین رویکردی می‌تواند تضمین‌کننده پایداری بلندمدت منابع آب و تداوم عملکرد مطلوب این شاخص در آبخیز شازند باشد.

مشارکت جوامع محلی در بهبود مدیریت آب

این شاخص توسعه پایدار، میزان وجود و کارایی سیاست‌ها و سازوکارهای مشارکت جوامع محلی در مدیریت منابع آب را ارزیابی می‌کند و به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی مدیریت یکپارچه منابع آب شناخته می‌شود (UN-Water, 2016). در این راستا فراهم آوردن زیرساخت‌های لازم برای این مهم بایستی به‌عنوان ارکان اصلی برنامه‌ریزی‌های مدیریتی حوزه آبخیز در نظر گرفته شود که این امر نیز جز با مشارکت و هماهنگی همه ارگان‌ها، سازمان‌ها، گرودارن و بهره‌برداران منابع آب میسر نخواهد شد (Cleaver & Hamada, 2010). لذا مشارکت مؤثر جوامع محلی می‌تواند از طریق افزایش پذیرش اجتماعی، بهبود انطباق‌پذیری تصمیمات مدیریتی و بهبود بهره‌وری استفاده از منابع آب، نقش مهمی در پایداری بلندمدت سامانه‌های آبی ایفا کند (Reed, 2008). براساس نتایج این پژوهش، مقدار شاخص مشارکت جوامع محلی در بهبود مدیریت آب در ایران نامشخص و در آبخیز شازند برابر با ۴۲ درصد برآورد شده است. این مقدار اگرچه بالاتر از حداقل جهانی (صفر) قرار دارد، اما هم‌چنان پایین‌تر از استاندارد جهانی (۶۰ درصد) است در حالی‌که چنین وضعیتی نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود برخی ظرفیت‌های نهادی یا محلی، مشارکت جوامع محلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و اجرای سیاست‌های مدیریت آب در حد متوسط بوده است. در این راستا گسترش رویکرد مدیریت مشارکتی[1] در کلیه ابعاد مرتبط با منابع آب می‌تواند شرایط کنونی را بهبود و شرایط مطلوب آینده را تا حدودی تضمین کند (Nugroho *et al.*, 2023). بهبود عملکرد این شاخص در آبخیز شازند مستلزم تقویت حکمرانی مشارکتی، ایجاد سازوکارهای نهادی پایدار برای حضور مؤثر جوامع محلی و بهبود ظرفیت‌های اجتماعی و نهادی در سطح محلی است. تجربه‌های موفق جهانی نشان می‌دهد که ادغام دانش بومی، مشارکت فعال گروداران و تفویض اختیار به سطوح محلی می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های اجتماعی–محیط‌زیستی منجر شود. بنابراین، بهبود مشارکت جوامع محلی می‌تواند به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی برای بهبود عملکرد این شاخص و حرکت به‌سوی مدیریت پایدار منابع آب در آبخیز شازند تلقی شود.

جمعیت برخوردار از سوخت‌های پاک و فناوری برای پخت‌وپز

اتکای خانوارها به سوخت‌های پاک، علاوه بر کاهش آلودگی هوای داخل منازل و پیامدهای بهداشتی، می‌تواند فشار بر منابع طبیعی، به‌ویژه پوشش گیاهی و خاک را کاهش داده و به پایداری بوم‌سازگان کمک کند (Ibe *et al.*, 2026). از سوی دیگر گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند اثرات محیط‌زیستی استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و نگرانی‌هایی مانند آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی را برطرف کند (Raza & Lin, 2022). بر اساس نتایج این پژوهش، مقدار این

[1] Co-Management

شاخص در آبخیز شازند ۹۲/۳ درصد برآورد شده است که بیان‌گر وضعیت نسبتاً مطلوب در دسترسی به سوخت‌ها و فناوری‌های پاک برای پخت‌وپز است. این مقدار اگرچه اندکی پایین‌تر از مقدار گزارش‌شده برای کل کشور (۹۶/۴ درصد) است، اما هم‌چنان فاصله قابل‌توجهی با کرانه پایین بهینه جهانی (۸۵ درصد) داشته و نشان‌دهنده جایگاه مناسب آبخیز شازند از منظر فقر انرژی خانگی است. چنین وضعیتی حاکی از آن است که بخش عمده جمعیت این حوزه آبخیز از وابستگی به سوخت‌های جامد سنتی، مانند هیزم و زی‌توده خام فاصله گرفته‌اند. از این منظر، وضعیت مطلوب این شاخص در آبخیز شازند می‌تواند به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده پایداری بوم‌سازگان و کاهش فشار غیرمستقیم بر منابع آب‌وخاک تلقی شود. هم‌چنین، دسترسی گسترده به انرژی پاک معمولاً با بهبود شاخص‌های رفاه، کاهش نابرابری انرژی و افزایش تاب‌آوری معیشتی خانوارها همراه است (UNDP, 2019). با این حال، اختلاف مشاهده‌شده میان مقدار شاخص در آبخیز شازند و میانگین ملی نشان می‌دهد که هنوز بخشی از جمعیت، به‌ویژه در سکونت‌گاه‌های پراکنده یا مناطق با دسترسی محدود به زیرساخت‌های انرژی، ممکن است به‌طور کامل از مزایای فناوری‌های پاک بهره‌مند نشده باشند. در صورت تداوم این وضعیت، این گروه‌ها می‌توانند به کانون‌های بالقوه فشار بر منابع طبیعی محلی تبدیل شوند. بنابراین، تداوم و هدف‌مندسازی سیاست‌های توسعه انرژی پاک، به‌ویژه در مقیاس محلی، برای حفظ و بهبود این شاخص ضروری است. هم‌چنین برای دستیابی به اهداف تعیین‌شده و هم‌ترازی بیش‌تر با میانگین ملی، لازم است سیاست‌های توسعه انرژی پاک با تمرکز بر گروه‌های باقی‌مانده و مناطق کم‌تر برخوردار ادامه یابد. در مجموع، بهبود و تثبیت عملکرد این شاخص می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های حمایتی مهم در مسیر توسعه پایدار و مدیریت یکپارچه آبخیز شازند تلقی شود.

اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا

پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی نشان می‌دهد که فراوانی و شدت بسیاری از انواع بلایای طبیعی احتمالاً در دهه‌های آینده بیش‌تر خواهد شد. در باب این روندها درک این موضوع برای سیاست‌گذاران بسیار مهم است. درواقع سیاست‌گذاران باید پیش‌بینی کنند که بلایای طبیعی چگونه بر زیرساخت‌ها اثرگذار است (Balist *et al.*, 2026). هم‌چنین بلایای طبیعی می‌تواند موجب خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها، اموال و صنایع کشورها شود که کاهش تولید را در پی دارد (Idroes *et al.*, 2023). نتایج جهانی نشان می‌دهد که بهترین وضعیت این شاخص صفر و بدترین مقدار آن ۱۰۰ درصد است، عدد آن در ایران نامشخص و در آبخیز شازند شش درصد را به خود اختصاص داده است. با توجه به نتایج این پژوهش، این شاخص با امتیاز ۹۴ درصد، عملکرد بالایی را در میان سایر شاخص‌ها داشته است. در این راستا لایروبی رودخانه‌ها برای سامان‌دهی سیلاب به‌طبع موجب کاهش خسارت‌های ناشی از زیان اقتصادی بلایا می‌شود که در این پژوهش این اقدامات باعث افزایش عملکرد این شاخص شده است. در این راستا Summers و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل مفهومی جدید تاب‌آوری در مقابل حوادث اقلیمی در مقیاس فضایی ملی، منطقه‌ای، ایالتی و بخشی برای رویارویی با رویدادهای ناشی از اقلیم ازجمله سیلاب‌های شدید، خشک‌سالی و حوادث مشابه مانند آتش‌سوزی و سیل ارائه کرده‌اند. Liu و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که تغییرات اقلیمی به‌ویژه خشکسالی، سیل و فعالیت‌های انسانی، به ترتیب اثرات منفی و مثبتی بر حوزه آبخیز داشته‌اند و دلایل اصلی کاهش و افزایش تاب‌آوری بوده‌اند؛ از سوی دیگر، تحت اختلالات شدید اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، تاب‌آوری حوزه آبخیز در طول فصول خشک و مرطوب تغییرات قابل‌توجهی در کل منطقه را نشان داد.

سرانه فضای سبز

اهمیت و نقش فضای سبز و تأثیرات آن بر محیط فیزیکی و طبیعی آن انکارناپذیر است؛ تا آن‌جا که کاربری فضای سبز و سرانه آن یکی از مباحث اساسی در برنامه‌ریزی توسعه پایدار تلقی می‌شود (Hashemi & Rostami, 2024). از عملکردهای محیط‌زیستی فضاهای سبز می‌توان به کاهش دمای محیط، تولید اکسیژن، کاهش آلودگی و معتدل کردن هوا اشاره کرد که مهم‌ترین عملکرد فضای سبز، کارکرد محیط‌زیستی آن‌هاست و با آثار سوء گسترش صنعت و کاربرد نادرست فن‌آوری مقابله نموده و سبب افزایش کیفیت زیستی می‌شود (Chen *et al.*, 2025b; Hassan *et al.*, 2025). لذا تبدیل بخشی از فضاهای باز به فضای سبز نیز می‌تواند برای کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی تأثیرگذار باشد (Sahebi *et al.*, 2022). با توجه به نتایج این پژوهش، سرانه فضای سبز در کشور (۱۲ مترمربع به ازای هر نفر) و در آبخیز شازند (۱۶ مترمربع به ازای هر نفر) است؛ با این حال از مقدار استاندارد جهانی (۲۰/۵ مترمربع به ازای هر نفر) پایین‌تر هستند و در حوزه آبخیز موردمطالعه عملکرد ۳۷/۱۴ درصد را به خود اختصاص داده است. در این راستا در آبخیز شازند و اکثر مناطقی که با رشد جمعیت و گسترش پدیده شهرنشینی مواجه هستند، فضای سبز اولین کاربری مستعد برای هرگونه تغییر و نابودی است. رشد سریع جمعیت به‌ویژه جمعیت شهری، مهاجرت گسترده از روستا به شهر، گسترش بی‌رویه شهر و تبدیل باغات و اراضی کشاورزی به بافت‌های شهری و تغییر کاربری اراضی با کاربری فضای سبز از یک‌سو و عدم‌توانایی متولیان از سوی دیگر را می‌توان از مهم‌ترین دلایل کمبود فضای سبز دانست. هم‌چنین توزیع نامناسب و بی‌قاعده و مکان‌یابی غیراصولی و کارشناسی نشده کاربری‌های فضای سبز از دیگر علل عدم کفایت این کاربری‌هاست (Daz *et al.*, 2023). تراکم بیش از حد جمعیت در شهرها و دخالت انسان در محیط طبیعی و ایجاد محیط‌های انسان‌ساخت، نیازهای محیط‌زیستی، جسمی و روحی انسان را بیش از پیش تحت‌فشار قرار داده و از آن‌جایی که فضاهای سبز به عنوان ریه‌های تنفسی نقش بسیار مهم و به‌سزایی در تلطیف هوا و کاهش انواع مختلف آلودگی‌ها و رفع نیازهای انسانی دارد، می‌بایست این نوع کاربری‌ها در سطح منطقه شناسایی شده و تدابیر لازم جهت جلوگیری از تخریب آن‌ها تحت عناوین مختلف در نظر گرفته شود (Ghanbari *et al.*, 2025).

مصرف نیتروژن وارداتی

استفاده طولانی‌مدت و مداوم از کودهای شیمیایی می‌تواند به تخریب ساختمان خاک، افزایش هزینه‌های تولید، کاهش پتانسیل بهره‌وری و بروز پیامدهای نامطلوب محیط‌زیستی منجر شود. از سوی دیگر، افزایش آگاهی عمومی به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، نسبت به مصرف غذای سالم و عاری از نهاده‌های شیمیایی، اهمیت کاهش مصرف کودهای شیمیایی و جایگزینی آن‌ها با نهاده‌های طبیعی و درون مزرعه‌ای را دو چندان کرده است (Drechsel *et al.*, 2025)، برهمین‌اساس پایداری بخش کشاورزی در کلیه برنامه‌های توسعه کشور از اولویت ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان محور و اساس توسعه اقتصادی کشور محسوب می‌شود. با توجه به نتایج این پژوهش اگرچه مقدار عددی این شاخص در ایران (۲۷ کیلوگرم به ازای هر نفر جمعیت) و آبخیز شازند (۲۱ کیلوگرم به ازای هر نفر جمعیت) است اما از استاندارد جهانی (پنج کیلوگرم به ازای هر نفر جمعیت) فاصله زیادی داشته و نشان از مصرف بالای کود و سموم کشاورزی است. یکی از مواردی که در اکثر مطالعات مربوط به پایداری کشاورزی تأکید شده، لزوم کاهش استفاده از نهاده‌های بیرونی و شیمیایی است (Vatsa *et al.*, 2024; Shao *et al.*, 2025). زیرا استفاده از نهاده‌های شیمیایی و به‌خصوص کودهای شیمیایی با از بین بردن سلامت خاک، پایداری کشت محصولات زراعی و باغی را به شدت تهدید کرده و علاوه بر ایجاد معضلاتی برای سلامتی افراد جامعه، عملکرد محصولات کشاورزی را در بلندمدت کاهش می‌دهد (Zulfiqar & Thapa, 2017). بنابراین، توجه به تبعات محیط‌زیستی استفاده از نهاده‌های شیمیایی برای محصولات عمده کشاورزی حائز اهمیت است.

مرگ‌ومیرها و مفقودین متأثر از بحران‌ها

بلایای طبیعی هر ساله موجب خسارات مالی و تلفات جانی زیادی در کشور می‌شود و اثرات زیان‌باری بر توسعه پایدار حوزه آبخیز می‌گذارد. از سوی دیگر با توجه به تغییرات انسانی صورت گرفته، شرایط برای رخداد سیل در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور بالا رفته است (Sadeghi *et al.*, 2022). با توجه به نتایج این پژوهش مقدار عددی این شاخص در ایران (۰/۱۵ به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت) و در آبخیز شازند (صفر به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت) است و هر دو مقیاس از استاندارد جهانی (۳ به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت) پایین‌تر هستند و شرایط وضعیتی مطلوب در این شاخص را نشان می‌دهند؛ در این راستا با توجه به شرایط خاص و وقوع سیلاب‌های اخیر در آبخیز شازند اقدامات پیشگیرانه و موضوع مقابله با سیلاب به‌عنوان دستور کار اصلی در ستاد مدیریت بحران در اولویت قرار گرفته است، از سویی تصمیم‌گیری لازم برای هماهنگی و انسجام دستگاه‌های مسئول با ایجاد سازوکارهایی در زمینه جمع‌آوری آب باران از اقدامات هم‌سو با هدف افزایش سازگاری با اثرات تغییرات اقلیمی در سطح منطقه بوده و موجب افزایش حداکثری عملکرد این شاخص در این حوزه آبخیز شده است. از آن‌جایی‌که تغییرات اقلیمی خطرات قابل‌توجهی بر منابع آب ایجاد می‌کند، برای تداوم این وضعیت در مدیریت جامع حوزه آبخیز بایستی راه‌کارهایی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی در نظر گرفته شود تا تاب‌آوری حوزه‌های آبخیز را افزایش دهد و پایداری منابع آب را تضمین کند. در این راستا آبخیزداری اصولی می‌تواند با کاهش اثرات منفی سیل و خشکسالی، بهبود کیفیت خاک و آب، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید، به بهبود شرایط معیشتی روستاییان و تقویت اقتصاد محلی کمک کند (Wang *et al.*, 2024b; Sadeghi *et al.*, 2023).

رخداد بلایای طبیعی

امروزه وقوع حوادث غیرمترقبهٔ طبیعی امری پذیرفته شده در فرایند توسعهٔ جوامع تلقی می‌شود؛ کشورهای پیشرفته برنامه‌های توسعه‌ای خود را با لحاظ احتمال وقوع چنین حوادثی تبیین و طراحی می‌کنند (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2023). با توجه به حادثه‌خیز بودن کشور و وقوع مخاطرات محیطی در چند دهه اخیر و امکان رخداد بلایا در آینده، هم‌چنین فقدان یک الگوی کارآمد و استاندارد مدیریتی در راستای کاهش بحران، بررسی میزان رخداد بلایای طبیعی حائز اهمیت است (Rahmati *et al.*, 2025). با توجه به نتایج این پژوهش میزان رخداد بلایای طبیعی در کشور با امتیاز ۱۲ درصد به مقدار استاندارد جهانی ۱۵/۵ درصد نزدیک است و مخاطرات طبیعی با توجه به شرایط محیطی و جغرافیایی کشور منجر به آسیب‌های جدی مالی و تلفات انسانی گسترده‌ای در برخی مناطق شده است. بررسی داده‌ها در آبخیز شازند نشان داد که میزان رخداد بلایا پایین و برابر چهار درصد است. در این راستا با توجه به این‌که آبخیز موردمطالعه در محدوده کم‌خطر از لحاظ وقوع بلایای طبیعی قرار دارد، با این حال اقداماتی در راستای کاهش مخاطرات ازجمله طرح‌های بازآفرینی شهری و احیاء بافت‌های فرسوده انجام گرفته است، به‌طوری‌که برای اکثر شهرهای استان مرکزی ازجمله شازند تدوین طرح به‌سازی و نوسازی بافت فرسوده و شناسایی محدوده بافت فرسوده انجام شده است (Ahmadi & Mehrjou, 2020). هم‌چنین برای بهبود وضعیت بعد وقوع بحران و با توجه به این‌که در نگرش‌های جاری و حاکم بر مدیریت بحران عمدتاً بر مدیریت انفعالی بحران و یا کاهش آسیب‌پذیری زیرساختی اهمیت داده می‌شود و حال آن‌که تقویت زمینه‌های اجتماعی می‌تواند نقش بسیار مؤثری بر میزان تاب‌آوری سکونت‌گاه‌های انسانی در برابر مخاطرات بحران‌زا داشته باشد (Mohammadi Ostadkelayeh *et al.*, 2022). با توجه به این موضوع که تاب‌آوری امری آموختنی و اکتسابی است، لازم است برنامه‌ریزان و

سازمان‌های مرتبط ضمن توجه به این موضوع، تمهیداتی برای تاب‌آور شدن افراد نیز در نظر گیرند.

میانگین غلظت گازهای آلاینده هوا

مشکلات محیط‌زیستی یکی از اساسی‌ترین مسائل منطقه و حاصل تعارض و تقابل آن‌ها با محیط طبیعی است؛ چرا که توسعه ناگزیر با تسلط ساختمان‌ها، صنایع، حمل‌ونقل و فعالیت‌های اقتصادی بر فضاهای طبیعی همراه است و این تسلط به مرور زمان به شکل چیرگی بر طبیعت تغییریافته است و زمینه‌ساز آلودگی‌های محیط‌زیستی گسترده می‌شود (Degirmenci *et al.*, 2025). با توجه به نتایج این پژوهش آبخیز شازند از لحاظ این شاخص با مقدار (۱۹۹ میکرومول بر مترمربع) به مقدار استاندارد جهانی (۲۱۸ میکرومول بر مترمربع) نزدیک و دارای شرایط رو به افول است که بیش‌تر به دلیل وجود صنایع مختلف و آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از آن است. از دیگر پژوهش‌ها در راستای تأیید نتایج اثر منفی توسعه صنایع در آبخیز شازند می‌توان به Sadeghi و همکاران (۲۰۱۸)؛ Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹ الف) و Hazbavi و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد. از سوی دیگر نتایج نشان داد که با افزایش غلظت این گازها، این شاخص به حداکثر مقدار خود رسیده و آبخیز از لحاظ این شاخص به سمت شرایط رو به افول می‌رود. این امر نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی از قبیل احداث پتروشیمی و نیروگاه‌ها بر کیفیت هوا در منطقه است (Gao *et al.*, 2025; Ngamlana *et al.*, 2025). در این راستا مشکلات بهداشتی درمانی موجود در روستاها به‌واسطه فعالیت‌های صنایع و نزدیکی به شهر موجب می‌شود که بهداشت و درمان در این روستاها در معرض خطرات بالقوه قرار داشته باشند (Khorasani & Akbarian, 2021). میزان این شاخص در کشور با مقدار (۳۱۸ میکرومول برمترمربع) بالاتر از آبخیز موردمطالعه است؛ در این راستا صنایعی ازجمله پالایش نفت و پتروشیمی منابع قابل‌توجهی از آلودگی هوا هستند که انواع آلاینده‌های مضر برای سلامتی جمعیت‌های اطراف منتشر می‌کنند؛ ساکنانی که در نزدیکی این مراکز زندگی می‌کنند، با خطرات بالایی مربوط به سرطان خون، سرطان ریه و لوزالمعده، بیماری‌های تنفسی غیربدخیم و بیماری مزمن کلیه مواجه هستند (Tavella *et al.*, 2025)؛ راهکارهایی ازجمله ادغام فناوری‌های پاک‌تر در جهت کاهش انتشار گازهای مضر، تقویت چارچوب‌های سیاستی، تأکید بر محدودیت‌های سخت‌گیرانه انتشار گازهای آلاینده، نظارت مستمر و اجرای مقررات و پیشبرد پژوهش‌ها در مورد پیامدهای بهداشتی برای بهبود وضعیت محیط‌زیستی کشور حائز اهمیت است. هم‌چنین با توجه به موارد مذکور، تلاش‌های هماهنگ جهانی برای همسو کردن تکامل صنعت با اهداف جهانی توسعه پایدار و راهبردهای مدیریتی برای محافظت از سلامت جوامع آسیب‌پذیر ضرورت می‌یابد.

مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری

مناطق حفاظت‌شده نه‌تنها موجب تضمین بقای گونه‌های گیاهی و جانوری منحصربه‌فرد منطقه می‌شوند، بلکه به حفظ تعادل بوم‌سازگان نیز کمک می‌کنند. از سویی عدم توجه به این شاخص موجب کاهش تنوع زیستی، از بین رفتن گونه‌های جانوری و گیاهی و آسیب‌های جدی به منطقه می‌شود؛ ازاین‌رو ارائه راهبردهای مدیریتی جامع برای مقابله با این تهدیدات و حفاظت از بوم‌سازگان ضروری است (Bigdeli & Dashti, 2025). با توجه به نتایج این پژوهش، مناطق حفاظت‌شده در کشور (۴۳/۵ درصد) و در آبخیز شازند (۱۱/۹ درصد) است؛ با این حال از مقدار استاندارد جهانی (۸۵ درصد) فاصله قابل‌توجهی دارند. براین اساس مناطق حفاظت‌شده در سطح کشور به نسبت آبخیز شازند بالاتر بوده است و می‌توان با الگو قرار دادن آبخیزهای مشابه دارای عملکرد بهتر و استفاده از رویکردهای انجام گرفته در آن‌ها، وضعیت آبخیز شازند را نسبت به وضعیت کنونی بهبود بخشید. این شاخص با عملکرد ۱۲ درصد در آبخیز شازند دارای عملکرد ضعیفی بوده و تاثیر منفی زیادی را بر عملکرد هدف حفاظت از بوم‌سازگان توسعه پایدار گذاشته است. با توجه به نتایج

Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹ ب) وضعیت سلامت آبخیز شازند در دوره‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۸ و ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۸ به دلیل تأثیر صنعتی‌شدن و توسعه شهری حدود چهار درصد کاهش داشته است؛ هم‌چنین وضعیت سلامت در سایر دوره‌های مطالعاتی بهبود معنی‌داری نداشته است که یکی از دلایل آن عدم حفاظت از بوم‌سازگان بوده است که تاثیر زیادی بر محیط‌زیست گذاشته است. هم‌چنین Bahlekeh و Sadeghi (۲۰۲۵) نیز در پژوهش خود بیان داشتند، زیرآبخیزهای هم‌جوار با مناطق حفاظت‌شده به دلیل پایین بودن سطح فعالیت‌های انسانی، دارای عملکرد بهتری از لحاظ بوم‌شناختی بوده‌اند. طبق پژوهش Alipbeki و همکاران (۲۰۲۵) نیز زیرآبخیزهای هم‌جوار با مناطق حفاظت‌شده، سطح بالاتری از سلامت بوم‌سازگان را نسبت به سایر بخش‌ها به خود اختصاص داده بودند که این پژوهش‌ها اهمیت توجه به این شاخص را نشان می‌دهند.

شاخص پوشش سبز کوهستان

اهمیت اطلاع از تغییر سطح زمین در پایش و نظارت بر منابع محلی، منطقه‌ای و جهانی به‌طور مداوم بیش‌تر می‌شود (Rumpf *et al.*, 2025). برخی از پدیده‌ها و عوارض سطح زمین نظیر پوشش گیاهی، به دلایل مختلف در اثر عوامل طبیعی و انسانی به مرور زمان دچار تغییر شده که شرایط و عملکرد بوم‌سازگان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین نیاز به آشکارسازی، پیش‌بینی و مراقبت چنین تغییراتی در یک بوم‌سازگان از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (Mohammadi *et al.*, 2019). نتایج ارزیابی این شاخص نشان داد که شاخص پوشش سبز کوهستان در کشور (۳۴/۳۰ درصد)، در آبخیز شازند (۱۸ درصد) و نزدیک به پایین‌ترین حد جهانی (۱۷ درصد) است و جزو شاخص‌ها با عملکرد پایین محسوب می‌شود؛ بنابراین بایستی اقدامات جدی در راستای بهبود شرایط این حوزه آبخیز انجام گیرد. Jalili و Jamzad (۱۹۹۹) نیز به حفاظت از رویش‌گاه‌های مرتفع کوهستانی این منطقه به عنوان ذخیره‌گاه‌های تنوع زیستی تأکید داشتند. در این راستا عوامل مختلفی در تغییر مساحت پوشش گیاهی یک منطقه نقش دارند که شامل استفاده از چوب درختان جنگل برای سوخت، فشار دام بر مراتع، آتش‌سوزی جنگل‌ها و خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت است که همه این عوامل باعث کاهش مساحت و از بین رفتن پوشش گیاهی می‌شوند و بررسی هر یک از این موارد کلیدی در جهت بهبود وضعیت منطقه ضرورت دارد (Chen *et al.*, 2025a). به‌طور کلی می‌توان گفت که آشکارسازی شرایط منطقه می‌تواند در مدیریت منطقه توسط سازمان‌های تابع ازجمله منابع طبیعی، جهادکشاورزی، محیط‌زیست و تشکل‌های مردمی در راستای جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی مؤثر باشد.

میزان شکار غیرقانونی

روند روبه‌رشد تجارت غیرقانونی حیات‌وحش در سطح بین‌المللی باعث شده تا صاحب‌نظران با تخصص‌های مختلف به این موضوع بپردازند و سعی در ارائه رهیافت‌هایی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت آن داشته باشند. اگرچه بودجه‌های مقابله با جرایم محیط‌زیستی در ایران به طور شفاف و عمومی منتشر نمی‌شوند. با این حال بخش کوچکی از بودجه اختصاص داده شده برای مقابله با تجارت غیرقانونی حیات‌وحش در سطح جهانی به این بخش اختصاص داده شده است (World Bank, 2016). با توجه به ارزیابی این شاخص مشخص شد که در آبخیز شازند میزان شکار غیرقانونی به مقدار ۱۰ درصد است و فاصله قابل‌توجهی از استاندارد جهانی (۳۲/۵ درصد) دارد و عملکرد بالایی را به خود اختصاص داده است اما عددی برای ایران در رابطه با این شاخص گزارش نشده است. برای تداوم و بهبود شرایط Leverington و همکاران (۲۰۱۰)؛ Challender و همکاران (۲۰۱۵)؛ Hauenstein و همکاران (۲۰۱۹) بیان داشتند عدم کفایت منابع مالی و انسانی، حکمرانی ضعیف، فساد و عدم تعریف سازوکارهای نظارتی اثربخش، باعث شده حتی در سطح شبکه مناطق تحت

حفاظت نیز تجارت غیرقانونی و قاچاق گسترده حیات وحش بحران‌آفرین شود. هم‌چنین پژوهش‌های Naidoo و همکاران (۲۰۱۶)؛ Rubino و همکاران (۲۰۱۸)؛ Di Minin و همکاران (۲۰۲۲) حاکی از آن است جوامع محلی باید در منافع ناشی از حفاظت و حراست از حیات وحش ازجمله درآمدهای حاصل از صدور جواز شکار، حضور و تفرج طبیعت‌گران سهیم شوند تا در سطوح خرد و میانی مدیریت مشارکتی تنوع زیستی شکل گیرد و در سطوح کلان حکمرانی خوبی رقم بخورد. در این راستا پژوهش Troster و Hiete (۲۰۱۸) مدعی است برای اجرای مقررات تجارت حیات‌وحش، شناسایی محصولات غیرقانونی حیات‌وحش در حین حرکت در زنجیره تجارت ضروری است و به شناسایی عوامل، مسیرها و گرودارن محلی و فرامحلی غیرقانونی کمک می‌کند. برای بهبود شرایط پایش مستمر اثربخشی این اقدامات با هدف ارائه راهبردهای اصلاحی، لازم‌الاجراست.

همکاری آبخیزنشینان در فعالیت‌ها و سیاست‌های دولتی

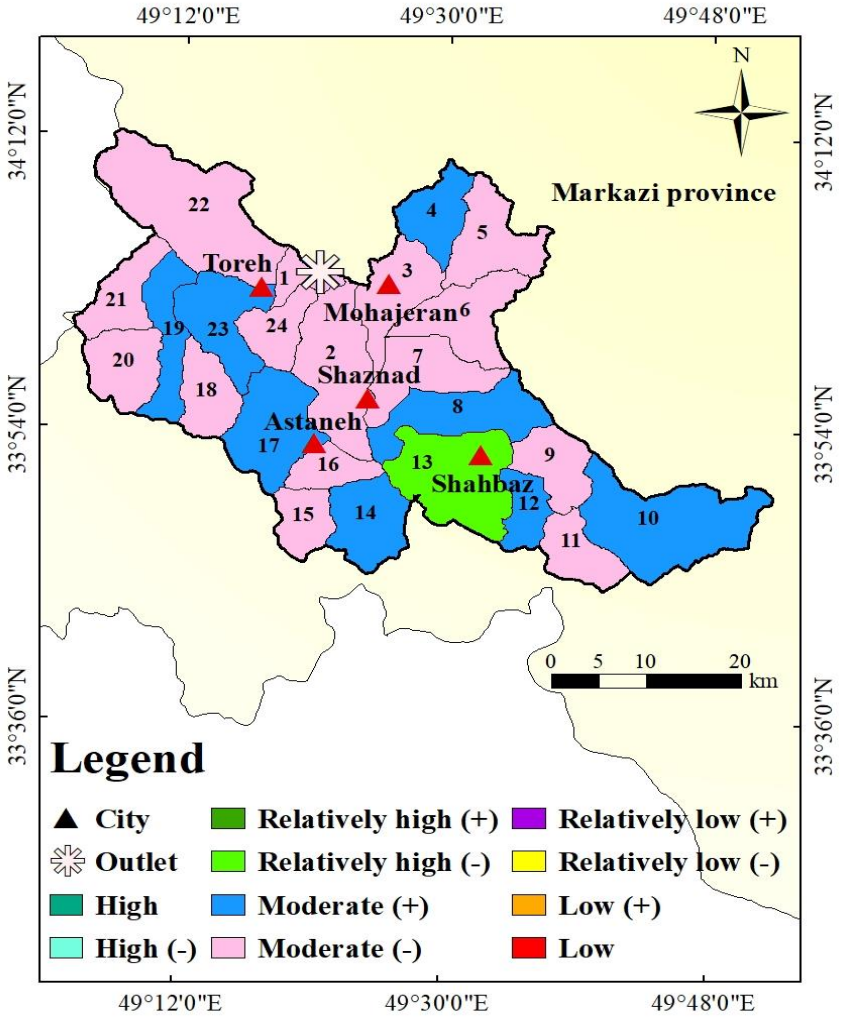
توسعه نامتوازن با شرایط طبیعی و شتاب دستگاه‌های اجرایی برای تأمین اهداف سازمانی و منافع اقتصادی کوتاه‌مدت و هم‌چنین اجرای سیاست‌های بخشی‌نگر، فشار بر انواع منابع طبیعی تجدیدشونده را به حدی زیاد نموده که از دامنه بردباری آن تجاوز کرده و زمینه‌های سیر قهقرایی آن را به‌وجود آورده است، تا جایی که در بعضی موارد، بازیابی و بازسازی آن‌ها بسیار دشوار و گاه امکان‌ناپذیر شده است (Saberifar, 2025). میزان همکاری آبخیزنشینان در فعالیت‌ها و سیاست‌های دولتی در کشور نامشخص و در آبخیز شازند ۴۰ درصد برآورد شده است که از استانداردهای جهانی (۷۰ درصد) فاصله زیادی داشته و بایستی راهبردهای اساسی در این زمینه انجام گیرد. زیرا مشارکت جوامع محلی، نهادهای دولتی و گرودارن در برنامه‌ریزی و اجرای روش‌های مدیریت حوزه آبخیز برای تضمین موفقیت و پایداری تلاش‌ها ضروری است، روش‌های مشارکتی به ایجاد توافق، حل تعارضات و بهره‌گیری از دانش و منابع محلی کمک می‌کنند. هم‌چنین مدیریت جامع حوزه آبخیز نیازمند تعادل بین اهداف مختلفی مانند مشارکت همگانی در جهت کمینه‌سازی تأثیرات محیط‌زیستی، بیشینه‌سازی منابع اقتصادی و تضمین عدالت اجتماعی است؛ این امر مستلزم استفاده از ابزارها و مدل‌های تصمیم‌گیری است تا با بهبود اهداف جهانی توسعه پایدار هم‌سو باشد (Sadeghi *et al.*, 2024a).

با توجه به این‌که برای هر یک از شاخص‌های موردسنجش شرایط ایران نیز مدنظر قرار گرفته شده است و آبخیز شازند در برخی شاخص‌ها دارای عملکردهای ضعیفی نسبت به عملکرد ایران داشته است؛ با شناسایی این شاخص‌ها و الگو قرار دادن آبخیزهای موفق در این زمینه می‌توان از راهکارها و اقدامات اجرایی انجام گرفته در آبخیزهای مشابه برای افزایش عملکرد این آبخیز در راستای اهداف توسعه پایدار استفاده نمود. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، به‌طور میانگین آبخیز شازند مبتنی بر شاخص‌های موردبررسی دارای عملکرد ۴۹ درصد بوده و دارای عملکرد متوسط با گرایش منفی و روبه افول است، برای بهبود وضعیت آبخیز بایستی اقدامات مدیریتی لازم صورت گیرد؛ زیرا با تخریب بیش‌تر آبخیزها برگشت به حالت قبل به مراتب دشوارتر و هم‌چنین هزینه‌های لازم برای بازیابی بوم‌سازگان مسلماً افزایش می‌یابد.

نتایج پهنه‌بندی شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار

نتایج پراکنش مکانی حاصل از ارزیابی شاخص‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳، آبخیز مطالعاتی از لحاظ ارزیابی شاخص‌ها به سه طبقه، متوسط با گرایش مثبت در زیرآبخیزهای ۴، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۱۹ و ۲۳، نسبتاً بالا با گرایش منفی در زیرآبخیز ۱۳ و در سایر زیرآبخیزها متوسط با گرایش منفی بوده است. از سویی دیگر گسترش صنعت در منطقه به لحاظ شرایط معیشتی افراد ساکن آبخیز نه‌تنها تأثیر مثبت نداشته است بلکه با گذشت زمان با افزایش نارضایتی به لحاظ گسترش انواع بیماری‌ها، آسیب‌های محیط‌زیستی، عدم استفاده از

نیروهای جوان بومی در واحدهای صنعتی، ایجاد آلودگی‌های صنعتی و تأثیر منفی بر اراضی کشاورزی شده است (Farzi *et al.*, 2023).



شکل ۳- پراکنش مکانی شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان در آبخیز شازند، استان مرکزی

Figure 3- Spatial distribution of ecosystem conservation indicators in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

طبق پژوهش Fu و همکاران (۲۰۲۴) و Wang و همکاران (۲۰۲۴ ب) نیز شدت فعالیت‌های انسانی تأثیر منفی بر عوامل محیط‌زیستی گذاشته است. پهنه‌بندی صورت گرفته نشان داد که آبخیز شازند با برخورداری از شرایط نامطلوب‌تر در زیرآبخیزهای مرکزی در مجموع در شرایط متوسط رو به افول قرار دارد. عوامل کلیدی مؤثر بر این تغییرات شامل فعالیت‌های گسترده صنعتی مانند پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های پتروشیمی و افزایش عملیات معدنی است که اثرات منفی خود را بر بوم‌سازگان منطقه گذاشته است (Nasiri *et al.*, 2025; Silabi *et al.*, 2025).

طبق نتایج، زیرآبخیزها با عملکرد پایین بایستی در رأس اقدامات مدیریتی در راستای حفاظت از بوم‌سازگان قرار گیرند. از همین‌رو باید به این نکته توجه داشت که در فرآیند طراحی و اجرای برنامه‌های توسعه‌ای و مدیریتی در زیرآبخیزهای مذکور، بایستی

توجه ویژه‌ای به حفظ و بهبود بوم‌سازگان‌ها معطوف شود، به‌ویژه زمانی که این مناطق در شرایط بحرانی یا کمینه از نظر عملکرد بوم‌شناختی قرار دارند. به‌طور کلی نتایج پهنه‌بندی نشان داد که زیرآبخیزهای واقع در جنوب به‌ویژه زیرآبخیز ۱۳ با عملکرد نسبتاً بالا، شرایط به نسبت بهتری نسبت به سایر زیرآبخیزها داشته است، پایین بودن سطح فعالیت‌های انسانی و هم‌جواری این زیرآبخیز با منطقه حفاظت‌شده رویشگاه‌های طبیعی بلوط را می‌توان از دلایل آن برشمرد. در این راستا صنعتی شدن و توسعه شهری به میزان زیادی عملکرد زیرآبخیزها را کاهش داده است. بنابراین نظارت دقیق بر فعالیت‌های انسانی و پرهیز از مداخلات نامناسب یا ناآگاهانه اهمیت مضاعفی دارد. هرگونه اقدام اشتباه می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر وضعیت این مناطق داشته باشد و وضعیت آن را به سطوح بحرانی‌تر کاهش دهد. بنابراین، تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریتی بایستی مبتنی بر داده‌های علمی و ارزیابی دقیق باشد تا از آسیب‌های بیش‌تر جلوگیری و مسیر بازیابی و احیای بوم‌سازگان فراهم شود.

نتیجه‌گیری

برای جلوگیری از تخریب بیش‌تر منابع، تمام افراد در ابعاد جهانی، ملی و به‌ویژه در سطح محلی باید این واقعیت مهم را دریابند که پیشرفت و توسعه، لازم است روندی پایدار داشته باشد. دستیابی به این مهم مستلزم شناخت و درک محدودیت‌های موجود است. در این راستا آبخیزها، سامانه‌های طبیعی هستند که به افزایش عوامل تهدیدکننده خارجی پاسخ‌های مختلفی از خود نشان می‌دهند. افزایش عوامل تهدیدکننده به‌خصوص عوامل انسانی در حدی خارج از توان طبیعی آبخیز می‌تواند سبب از دست‌دادن عملکرد آبخیزها شود و برای پیشگیری از آن، سنجش عوامل مؤثر بر آبخیز ضروری است. هم‌چنین حوزه‌های آبخیز کشور به دلیل وابستگی فضایی-زیرساختی با منابع طبیعی از امکانات، محدودیت‌ها، فرصت‌ها و چالش‌های متعددی برخوردار هستند که نیازمند مدیریت صحیح حوزه‌های آبخیز کشور است. بااین‌حال در مدیریت آبخیزها ارتباط چندانی بین برنامه‌ریزی صحیح، کاهش و مدیریت خطر، سازوکارهای حاکمیت و نگرانی‌های محیط‌زیستی برقرار نیست. به‌عبارت‌دیگر نبود یک برنامه‌ریزی درست و منطقی، حوزه‌های آبخیز کشور را در آینده‌ای نه‌چندان دور به آبخیزهایی تبدیل خواهد کرد که حتی زیستن در آن دچار مشکل خواهد بود.

استفاده از استانداردهای جهانی برای شناخت بیش‌تر توانایی‌ها و کاستی‌های حوزه آبخیز به‌عنوان جز اصلی بوم‌سازگان حائز اهمیت است. از سویی دیگر استفاده از روش استانداردهای جهانی شناسایی عوامل مختلف مؤثر در جهت بهبود وضعیت آبخیزهای کشور و در راستای دستیابی به اهداف جهانی توسعه پایدار را میسر می‌سازد. هم‌چنین این پژوهش گامی مهم به سوی درک عمیق‌تر رابطه‌های بین جنبه‌های مختلف توسعه در کوتاه‌مدت و بلندمدت است و مبنایی علمی برای فرآیندهای تصمیم‌گیری آگاهانه فراهم می‌کند که از توسعه پایدار پشتیبانی می‌کند. به‌طورکلی به‌کارگیری این الگو می‌تواند موجب به‌هم‌پیوستگی و انسجام سازمانی، هماهنگی نهادهای تصمیم‌گیر، سازگاری آبخیزنشینان با تغییرات محیطی، مشارکت گسترده گرواران و در نهایت دستیابی به وضعیت بهتر حوزه‌های آبخیز شود. هم‌چنین با ارزیابی شاخص‌های توسعه پایدار می‌توان میزان پیشرفت و تأثیر طرح‌ها و پروژه‌های توسعه را در رسیدن به اهداف ارزیابی نمود. دستیابی به وضعیت قابل‌قبولی از فرآیند رشد، توسعه در جوامع انسانی نیازمند مهیا نمودن زمینه‌های برنامه‌ریزی بر پایه شناسایی محیط و بهره‌گیری از قابلیت‌های موجود در منطقه است. هم‌چنین شناخت، بررسی و تحلیل توانمندی‌های انسانی و طبیعی موجود می‌تواند به‌عنوان زیربنا و اصلی مهم مطرح شود. در این راستا با توجه به رشد بالای صنعت و آلودگی‌های ناشی از آن در منطقه، با در نظر گرفتن توانمندی‌های منطقه می‌توان از طریق تنوع بخشیدن به فعالیت‌های کشاورزی و مدرنیزه کردن آن گامی مهم در بهبود اهداف توسعه پایدار برداشت. هم‌چنین در این راهبرد،

با برقراری پیوند میان کشاورزی و صنعت، زمینه برای خروج از کشاورزی سنتی و کم‌بهره‌ور و نیز شکل‌گیری صنعت کشاورزی فراهم می‌شود. با توجه به قابلیت‌ها و ظرفیت‌های طبیعی منطقه در زمینه کشاورزی، سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های این بخش به‌منظور تثبیت فرصت‌های شغلی موجود و نیز افزایش بهره‌وری عامل کار ضروری است. به‌این‌منظور پیشنهاد می‌شود افزایش سهم بخش کشاورزی از اعتبارات سرمایه‌ای در بودجهٔ عمومی صورت گیرد. هم‌چنین، افزایش سهم بخش کشاورزی از تسهیلات بانکی و نیز هدایت منابع بانکی به تجهیز و نوسازی بنگاه‌های بخش کشاورزی می‌تواند نقش مؤثری در زمینهٔ افزایش بهره‌وری و اشتغال در این بخش ایفا کند. از آن‌جایی که این پژوهش روندهای ناشی از تغییرات اقلیمی و سیاستی در طول زمان را منعکس نمی‌کند لذا روند تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر عملکرد دستیابی به اهداف توسعه پایدار را می‌توان در مطالعات تکمیلی بررسی کرد تا خطرات احتمالی در برنامه‌ریزی آبخیز کاهش یابد. از سایر محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به حذف برخی معیارها به دلیل عدم همکاری برخی سازمان‌ها و عدم دسترسی به داده‌های موجود، ناقص بودن برخی داده‌ها به دلیل مقیاس مطالعاتی (زیرآبخیز) و عدم وجود یک سامانه آماری منسجم در کشور برای پژوهش‌های دانشگاهی اشاره کرد. در راستای تقویت شاخص‌های اهداف جهانی توسعه پایدار در کشور انجام مطالعات مقایسه‌ای با سایر آبخیزهای مشابه و ارائه بهترین شیوه‌های مدیریتی پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله حاضر بر خود لازم دانسته از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی، سازمان جهادکشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، اداره کل حفاظت محیط‌زیست و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان مرکزی در راستای همکاری و مساعدت در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی کنند

Reference

Ahmadi, H., & Mehrjou, M. (2020). Comparative study of the traditional urbanism with the modern One (case study of the new city of Mohajeran and Shazand city). *Urban Planning Knowledge*, 3(4), 33-52. https://doi.org/10.22124/upk.2020.15101.1342 (In Persian)

Alipbeki, O., Grossul, P., Rakhimov, D., Kupidura, P., Alipbekova, C., Musaif, G., Turekeldiyeva, R., Augambaev, K., & Begaliyeva, M. (2025). Ecosystem health assessment of the Zerendy District, Kazakhstan. *Sustainability*, 17(1), 277. https://doi.org/10.3390/su17010277

Antwi-Agyei, P., Dougill, A.J., Fraser, E.D., & Stringer, L.C. (2013). Characterising the nature of household vulnerability to climate variability: Empirical evidence from two regions of Ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 15, 903-926. https://doi.org/10.1007/s10668-012-9418-9

Arabi, R., Mirakzadeh, A.A., & Rostami, F. (2024). An analysis of factors affecting the growth of investment in Kermanshah Township's agricultural sector Abstract. *Agricultural Economics and Development Research*, 55(1), 39-56. https://doi.org/10.22059/ijaedr.2023.350900.669190 (In Persian)

Bahlekeh, M., & Sadeghi, S.H.R. (2025). Viability assessment of the Shazand Watershed in Markazi Province, Iran, using some hydroclimatic factors. *Integrated Watershed Management*, 5(3), 17-35. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2047457.1192 (In Persian)

Bahlekeh, M., & Sadeghi, S.H.R. (2026). A novel watershed viability assessment grounded in global sustainable development goals. *Environmental and Sustainability Indicators*, 101057. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.101057

Balist, J., Malekmohammadi, B., & Soltani, S. (2026). Climate change impacts on water resources: Modeling and adaptive

management strategies in the Sirvan Watershed-Iran. *In Planning and Management for Sustainable Water Resources and Infrastructure under Climate Change*, 141-164. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33687-4.00014-9

Balsalobre-Lorente, D., Abbas, J., He, C., Pilař, L., & Shah, S.A.R. (2023). Tourism, urbanization and natural resources rents matter for environmental sustainability: The leading role of AI and ICT on sustainable development goals in the digital era. *Resources Policy*, 82, 103445. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103445

Bigdeli, M., & Dashti, S. (2025). Application of the DPSIR conceptual model in the analysis of the environmental situation and vulnerability assessment in Karkheh National park and protected area. *Natural Environment*, 77(4), 717-730. http//doi.org/10.22059/jne.2025.388957.2755 (In Persian)

Butchart, S.H.M., Akçakaya, H.R., Chanson, J., Baillie, J.E.M., Collen, B., Quader, S., Turner, W.R., Amin, R., Stuart, S.N., & Hilton-Taylor, C. (2007). Improvements to the Red List Index. *Plos One*, 2(1), e140. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000140

Challender, D.W., Harrop, S.R., & MacMillan, D.C. (2015). Understanding markets to conserve trade-threatened species in CITES. *Biological Conservation*, 187, 249-259. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.015

Chamani, R., Sadeghi, S.H., Zare, S., Shekohideh, H., Mumzaei, A., Amini, H., Hemmati, L., & Zarei, R. (2024). Flood-oriented watershed health and ecological security conceptual modeling using pressure, state, and response (PSR) approach for the Sharghonj Watershed, South Khorasan Province, Iran. *Natural Resource Modeling*, 37(1), e12385. https://doi.org/10.1111/nrm.12385

Chen, D., Fei, X., Li, J., Wang, Z., Gao, Y., Shen, X., & He, D. (2025a). Refined classification of mountainous vegetation based on multi-source and multi-temporal high-resolution images. *Forests*, 16(4), 707. https://doi.org/10.3390/f16040707

Chen, S., Cui, C., Dong, J., Qu, A., & Shao, C. (2026). Implementation of the sustainable development goals in urban agglomeration: Progress and synergies. *Environmental Impact Assessment Review*, 116, 108102. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108102

Chen, Y., La Rosa, D., & Yue, W. (2025b). Does urban sprawl lessen green space exposure? Evidence from Chinese Cities. *Landscape and Urban Planning*, 257, 105319. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105319

Cleaver, F., Hamada, K. (2010). 'Good' water governance and gender equity: A troubled relationship. *Genderand Development*, 18(1), 27-41. https://doi.org/10.1080/13552071003599996

Dai, Z.Z., Chang, S., Zhao, G.R., Duan, J.J., Liang, H.Y., Zhu, Z.Y., Liu, S.L., Feng, Y.Z., & Wang, X. (2025). Unlocking China's grain yield potential: Harnessing technological and spatial synergies in diverse cropping systems. *Agricultural Systems*, 226, 104308. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104308

Davudirad, A.A., Sadeghi, S.H.R., & Sadoddin, A. (2016). The impact of development plans on hydrological changes in the Shazand Watershed, Iran. *Land Degradation and Development*, 27(4), 1236–1244. https://doi.org/10.1002/ldr.2523

Daz, S., Gaffari Ghilandeh, A., & Azizi, A. (2023). Analyzing the changes in urban green space of Gorgan City-Iran during 1987–2014. *Urban Ecology Researches*, 14 (31), 51-66. https://doi.org/10.30473/grup.2020.39884.2150 (In Persian)

Degirmenci, T., Erdem, A., & Aydin, M. (2025). The nexus of industrial employment, financial development, urbanization, and human capital in promoting environmental sustainability in E7 economies. *Sustainable Development and World Ecology*, 32(2), 242-258. https://doi.org/10.1080/13504509.2024.2426184

Di Minin, E., Selier, J., Louis, M., & Bradshaw, C.J. (2022). Dismantling the poachernomics of the illegal wildlife trade. *Biological Conservation*, 265, 109418. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109418

Drechsel, P., Madhuwanthi, P., Nisansala, D., Ramamoorthi, D., & Bandara, T. (2025). On the feasibility of an agricultural revolution: Sri Lanka's ban of chemical fertilizers in 2021. *Food Security*, 1-18. https://doi.org/10.1007/s12571-025-01528-6

Ehsani Kolikand, S., Nazari, B., Hadi, R.E., &

Sotoodehnia, A. (2023). Optimization cropping patterns in agriculture wells with monthly and yearly water volume restrictions (Case Study: Qazvin Plain). *Water Management in Agriculture*, 9(2), 31-44. (In Persian)

EPI (2022). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

Etikan, I., Musa, S.A., & Alkassim, R.S. (2016). Comparison of convenience sampling and purposive sampling. *Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1-4. https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20160501.11

Faiz, A., Faiz, A., Wang, W., & Bennett, C. (2012). Sustainable rural roads for livelihoods and livability. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.854

Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm. *Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129–132. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)

FAO (2018). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division

FAO (2023). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

FAO (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

FAO (2025). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

Farzi, P., Sadeghi, S.H., & Jomehpour, M. (2023). Spatial and temporal zoning of watershed resilience using a multidimensional composition approach. *Natural Resource Modeling*, 36(2), 12362. https://doi.org/10.1111/nrm.12362

Frank, P., Sundermann, A., & Fischer, D. (2019). How mindfulness training cultivates introspection and competence development for sustainable consumption. *Sustainability in Higher Education*, 20(6), 1002-1021. https://doi.org/10.1108/IJSHE-12-2018-0239

Fu, F., Jia, X., Zhao, Q., Tian, F., Wei, D., Zhao, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Hu, X., & Yang, L. (2024). Predicting land use change around railway stations: An enhanced CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105138. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105138

Gao, X., An, C., Yan, Y., Ji, Y., Wei, W., Xue, L., Gao, R., Shang, F., Li, J., Tan, L., & Li, H. (2025). Impacts of NO2 on urban air quality and causes of its high ambient levels: Insights from a relatively long-term data analysis in a typical Petrochemical City in the Bohai Bay Region, China. *Toxics*, 13(3), 208. https://doi.org/10.3390/toxics13030208

Jozi, A., Safa, L., & Salahi-Moghaddam, N. (2020). Modeling factors affecting food security of rural households in Zanjan City. *Agricultural Extension and Education Research*, 13(4), 31-52 (In Persian)

Ghaffari, H., Younessi, A., & Abedini, A. (2018). The role of land consolidation on the agricultural sector productivity; Case Study of Shazand City. *Economic Growth and Development Research*, 6(23), 54-37. (In Persian)

Ghanbari, A., Hadi, S.A., & Valizadeh Kamran, Kh. (2025). Geospatial innovations in urban green space management in Baghdad: A smart city perspective. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 5 (16), 30-48. http//doi.org/10.22034/rsgi.2025.66958.1135 (In Persian)

Hajarian, A. (2025). Analysis of the fundamental foundations of sustainable agricultural development with thematic analysis approach. *Rural Research*, 16(2), 47-65. http//doi.org/10.22059/jrur.2024.374056.1926 (In Persian)

Hashemi, N., & Rostami, M. (2024). Assessment and site selection of space of green urban case study: Zone 3 of Kermanshah. *Studies of Human Settlements Planning*, 18(4), 155-170. (In Persian).

Hassan, Y.N., Zhen, S., Sharbazhery, A.O., Du, C., & Jombach, S. (2025). Evaluating urban green space accessibility and per capita distribution in Erbil and

Sulaymaniyah, Kurdistan Region of Iraq. In Fábos Conference on Landscape and Greenway Planning, University of Massachusetts Amherst Libraries, 8(1). https://doi.org/10.7275/fabos.2421

Hauenstein, S., Kshatriya, M., Blanc, J., Dormann, C.F., & Beale, C.M. (2019). African elephant poaching rates correlate with local poverty, national corruption and global ivory price. Nat. *Commun*. 10, 2242. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09993-2

Hazbavi, Z., Keesstra, S.D., Nunes, J.P., Jantiene, B., Gholamalifard, & M., Sadeghi, S.H.R. (2018). Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecological Indicators*, 93, 781-790. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.078

Ibe, K.K., Amachawadi, R.G., Lacasa, J., & Kollur, S.P. (2026). Modelling clean cooking use in India: Transition trends and estimates for sustainable development. *Sustainable Futures*, 11, 101614. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101614

Idroes, G., Hardi, I., Nasir, M., Gunawan, E., Maulidar, P., & Maulana, A.R.R. (2023). Natural disasters and economic growth in Indonesia. *Ekonomikalia Journal of Economics*, 1, 33-39. https://doi.org/10.60084/eje.v1i1.55

Islam, M.M., & Al Mamun, M.A. (2020). Beyond the risks to food availability–linking climatic hazard vulnerability with the food access of Delta-Dwelling Households. *Food Security*, 12, 37-58. https://doi.org/10.1007/s12571-019-00995-y

IUCN (2023). SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

IUCN (2024). SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

Jalili, A., & Jamzad, Z. (1999*). Red data book of Iran.* Research Institute of Forests & Rangelands (RIFR), Tehran, Iran. 748 p.

Karami, A., Ahmadvand, M., & Alipanahiyan, F. (2025). Socio-economic and environmental impacts assessment of the watershed plan of the Imamzadeh Jafar plain in the Gachsaran County. *Watershed Management Research*, 38(2), 20-37 https://doi.org/10.22092/wmrj.2025.363070.1594 (In Persian)

Khorami, S., Raheli, H., Nikravesh, S., & Abdpour, A. (2023). Designing a sustainable marketing model for the development of sustainable agriculture in the country using the qualitative method. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(4), 317-335. https://doi.org/10.22034/saps.2022.48730.2762 . (In Persian)

Khorasani, M.A., & Akbarian, R.S.R. (2021). Assessment of livability in peri urban villages case study: The Central District of Shiraz County. *Regional Planning*, 10(40), 133-146. (In Persian)

Lafortune, G., Fuller, G., Moreno, J., Schmidt-Traub, G., & Kroll, C. (2018). SDG index and dashboards detailed methodological paper. *Sustainable Development Solutions Network*, 9, 1-56.

Lavhengwa, V.L., Mathaba, T., Nkomo, W., & Ramabodu, M.S. (2025). Maintenance and management of water infrastructure: A case study of Midvaal Local Municipality. *Seybold Report*, 20(1), 187-200. https://doi.org/10.5281/zenodo.14631790

Leverington, F., Costa, K.L., Pavese, H., Lisle, A., & Hockings, M. (2010). A global analysis of protected area management effectiveness. *Environmental Management*, 46(5), 685- 698. https://doi.org/10.1007/s00267-010-9564-5

Li, S., Liu, C., Ge, C., Yang, J., Liang, Z., Li, X., & Cao, X. (2024). Ecosystem health assessment using PSR model and obstacle factor diagnosis for Haizhou Bay, China. *Ocean and Coastal Management*, 250, 107024. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107024

Lindell, M.K., & Brandt, C.J. (1999). Assessing interrater agreement on the job relevance of a test: A comparison of CVI, T, rWG (J)}, and r* WG (J)} indexes. *Applied Psychology*, 84(4), 640. https://doi.org/10.1037/0021-9010.84.4.640

Liu, C., Chai, Y., Zhu, B., Yang, Y., Deng, J., & Hu, Y. (2021). River regulation and resilience: An approach for the Yangtze Watershed. *Water Supply*, 21(4), 1817–1833. https://doi.org/10.2166/ws.2021.035

López, M.C., Muñoz-Rojas, M., Zabalza-Martínez, J., Lasanta, T., & Nadal-Romero, E. (2026). Post-abandonment

management strategies influence future soil organic carbon storage and water resources. *EnvironmentalManagemen*t, 39 8, 128534. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128534

Mohammadi Ostadkelayeh, A., Toomaj, A., Mehrabi Nia, F., & Bahlake, M. (2022). Investigating the relationship between spatial resilience and individual resilience of areas subject to resettlement plan (case study of Northeastern Flooded Areas of Golestan Province). *Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 127-142. https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.73350.1128 (In Persian)

Mohammadi, A., Ghazavi, R., Mirzaei, R., & Naseri, H. (2019). Investigation of the vegetation cover pattern change using MODIS images and its relation with rainfall distribution. *Range and Watershed Managment*, 72(3), 843-852. https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.280679.1381 (In Persian)

Mousavi, S.K., Tabesh, M., Lahijanian, A., Jozi, S.A., & Mirfakhradini, S.H. (2021). Establishment and selection of strategy for improve resilience of Yazd Ardakan plain water resources. *Geographic Space*, 21(73), 103-120. (In Persian)

Naidoo, R., Weaver, L.C., Diggle, R.W., Matongo, G., Stuart-Hill, G., & Thouless, C. (2016). Complementary benefits of tourism and hunting to communal conservancies in Namibia. *Conservation Biology*, 30(3), 628-638. https://doi.org/10.1111/cobi.12643

Naseer, M.M., Hunjra, A.I., Palma, A., & Bagh, T. (2025). Sustainable development goals and environmental performance: Exploring the contribution of governance, energy, and growth. *Business and Finance*, 73, 102646. https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102646

Nasiri, Z., Sadeghi, S.H.R., & Moosavi, V. (2025). Coupling multi-coordination degree among land-use/land-cover, ecosystem service value, and socio-economic status in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran. *Environment, Development and Sustainability*. 1-33.

Ngamlana, N.B., Malherbe, W., Gericke, G., & Coetzer, R.L.J. (2025). The effect of coal-fired power plants on ambient air quality in Mpumalanga Province, South Africa, 2014–2018. *Environmental Health Research*, 35(1), 220-232. https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2350600

Nic Lughadha, E., Bachman, S.P., Leão, T.C.C., Forest, F., Halley, J.M., & Moat, J. (2020). Extinction risk and threats to plants and fungi. *Plants, People, Planet*, 2(5), 389–408. https://doi.org/10.1002/ppp3.10146

Nugroho, H.Y.S.H., Sallata, M.K., Allo, M.K., Wahyuningrum, N., Supangat, A.B., Setiawan, O., Njurumana, G.N., Isnan, W., Auliyani, D., Ansari, F., & Hanindityasari, L. (2023). Incorporating traditional knowledge into science-based sociotechnical measures in Upper Watershed management: Theoretical framework, existing practices and the way forward. *Sustainability*, 15(4), 3502. https://doi.org/10.3390/su15043502

OECD (2017). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1*.

OECD (2020). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1*. United Nations Statistics Division.

Pang, J., Liu, X., & Huang, Q. (2020). A new quality evaluation system of soil and water conservation for sustainable agricultural development. *Agricultural Water Management*, 240, 106235. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106235

Piramoon, A., Homayoun, S.B., & Ghanian, M. (2024). Prioritization of strategies for the development of sustainable agricultural in Khuzestan Province: Application of analytical network process. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*. 20(2), 95-111. https://doi.org/10.22034/iaeej.2025.470232.1812 (In Persian)

Radimer, K.L., Olson, C.M., Greene, J.C., Campbell, C.C., & Andhabicht, J.P. (1992). Understanding hunger and developing indicators to assess it in women and children. *Nutrition Education*, 24, 36-44. https://doi.org/10.1016/S0022-3182(12)80137-3

Rahimi Haghighi, A., Ghanbari, S.A., & Asgharipour, M.R. (2022). Assessing the sustainability of ecosystems in the Khosrow-Shirin-Abadeh Watershed. *Arid Biome*, 12(1), 121-140 (In Persian)

Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., & Ghermezcheshmeh, B. (2025). Developing a framework for assessing watershed vulnerability to flooding. *Watershed Engineering and Management*, 17(2), 203-220. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.366400.2072 (In Persian)

Raza, M.Y., & Lin, B. (2022). Analysis of Pakistan's electricity generation and CO2 emissions: Based on decomposition and decoupling approach. *Cleaner Production*, 359, 132074. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132074

Reed, M.S. (2008). Stakeholder participation for environmental management. *Biological Conservation*, 141(10), 2417–2431. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014

Riahi, M.R., Sadeghi, S.H., Mirnia, S.K., & Sadoddin, A. (2024). Coincidence of sustainable development indicators for the Nekarood Watershed with the United Nation's sustainable development goals. *Science of The Total Environment*, 917, 170177. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170177

Roy, A., Moradkhani, H., Mekonnen, M., Moftakhari, H., & Magliocca, N. (2024). Towards strategic interventions for global food security in 2050. *Science of the Total Environment*, 912, 168742. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176811

Rubino, E.C., Pienaar, E.F., & Soto, J.R. (2018). Structuring legal trade in rhino horn to incentivize the participation of South African private landowners. *Ecological Economics*, 154, 306-316. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.012

Rumpf, S.B., Buri, A., Grand, S., Randin, C.F., Tesson, S., Cianfrani, C., & Guisan, A. (2025). Independent trends of mountain vegetation and soil properties over 40 years of environmental change. *Vegetation Science*, 36(1), e70006. https://doi.org/10.1111/jvs.70006

Saberifar, R. (2025). The impact of demographic, economic and environmental urbanization on water, food and energy systems in Iran. *Development of Geographical Environment*, 7(12), 14-27. https://doi.org/10.48308/sdge.2024.236330.1202 (In Persian).

Sadeghi, S.H., Davudirad, A., Sadoddin, A., & Paimozd, S. (2018). Trend of changes in land degradation index in Shazand Watershed, Markazi Province. *Management and Engineering Watershed*, 9(4), 383-397. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.113459 (In Persian)

Sadeghi, S.H., Hasanpour, F., Payfeshoordeh, A., Tavakoli, F., Esmail Zadeh, F., Abdulbaghi, F., Rashidi, N., Mousavian, S., Beigi, H., Bahlekeh, M., & Chamani, R. (2024a). Position of the Fakhran Watershed in Iran's South Khorasan Province in the watershed management ladder. *Integrated Watershed Management*, 4(2), 1-19. https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2019702.1122 (In Persian)

Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019a). Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 589-608. (In Persian)

Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019b). Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment*, 648, 880-893. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.004

Sadeghi, S.H.R., Rashidi, N., Abdolbaghi, F., Mousavian, S., Bahlekeh, M., Kalehhouie, M., & Zabihi Silabi, M. (2024b). Nature-based management of soil erosion in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran. *Water and Soil Conservation*, 31(4), 1-34. https://doi.org/10.22069/jwsc.2025.22558.3737 (In Persian)

Sadeghi, S.H.R., Tavoosi, M., Zare, S., Beiranvandi, V., Shekohideh, H., Akbari Emamzadeh, F., Bahlekeh, M., Khorshid Sokhangoy, F., & Chamani, R. (2022). Evaluation and variability of flood-oriented health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from watershed management structures. *Water and Soil*, 36(5), 561-577. https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78150.1190 (In Persian)

Sahebi, M., Farahani, M., & Motahari, S. (2022). The structural modeling of the factors affecting urban livability of Kermanshah Metropolis. *Geography and Environmental Sustainability*, 12(3), 75-90. https://doi.org/10.22126/GES.2022.7623.

2518 (In Persian)

Shao, Y., Zhu, L., & Jia, W. (2025). Contiguous planting on fragmented cultivated land and reduction of chemical pesticides and chemical fertilizers: Evidence from rice farmer in China. *Environmental Management*, 374, 124062. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124062

Sharafi, S. (2023). Evaluating probability of agricultural drought risk using diffusion theory (Case Study: Shazand, Khomein, and Saveh Plains). *Ecohydrology*, 10(3), 301-319. http//doi.org/10.22059/ije.2023.364593.1757 (In Persian)

Sharma, K., Rajan, S., & Nayak, S.K. (2024). Water pollution: Primary sources and associated human health hazards with special emphasis on rural areas. *In Water Resources Management for Rural Development*, 3-14. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18778-0.00014-3

Silabi, M., Sadeghi, S.H., & Vafakhah, M. (2025). Soil erosion elasticity initiative for prioritizing sub-watersheds. *International Soil and Water Conservation Research*, 13(2), 277-289. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.12.001

Summers, J.K., Smith, L.M., Harwell, L.C., & Buck, K.D., (2017). Conceptualizing holistic community resilience to climate events: Foundation for a climate resilience screening index. *GeoHealth*, 1(4), 151–164. https://doi.org/10.1002/2016GH000047

Talampas, S.I., Shrestha, S., Mohanasundaram, S., & Loc, H.H. (2025). Development of a watershed health assessment framework integrating ecological, social, cultural, economic and policy attributes. *River Basin Management*, 23(1), 55-69. https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2242830

Tavella, R.A., Da Silva Júnior, F.M.R., Santos, M.A., Miraglia, S.G.E.K., & Pereira Filho, R.D. (2025). A Review of air pollution from petroleum refining and petrochemical industrial complexes: Sources, key pollutants, health impacts, and challenges. *ChemEngineering*, 9(1), 13. https://doi.org/10.3390/chemengineering9010013

Troster, R., & Hiete, M. (2018). Success of voluntary sustainability certification schemes–A comprehensive review. *Cleaner Production*, 196, 1034-1043. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.240

UN Climate Change (2021). SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

UNCCD (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

UNDP (2019). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

UNDRR (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

UNEP (2017). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1.* United Nations

UNEP (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1.* United Nations

UNESCO (2023). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1.* United Nations.

UN-Habitat (2021). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division

UNIDO (2025). *SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division.

UNISDR (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1.*

UNODC (2024). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1.* United Nations.

UN-Water (2016). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template* - format version 1.1.

Vaezihir, A., Qobadian. S., Golmohamadi, A. (2017). The study of oil-contamination groundwater due to Shazand Refinery. *Environmental Science and Technology*, 22(6): 49-59. https://doi.org/10.22034/jest.2018.17977.2693 (In Persian)

Vatsa, P., Zheng, H., & Ma, W. (2024). A sustainable approach to improving agrifood production: getting the balance right between organic soil amendments

and chemical fertilizers. *China Agricultural Economic Review*, 16(4), 646-663. https://doi.org/10.1108/CAER-08-2023-0208

Wang, L., Huang, L., Cao, W., Zhai, J., & Fan, J. (2024a). Assessing grassland cultural ecosystem services supply and demand for promoting the sustainable realization of grassland cultural values. *Science of The Total Environment*, 912, 169255. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169255

Wang, Y., Shi, F., Yao, P., Sheng, Y., & Zhao, C. (2024b). Assessing the evolution and attribution of watershed resilience in Arid Inland River Basins, Northwest China. *Science of The Total Environment*, 906, 167534. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167534

WHO (2017). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1*.

WHO (2025). *SDG indicator metadata, harmonized metadata template - format version 1.1*. United Nations Statistics Division

World Bank (2016*). SDG indicator metadata, harmonized metadata* template - format version 1.1. United Nations Statistics Division

Yamini, V., Singh, K., Antar, M., & El Sabagh, A. (2025). Sustainable cereal production through integrated crop management: A global review of current practices and future prospects. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1428687. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1428687

Zhu, T., Ringler, C., & Rosegrant, M.W. (2019). Viewing agricultural water management through a systems analysis lens. *Water Resources Research*, 55(3), 1778-1791. https://doi.org/10.1029/2017WR021007

Zulfiqar, F., & Thapa, G.B. (2017). Agricultural sustainability assessment at provincial level in Pakistan. *Land Use Policy*, 68 (1), 492–50. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.016

پیوست

جدول پیوست ۱- شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار و روش محاسبه آن‌ها در آبخیز شازند، استان مرکزی

Table S1- Sustainable Development Goals ecosystem conservation indicators and their calculation method in Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

هدف	کد شاخص	شاخص	شرح، شیوه برآورد و مرجع مورداستفاده
دسترسی به غذای ایمن، مغذی و کافی	۲-۱-۲	شیوع ناامنی غذایی ناشی از اقتصاد (درصد)	میزان دسترسی مردم به غذای کافی در تمام اوقات (FAO[1]، ۲۰۲۴).
کشاورزی پایدار	۲-۴-۱	نسبت مناطق کشاورزی مولد و پایدار (درصد)	ایجاد شرایط مناسب شامل افزایش بهره‌وری محصول، سلامت خاک، استفاده از آب متنوع در آبیاری، مدیریت خطر استفاده از کود و سم، حمایت از تنوع زیستی، افزایش اشتغال مناسب، ایجاد امنیت غذایی و تضمین مالکیت زمین (FAO، ۲۰۲۴).
	۲-۴-۲	تعداد چاه‌های کشاورزی (تعداد)	تعداد چاه‌های کشاورزی در منطقه (FAO، ۲۰۲۴).
حفظ تنوع ژنتیکی	۲-۵-۱ (الف)	منابع ژنتیکی گیاهی برای غذا و کشاورزی و ذخیره شده در محل (تعداد)**	تعداد کل پیوست‌های منحصربه‌فرد منابع ژنتیکی گیاهی در تأسیسات حفاظتی ایمن (FAO، ۲۰۲۴).
	۲-۵-۲	نسبت نژادهای محلی گیاهی در معرض خطر انقراض (درصد)	داده‌های مرتبط موجود در ذخیره‌گاه اطلاعات گیاهی (FAO، ۲۰۲۵).

[1] Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO)

هدف	کد شاخص	شاخص	شرح، شیوه برآورد و مرجع مورداستفاده
سرمایه‌گذاری در کشاورزی	۲-الف-۱	جهت‌گیری کشاورزی (درصد)*	نسبت بین سهم دولت از هزینه‌های بخش کشاورزی به سهم ارزش افزوده کشاورزی از تولید ناخالص داخلی (FAO، ۲۰۲۴).
	۲-الف-۲	سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی (درصد)*	نسبت میزان سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی به سایر مشاغل (OECD[1]، ۲۰۱۷).

ادامه جدول پیوست ۱- شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار و روش محاسبه آن‌ها در آبخیز شازند، استان مرکزی

Table S1 Continued- Sustainable Development Goals ecosystem conservation indicators and their calculation method in Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

هدف	کد شاخص	شاخص	شرح، شیوه برآورد و مرجع مورداستفاده
عملکرد بازارهای کشاورزی	۲-ب-۱	عملکرد غلات (تن بر هکتار)	عملکرد غلات (ازجمله عدس، برنج، گندم، جو و لوبیا) (FAO، ۲۰۲۴).
کیفیت آب	۶-۳-۲	پهنه‌های آبی باکیفیت و بهداشتی (درصد)	ارزیابی کیفیت آب براساس EC، DO، PH، TDS و آلودگی میکروبی (UNEP[2]، ۲۰۲۴).
بهره‌وری آب	۶-۴-۲	سطح تنش کشاورزی کشت آبی (درصد)	سطح تنش کشاورزی آبی در منطقه (Lafortune و همکاران، ۲۰۱۸).
بازیابی بوم‌سازگان‌ها	۶-۶-۱ (الف)	تغییر وسعت بوم‌سازگان‌های مرتبط با آب در طول زمان (درصد)*	نسبت حجم مفید سد به متوسط حجم آب‌دهی درازمدت سالیانه رودخانه (UNEP، ۲۰۲۴).
	۶-۶-۱ (ب)	شاخص عملکرد محیط‌زیست (EPI)[3] (درصد)*	متوسط درصد تغییرات جمعیت و مساحت زمین‌های کشاورزی (EPI، ۲۰۲۲).
حمایت از فعالیت‌های مرتبط با آب و فاضلاب	۶-الف-۱	میزان کمک‌های رسمی توسعه مرتبط با آب و فاضلاب (ریال)*	کل پرداخت‌های مربوط به آب و فاضلاب از طریق سامانه گزارش‌دهی معتبر (OECD، ۲۰۱۷؛ UNEP، ۲۰۱۷؛ WHO[4]، ۲۰۱۷).
فعالیت‌های مشارکتی	۶-ب-۱	مشارکت جوامع محلی در بهبود مدیریت آب (درصد)	میزان مشارکت مصاحبه‌شوندگان با دولت (لایروبی کانال‌ها و پروژه‌های آبخیزداری)، مشارکت پایین (یک)، متوسط (دو) و بالا (سه) (OECD، ۲۰۱۷).
دسترسی به خدمات انرژی	۷-۱-۲	جمعیت برخوردار از سوخت‌های پاک و فناوری برای پخت‌وپز (درصد)	درصد جمعیت استفاده‌کننده از سوخت‌ها و فناوری‌های آشپزی تمیز (شبکه گازرسانی) برای پخت‌وپز (WHO، ۲۰۲۵).
سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی	۷-الف-۱	حمایت از پژوهش و توسعه انرژی پاک و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (ریال)*	جریان‌های مالی حمایت از پژوهش و توسعه انرژی پاک و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (ریال)
افزایش دسترسی به شرکت‌های کوچک‌مقیاس	۹-۳-۱	نسبت صنایع کوچک در کل ارزش افزوده (درصد)*	نسبت صنایع کوچک در کل ارزش افزوده (UNIDO[5]، ۲۰۲۵).

[1] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)
[2] United Nations Environment Programme (UNEP)
[3] Environmental Performance Index (EPI)
[4] World Health Organization (WHO)
[5] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)

ادامه جدول پیوست ۱- شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار و روش محاسبه آن‌ها در آبخیز شازند، استان مرکزی

Table S1 Continued- Sustainable Development Goals ecosystem conservation indicators and their calculation method in Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

هدف	کد شاخص	شاخص	شرح، شیوه برآورد و مرجع مورداستفاده
حفاظت از میراث فرهنگی و طبیعی	۱-۴-۱۱	کل هزینه‌های سرانه برای حفظ و حفاظت از کلیه میراث طبیعی (ریال)*	سرانه کل بودجه عمومی میراث (به‌عنوان‌نمونه شامل نقل و انتقالات پرداخت شده اما به استثنای نقل و انتقالات دریافتی) از دولت (مرکزی، منطقه‌ای، محلی) و کل بودجه خصوصی از خانوارها، سایر منابع خصوصی مانند کمک‌های مالی، حمایت‌ها یا منابع بین‌المللی (UNESCO[1]، ۲۰۲۳).
کاهش زیان‌های اقتصادی	۳-۵-۱۱	اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا (درصد)	نسبت اختلالات در خدمات اساسی منتسب به بلایا (از بین رفتن واحد مسکونی، از دست دادن زیرساخت) (UNISDR[2]، ۲۰۲۴).
دسترسی همگانی به فضاهای سبز و عمومی	۱-۷-۱۱	سرانه فضای سبز (مترمربع به ازای هر نفر)	سرانه فضای سبز (مترمربع به ازای هر نفر) (UN-Habitat[3]، ۲۰۲۱).
مدیریت مواد شیمیایی و ضایعات	۱-۴-۱۲	مصرف نیتروژن وارداتی (کیلوگرم به ازای هر نفر جمعیت)	میزان مصرف نیتروژن خالص به ازای هر نفر جمعیت (مصرف کود شیمیایی اوره، نیترات آمونیوم و سولفات آمونیم) (UNEP، ۲۰۲۴).
تاب‌آوری در برابر بلایا	۱-۱-۱۳	مرگ‌ومیرها و مفقودین متأثر از بحران‌ها (به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت)	تلفات و مفقودان ناشی از سیل، طوفان، زلزله، دمای شدید، رانش، خشک‌سالی، آتش‌سوزی، آتش‌فشان و حرکت‌های توده‌ای (UNDRR[4]، ۲۰۲۴).
	۳-۱-۱۳	رخداد بلایای طبیعی (درصد)	درصد رخداد بلایای طبیعی (ازجمله سیل، زلزله، خشک‌سالی، طوفان، رخدادهای اقلیمی شدید و آتش‌سوزی) در منطقه (UNDRR، ۲۰۲۴).
ادغام اقدامات سازگاری با تغییرات اقلیمی در سیاست‌ها	۲-۲-۱۳	غلظت گازهای آلاینده هوا (میکرومول بر مترمربع)	میانگین غلظت گازهای آلاینده هوا ازجمله دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد (UN Climate Change، ۲۰۲۱).
بوم‌سازگان‌های زمینی و آب شیرین	۱-۱-۱۵	سطح جنگل (درصد)*	نسبت سطح جنگل به مساحت آبخیز (FAO، ۲۰۲۳).
	۲-۱-۱۵	مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری (درصد)	مناطق حفاظت‌شده گیاهی و جانوری برای افزایش تنوع زیستی نسبت به مساحت آبخیز (IUCN[5]، ۲۰۲۴).
احیا زمین و خاک تخریب‌شده	۱-۳-۱۵	اراضی تخریب شده (درصد)*	تجزیه‌وتحلیل تغییرات شاخص‌های ارزیابی محلی از اقلیم، خاک و کاربری اراضی (UNCCD[6]، ۲۰۲۴).

[1] Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
[2] United Nations Office for Disaster Reduction (UNISDR)
[3] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)
[4] United Nations Office for Disaster Reduction (UNDRR)
[5] International Union for Conservation of Nature (IUCN)
[6] United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)

ادامه جدول پیوست ۱- شاخص‌های حفاظت از بوم‌سازگان اهداف توسعه پایدار و روش محاسبه آن‌ها در آبخیز شازند، استان مرکزی

Table S1 Continued- Sustainable Development Goals ecosystem conservation indicators and their calculation method in Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

هدف	کد شاخص	شاخص	شرح، شیوه برآورد و مرجع مورداستفاده
حفظ بوم‌سازگان‌های کوهستان	۱۵-۴-۲	شاخص پوشش سبز کوهستان (MGCI)[1] (درصد)	مجموع پوشش درختی، مرتعی، زراعی، درختچه‌ای، بوته‌زار و پوشش گیاهی آبزی نسبت به کل مساحت کوهستان (FAO، ۲۰۲۴).
جلوگیری از انقراض گونه‌های در معرض خطر	۱۵-۵-۱	فهرست قرمز بقای گونه‌ها (درصد)*	شاخص فهرست قرمز در یک نقطه از زمان با ضرب کردن تعداد گونه‌های موجود در هر دسته فهرست قرمز از یک برای «تقریباً در معرض تهدید» تا پنج برای «انقراض» (IUCN، ۲۰۲۳).
حفاظت و استفاده پایدار از تنوع زیستی	۱۵-الف-۱	کمک‌های رسمی توسعه برای حفاظت و استفاده پایدار از تنوع زیستی (ریال)*	کمک‌های رسمی توسعه برای حفاظت و استفاده پایدار از تنوع زیستی (OECD، ۲۰۲۰).
پایان دادن به شکار غیرقانونی	۱۵-۷-۱	میزان شکار غیرقانونی (درصد)	نسبت شکار غیرقانونی پرندگان و پستانداران به جمعیت کل (UNODC[2]، ۲۰۲۴).
تصمیم‌گیری پاسخگو، فراگیر و مشارکتی	۱۶-۷-۳	همکاری آبخیزنشینان در فعالیت‌ها و سیاست‌های دولتی (درصد)	همکاری آبخیزنشینان در فعالیت‌ها و سیاست‌های دولتی متکی بر نظر مصاحبه‌شوندگان (Faiz و همکاران، ۲۰۱۲).
فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست	۱۷-۷-۱	مجموع بودجه برای ترویج فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست (ریال)**	فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست شامل مهار آلودگی هوا، مدیریت فاضلاب، مدیریت پسماندهای جامد و خطرناک، انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره و توزیع انرژی (UNEP، ۲۰۲۴).

* معیارهای حذف شده با توجه به نتایج آزمون ضریب نسبی روایی و شاخص روایی

** معیارهای حذف شده با توجه به عدم دسترسی به داد.

[1] Mountain Green Cover Index (MGCI)

[2] United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC)

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 50-72 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2067686.1244 **Online ISSN: 2783-4581**

Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed

Mohsen Zabihi[1*], Hamidreza Moradi[1], Abdulvahed Khaledi Darvishan[1], Mehdi Gholamalifard[2]

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
2. Department of the Environment, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

[*]**Corresponding author**: mohsen_zabihi69@yahoo.com

(Received: 03 August 2025 Revised: 11 October 2025 Accepted: 15 November 2025)

Extended Abstract

Introduction: Hydrological ecosystem services (HES), such as water yield and sediment retention, are fundamental to ecological balance and sustainable resource management. However, these critical functions are increasingly disrupted by rapid land use and landscape changes driven by human activities. These dynamics are effectively captured by landscape metrics, which quantify the spatial configuration, composition, and structure of land cover patches. This study aims to model and predict key HES in the Talar watershed, Mazandaran Province, Iran, and to quantitatively examine their relationships with landscape metrics and the processes of landscape change.

Materials and methods: The research employed a multi-step methodological framework. First, land use/land cover (LULC) maps for 1989, 2000, and 2014 were generated using the Support Vector Machine (SVM) classifier. A projected LULC map for 2030 was then created using a Markov chain integrated with the Land Change Modeler (LCM). A suite of landscape metrics—including Number of Patches (NP), Patch Density (PD), Largest Patch Index (LPI), and others—was calculated using FRAGSTATS software. Concurrently, specific landscape change processes (e.g., deformation, shift, creation) were quantified for each LULC class using TerrSet. The InVEST model was applied to simulate and project the HES of water yield and sediment retention for all study years, including the 2030 scenario based on current change trends. Finally, the relationships between the landscape metrics**,** change processes, and ecosystem service delivery were analyzed using Pearson correlation coefficients in SPSS.

Results and Discussion: The Land Change Modeler demonstrated excellent performance in predicting LULC changes (Klocation = 0.969, Kno = 0.964). Projections for 2014–2030 indicate significant shifts: a decline in forest (–14.86 km²) and rangeland (–19.85 km²) areas, contrasted with an expansion of rainfed agriculture (+21.01 km²) and residential areas (+13.60 km²). Pearson correlation analysis revealed that most spatial pattern indices, except for patch density and edge density, had significant correlations with both water yield and sediment retention. The Perimeter-Area Ratio (SHAPE_AM or a similar PA metric) exhibited the strongest correlation (0.699 for water yield; 0.782 for sediment retention). An inverse relationship was found between the Largest Patch Index (LPI) and these services, suggesting that the dominance of large, consolidated patches can negatively impact hydrological functions. Furthermore, the Landscape Shape Index (LSI) for forest and rangeland patches decreased over the 25-year period, a trend associated with reduced water yield and sediment retention. Analysis of change processes showed that the expansion of rainfed agriculture increased water yield but decreased sediment retention, while the decline in forest cover negatively impacted both services, highlighting the adverse consequences of deforestation.

Conclusion: The findings indicate that ongoing land use changes and landscape fragmentation are likely to degrade hydrological ecosystem services and reduce the ecological resilience of the Talar watershed. This study confirms the significant influence of landscape structure on water yield and sediment retention, with metrics like the Perimeter-Area Ratio serving as strong indicators. The negative correlation with the Largest Patch Index and the detrimental impact of forest loss underscore the need for integrated land use planning and targeted conservation strategies in northern Iran. The combined methodology of spatial modeling, landscape metric analysis, and change process assessment provides a robust and practical framework for evaluating and predicting ecosystem services at the watershed scale, offering valuable insights for sustainable environmental management.

Keywords: Change scenario, Environmental sustainability, InVEST model, Land change modeler, Spatial analysis

Citation: Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A. & Gholamalifard, M. (2026). Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 50-72. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2067686.1244

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۷۲-۵۰) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2067686.1244

مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار

محسن ذبیحی[1*]، حمیدرضا مرادی[1]، عبدالواحد خالدی درویشان[1]، مهدی غلامعلی‌فرد[2]

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

***نویسنده مسئول:** mohsen_zabihi69@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۴)

چکیده مبسوط

مقدمه: خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان، ازجمله تولید آب و نگهداشت رسوب، برای حفظ تعادل بوم‌شناختی و پایداری منابع طبیعی ضروری هستند. با این حال، تغییرات سریع کاربری اراضی و الگوهای سیمای سرزمین ناشی از فعالیت‌های انسانی، این کارکردها را به‌طور فزاینده‌ای مختل کرده‌اند. پویایی کاربری اراضی از طریق سنجه‌های سیمای سرزمین که ترکیب، ساختار و آرایش لکه‌های کاربری اراضی را توصیف می‌کنند، بازتاب می‌یابند. شاخص‌های پیکربندی فضایی ابزار مؤثری برای کمی‌سازی و تحلیل این الگوهای فضایی هستند. در همین راستا، این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و بررسی ارتباط آن‌ها با سنجه‌های و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار در استان مازندران انجام شده است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور نیل به اهداف پژوهش، نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ با روش ماشین بردار پشتیبان و نقشه پیش‌بینی شده در سال ۱۴۰۹ با روش زنجیره مارکوف و مدلساز تغییر سرزمین در منطقه مطالعاتی تهیه شد. در ادامه، مجموعه‌ای از شاخص‌های ساختار سیمای سرزمین شامل تعداد لکه، تراکم لکه، شاخص بزرگترین لکه و غیره در محیط نرم‌افزار Fragstats و همچنین فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین شامل تغییر شکل، جابه‌جایی، ایجاد و غیره در هر یک از طبقات کاربری اراضی با نرم‌افزار TerrSet استخراج شد. خدمات هیدورلوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب نیز در سال‌های مطالعاتی و شرایط آتی با توجه به سناریوی تداوم روند فعلی تغییر کاربری اراضی در آبخیز تالار با بهره‌گیری از مدل InVEST مدل‌سازی و پیش‌بینی شد. در مرحله بعد، ارتباط سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با عملکرد خدمات مورد اشاره در محیط نرم‌افزار SPSS با استفاده از ضریب همبستگی Pearson مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث: یافته‌های پژوهش حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل مدلساز تغییر سرزمین در پیش‌بینی کاربری اراضی آبخیز تالار است ($K_{location}$=0.969 و K_{no}=0.964). نتایج نشان داد که از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹، مقدار تغییر مساحت کاربرهای کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی به‌ترتیب ۲۱/۰۱، ۱۴/۸۶-، ۵/۶۶-، ۵/۷۶، ۱۹/۸۵- و ۱۳/۶۰ کیلومترمربع خواهد بود. علاه بر این، در بازه زمانی مذکور، مراتع و جنگل‌ها به‌ترتیب از ۱۱۰۰/۵ به ۱۰۸۰/۶ کیلومترمربع و از ۵۴۶/۱ به ۵۳۱/۲۴ کیلومترمربع کاهش می‌یابند، در حالی که کشاورزی دیم از ۴۵/۷۹ به ۶۶/۸ کیلومترمربع و مناطق مسکونی از ۲۷/۶۲ به ۴۱/۲۲ کیلومترمربع افزایش خواهند یافت. نتایج تحلیل همبستگی Pearson نشان داد که به‌جز تراکم لکه و تراکم لبه، سایر شاخص‌های الگوی مکانی با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب دارای ارتباط معنی‌دار بودند. در این میان، سنجه مساحت لکه بیشترین همبستگی را با هر دو خدمت داشته و ضرایب همبستگی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ به‌دست آمد. ارتباط معکوس سنجه شاخص بزرگ‌ترین لکه با تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار به‌دست آمد که نشان‌دهنده تأثیر منفی افزایش یکپارچگی لکه‌های بزرگ کاربری بر ظرفیت بوم‌سازگان در ارائه این خدمات هیدرولوژیک است. شاخص شکل سیما در کاربری‌های جنگل و مرتع طی دوره ۲۵ ساله کاهش و در سایر کاربری‌ها افزایش یافته است. کاهش این شاخص با کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار همراه بوده است. یافته‌های حاصل از پژوهش در خصوص فرآیند تغییر ایجاد در کاربری اراضی کشاورزی دیم منجر به افزایش تولید آب و کاهش نگهداشت رسوب شده است. کاربری اراضی جنگل نیز طی دوره مطالعاتی با فرآیند تغییر تنزل منجر به کاهش خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار شده است. به‌بیان دیگر، کاهش پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل منجر به کاهش نگهداشت رسوب در آبخیز تالار طی دوره پژوهش شده است. کاهش تولید آب نیز در کاربری جنگل به‌سبب کاهش مساحت ۷۱/۰۲ کیلومترمربعی آن از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد تداوم تغییرات کاربری اراضی و خردشدگی سیمای سرزمین می‌تواند موجب تضعیف خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و کاهش تاب‌آوری بوم‌شناختی در آبخیز تالار شود. در این راستا، پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات کاربری اراضی و ساختار سیمای سرزمین در آبخیز تالار تاثیر قابل توجهی بر خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب دارند. شاخص‌های سیمای سرزمین، به‌ویژه مساحت لکه، ارتباط معنی‌داری با این خدمات بوم‌سازگان داشتند و افزایش یکپارچگی لکه‌های بزرگ، تأثیر منفی بر عملکرد بوم‌سازگان داشت. کاهش پوشش جنگلی نیز به کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب منجر شده است. این یافته‌ها بر اهمیت برنامه‌ریزی یکپارچه کاربری اراضی و حفاظت از منابع در شمال ایران تأکید دارد. به‌کارگیری رویکردی تلفیقی بر پایه مدل‌سازی مکانی، سنجه‌های سیمای سرزمین و تحلیل فرآیندهای تغییر، چارچوبی کاربردی برای ارزیابی و پیش‌بینی وضعیت خدمات بوم‌سازگان در مقیاس آبخیز فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پایداری محیط زیستی، تحلیل مکانی، سناریوی تغییر، مدلسازی تغییر سرزمین، مدل InVEST

استناد: ذبیحی، م.، مرادی، ح.ر.، خالدی‌درویشان، ع.و.، و غلامعلی‌فرد، م. (۱۴۰۵). مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۷۲-۵۰. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2067686.1244

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

بوم‌سازگان‌ها از طریق ارائه خدمات گوناگون، نقش مهمی در تأمین نیازهای انسانی ایفا می‌کنند. در این میان، خدمات هیدرولوژیک نظیر تولید آب و نگهداشت رسوب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خدمات تأمین‌شده توسط بوم‌سازگان‌های آبخیز، نقش کلیدی در پایداری منابع آب و حفاظت خاک ایفا می‌کنند (Amini Parsa *et al.*, 2024; Marchioni *et al.*, 2025). با این حال، عملکرد این خدمات به‌شدت تحت تأثیر تغییرات محیطی و به‌ویژه تغییرات کاربری اراضی و اقلیم قرار دارد (Fu *et al.*, 2017). از میان این دو عامل، تغییر کاربری اراضی به‌واسطه‌ی وابستگی مستقیم به فعالیت‌های انسانی، تأثیر ملموس‌تر و سریع‌تری بر ساختار بوم‌شناسی و فرآیندهای زیست‌محیطی دارد (Stephens *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024). الگوی کاربری اراضی و تغییرات آن، از طریق سیمای سرزمین[1] بازتاب می‌یابد؛ مفهومی که ترکیب، ساختار و پویایی قطعات یا لکه‌های کاربری اراضی را در بر می‌گیرد (Seto & Fragkias, 2005). سنجه‌های سیمای سرزمین[2] در سه سطح لکه، طبقه و سیما، ابزاری برای کمی‌سازی و تحلیل الگوهای فضایی کاربری اراضی فراهم می‌سازند (Sertel *et al.*, 2018). سنجه‌های لکه ویژگی هر لکه، سنجه‌های طبقه الگوی هر نوع کاربری، و سنجه‌های سیما کل ساختار چشم‌انداز را توصیف می‌کنند. همچنین، تحلیل فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین[3]، امکان بررسی روندها و سازوکارهای دگرگونی سیمای سرزمین در طول زمان را فراهم می‌کند (Li *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2025). این سنجه‌ها و فرآیندها، با ارائه تصویر واضح‌تری از تغییرات ساختاری، می‌توانند بینش عمیق‌تری نسبت به تأثیرات انسانی بر کاربری اراضی و پیامدهای آن بر عملکرد بوم‌سازگان فراهم کنند (Lausch *et al.*, 2015).

در سال‌های اخیر، پیش‌بینی و مدل‌سازی کمی خدمات بوم‌سازگان، به‌ویژه خدمات هیدرولوژیک مانند تولید آب و نگهداشت رسوب، به یکی از محورهای اصلی در مطالعات مدیریت محیط زیست تبدیل شده است (Sahle *et al.*, 2019). در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی مانند مدل‌سازی تغییر سرزمین (LCM)[4] در کنار مدل‌های ارزیابی خدمات بوم‌سازگان همچون InVEST[5] امکان تحلیل جامع‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های انسانی فراهم می‌سازد (Liang *et al.*, 2024). مدل LCM با شبیه‌سازی الگوهای مکانی-زمانی آینده، روندهای تغییر کاربری اراضی را پیش‌بینی کرده و نقشه‌های آینده‌نگر در اختیار قرار می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان ورودی مدل InVEST برای ارزیابی عملکرد آتی خدمات هیدرولوژیک استفاده شود. مدل InVEST با ورودی‌های نسبتاً محدود و انعطاف‌پذیری بالا، قادر است تغییرات مکانی-زمانی خدمات آبخیز را شبیه‌سازی کند و در نتیجه، بستر مناسبی برای تحلیل پیامدهای ناشی از تحولات سرزمینی و ارزیابی اثرات سناریوهای مدیریتی فراهم سازد (Liu *et al.*, 2023). این رویکرد تلفیقی، نه‌تنها در شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل آثار زیست‌محیطی توسعه مؤثر است، بلکه زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های کارآمد برای ارتقاء تاب‌آوری محیط‌زیست در برابر تغییرات پیش‌رو نیز به‌شمار می‌آید.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات مختلفی به بررسی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن با مؤلفه‌های کاربری اراضی پرداخته‌اند. در این راستا، مطالعه Salmoral و همکاران (۲۰۱۵) در آبخیز Turia اسپانیا با استفاده از مدل

[1] Landscape
[2] Landscape Metrics
[3] Landscape Change Processes
[4] Land Change Modeler, LCM
[5] Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST

SWAT نشان داد که تغییرات کاربری اراضی مؤثرترین عامل در بیلان آبی حوزه است و افزایش دما موجب کاهش جریان رودخانه شده است. در کشور رومانی، Bogdan و همکاران (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از مدل InVEST، تغییرات نگهداشت رسوب را تحت سناریوهای مختلف کاربری اراضی بررسی کرده و دریافتند که سناریوی توسعه و حفاظت به‌ترتیب بیشترین کاهش و افزایش را در نگهداشت رسوب به همراه دارد. Cabral و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه شهری Bordeaux فرانسه اثر تغییرات کاربری اراضی بر خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب را بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ با مدل InVEST تحلیل کرده و نشان دادند که تولید آب روند افزایشی و حفاظت خاک روند کاهشی داشته است. Lang و همکاران (۲۰۱۷) اثر سناریوهای توسعه سریع شهری و حفاظت بوم‌شناسی را بر نگهداشت رسوب برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ بررسی کرده و دریافتند که توسعه شهری منجر به کاهش شدید این خدمت و سناریوی حفاظت موجب بهبود آن می‌شود. Tavangar و همکاران (۲۰۱۹) در آبخیز نکارود استان مازندران با تلفیق مدل‌های CA-Markov و SWAT نشان دادند که در صورت ادامه روند جنگل‌زدایی، جریان رودخانه در آینده افزایش خواهد یافت. Chen و همکاران (۲۰۱۹) ارتباط مکانی تغییرات کاربری اراضی با شدت خدمات بوم‌سازگان از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ را بررسی و رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار بین این دو متغیر گزارش دادند. Li و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل InVEST نشان دادند که ترکیب کاربری‌های اراضی تأثیر بیش‌تری بر تولید آب و حفاظت خاک نسبت به پیکربندی فضایی دارد و رابطه‌ای غیرخطی بین ناهمگنی سیمای سرزمین و خدمات هیدرولوژیک وجود دارد. Jahanishakib و همکاران (۲۰۲۱) در آبخیز قره‌سو با استفاده از نظریه‌های Graph و Circuit نشان دادند که توسعه‌های فضایی غیربهینه باعث کاهش اتصال هیدرولوژیکی خواهد شد. در پژوهش Guo و همکاران (۲۰۲۲) در نواحی بالادست و میان‌دست رودخانه زرد در کشور چین، تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی، انسانی و الگوی سیمای سرزمین بر ارزش خدمات بوم‌سازگان بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر این عوامل تابع آستانه است و عبور از حد مشخص آن آستانه باعث کاهش چشمگیر ارزش خدمات بوم‌سازگان می‌شود. Liu و همکاران (۲۰۲۴) در کشور چین با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و شبیه‌سازی‌های چندمدلی نشان دادند که مناطق کلیدی بوم‌شناسی در تقویت خدمات بوم‌سازگان نقش کلیدی دارند و تغییرات گسترده کاربری اراضی تحت تأثیر اقلیم و مدیریت ناصحیح سرزمین، عامل اصلی تضعیف این خدمات است. Loc و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات خدمات بوم‌سازگان ازجمله کاهش سیلاب، تأمین آب و کنترل فرسایش را در حوضه Pasak تایلند با مدل LUCI[1] در دو بازه زمانی و دو سناریو بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کاهش پوشش جنگلی و گسترش اراضی کشاورزی و شهری منجر به افت چشمگیر در خدمات تنظیمی شده است. Tang و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی روابط زمانی-مکانی میان الگوی سیمای سرزمین و نگهداشت آب طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان دادند که کاهش پوشش جنگل و مراتع پربازده موجب افت ظرفیت حفظ آب شده و شاخص‌هایی مانند تراکم لکه و تنوع شانون رابطه‌ای معنی‌دار با این خدمت بوم‌سازگان دارند.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و شرایط اقلیمی هستند، به‌طوری که افزایش فعالیت‌های توسعه‌ای و کاهش پوشش گیاهی، به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع، ظرفیت تولید آب و نگهداشت رسوب را کاهش می‌دهد. براساس نتایج مطالعات صورت گرفته، نقش کلیدی سیمای سرزمین در تعیین کیفیت

[1] Land utilization capability and indicator, LUCI

و کمیت خدمات هیدرولوژیک غیرقابل انکار است و رابطه غیرخطی و پیچیده‌ای میان ساختار و ترکیب کاربری اراضی با عملکرد این خدمات گزارش شده است. با این حال، بررسی‌های صورت‌گرفته غالباً به تحلیل‌های جداگانه یا دوره‌ای محدود شده‌اند و کمتر مطالعه‌ای به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه به مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک، شاخص‌های سیمای سرزمین و فرآیندهای تغییرات آن پرداخته است. علاوه بر این، ارتباط دقیق و چگونگی تأثیر تغییرات مکانی و زمانی سیمای سرزمین بر خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیک در مقیاس حوزه آبخیز نیازمند مطالعه‌ای جامع است. درک علّی بهتر از ارتباط فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آینده و تلفیق مدل‌های LCM و InVEST با تحلیل کمی فرآیندهای تغییر برای ارائه چارچوبی پیش‌بین و علّی در مدیریت حوزه‌های آبخیز موثر است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب در سناریوی تداوم روند فعلی تغییر کاربری اراضی با کمک مدل‌های LCM و InVEST برنامه‌ریزی شده است. تحلیل ارتباط میان ساختار فضایی سیمای سرزمین از طریق سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با عملکرد خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در حوزه آبخیز تالار در استان مازندران از دیگر اهداف پژوهش حاضر است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در بهینه‌سازی سیاست‌های مدیریت سرزمین، ارتقاء راهبردهای حفاظت آب و خاک و پیش‌بینی پیامدهای بوم‌شناسی ناشی از تغییرات انسانی مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخیز تالار که در حد واسط ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه ۳۴ ثانیه طول شرقی ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱ ثانیه عرض شمالی واقع شده است، یکی از زیرحوضه‌های مهم دریای خزر در استان مازندران، محدوده‌ای کوهستانی تا جلگه‌ای را از فیروزکوه تا شیرگاه در بر می‌گیرد. رودخانه تالار از ارتفاعات البرز سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از قائم‌شهر به دریای خزر می‌ریزد و نقش اساسی در تأمین آب و تنظیم جریان‌های سطحی در منطقه دارد. این حوضه با وسعتی حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع، دارای تنوع ارتفاعی از ۲۱۶ تا بیش از ۳۹۸۳ متر و میانگین بارش سالانه حدود ۵۰۰ میلی‌متر است (Mohammadi *et al.*, 2017). چنین ویژگی‌هایی موجب بروز فرآیندهای هیدرولوژیک پویا مانند نوسانات جریان آب، فرسایش خاک و تولید رسوب شده‌اند. پوشش اراضی آبخیز شامل جنگل‌های هیرکانی، مراتع، کشاورزی و سکونتگاه‌هاست که در سه دهه اخیر دستخوش تغییرات شدید شده‌اند (Rahmannejad *et al.*, 2024). این تغییرات خدمات بوم‌سازگان، ازجمله تولید آب، نگهداشت رسوب و کیفیت آب، را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده‌اند، در حالی که رودخانه تالار علاوه بر تأمین آب، نقش مهمی در تنظیم رسوبات ایفا می‌کند. وجود داده‌های هیدرومتری در ایستگاه‌هایی مانند شیرگاه، امکان تحلیل دقیق روندهای گذشته و مدل‌سازی آینده مؤلفه‌های هیدرولوژیک را فراهم کرده است. به‌دلیل تنوع طبیعی و تغییرات شدید انسانی، آبخیز تالار بستر مناسبی برای تحلیل ارتباط میان تغییر سیمای سرزمین و خدمات بوم‌سازگان به‌شمار می‌رود.

روش پژوهش

به‌منظور پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب، دوره آماری ۲۵ ساله پژوهش از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ مدنظر قرار گرفت. در ادامه، تهیه و پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی، محاسبه و استخراج سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین، مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه و تعیین ارتباط خدمات پیش‌گفته با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار شرح داده خواهد شد.

- تهیه نقشه شرایط گذشته، فعلی و آتی کاربری اراضی

در این پژوهش، پس از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat شامل تصحیح اتمسفری با استفاده از روش FLAASH[1] و رادیومتری[2]، نمونه‌های تعلیمی کاربری اراضی با حداقل ۵۰ نمونه برای هر طبقه از طریق پیمایش‌های میدانی و تصاویر رنگی کاذب جمع‌آوری شد. شش طبقه کاربری اراضی اصلی در منطقه شناسایی و با استفاده از طبقه‌بندی نظارت شده مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[3] و کرنل تابع پایه شعاعی[4] طبقه‌بندی شدند (Eshghizadeh & Mohammadpoor, 2025). صحت طبقه‌بندی با ضریب کاپا و صحت کلی ارزیابی شد (Zabihi *et al.*, 2020). در این پژوهش، سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۹ به‌عنوان دوره واسنجی، ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ به‌عنوان دوره اعتبارسنجی و ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹ به‌عنوان دوره پیش‌بینی انتخاب شدند. نقشه کاربری سال ۱۳۹۳ از روی داده‌های سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۹ پیش‌بینی و اعتبارسنجی شد و سپس پیش‌بینی کاربری سال ۱۴۰۹ با مدل LCM در نرم‌افزار TerrSet انجام گرفت. متغیرهای مؤثر بر تغییر کاربری شامل ارتفاع، فاصله‌ها از کاربری‌های مختلف و احتمال تجربی در این پژوهش مدنظر بوده که از طریق آزمون ضریب همبستگی کرامر[5] به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای لازم برای اجرای مدل LCM تعیین شدند (Shooshtari & Gholamalifard, 2015). در همین راستا، زیرمدل‌های تغییر براساس بیشینه سطح تغییر و روند گذشته تغییرات انتخاب شدند. در ادامه، سناریوی تداوم روند فعلی تغییر در مدل‌سازی توانایی انتقال مبتنی بر شبکه عصبی پرسپترون چندلایه[6] مدنظر قرار گرفت که براساس شاخص‌های خطا و میزان صحت ارزیابی شد. همچنین، پیش‌بینی تغییرات کاربری با روش زنجیره مارکوف انجام و با ضریب کاپا (K_{no} و $K_{location}$) صحت‌سنجی شد (Jafarpour Ghalehteimouri *et al.*, 2022). شاخص K_{no} بیانگر میزان توافق در کمیت یا مقدار هر طبقه است و نشان می‌دهد مساحت پیش‌بینی‌شده برای هر طبقه تا چه اندازه با مقدار واقعی آن هم‌خوانی دارد. در مقابل، شاخص $K_{location}$ نشان‌دهنده میزان توافق در مکان قرارگیری طبقات است و دقت مکانی طبقه‌بندی را ارزیابی می‌کند. جزئیات تهیه نقشه‌های کاربری اراضی در مطالعه Zabihi و همکاران (۲۰۲۰) ارائه شده است.

- محاسبه و استخراج سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین

به‌منظور بررسی پویایی و تغییرات سیمای سرزمین در آبخیز تالار از نرم‌افزار Fragstats و روش همسایگی هشت سلولی و استراتژی بدون نمونه‌برداری استفاده شد (McGarigal *et al.*, 2015). در این راستا، تعداد زیادی از سنجه‌های سیمای سرزمین برای سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ در دو مقیاس آبخیز و زیرآبخیز و در دو سطح طبقه و سیما محاسبه شد (Abdolalizadeh *et al.*, 2019). در مرحله بعد، به‌منظور کاهش تعداد سنجه‌های دارای خودهمبستگی در مقیاس آبخیز و سطح سیما از روش OLS[7] و مقدار VIF[8] (Pratt & Chang, 2012) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی مجذور همبستگی[9] در نرم‌افزار SPSS (Alaei *et al.*, 2024) و نهایتاً براساس هدف پژوهش و مطالعات پیشین سنجه‌های تعداد لکه[10]، میانگین

[1] Fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubus, FLAASH
[2] Radiometric calibration
[3] Support vector machine, SVM
[4] Radial basis function, RBF
[5] Cramer
[6] Multilayer perceptron, MLP
[7] Ordinary least squares, OLS
[8] Variance inflation factor, VIF
[9] Hierarchical clustering based on squared correlation
[10] Number of patch, NP

مساحت لکه[1]، تراکم لکه[2]، شاخص بزرگترین لکه[3]، شاخص شکل[4]، تراکم لبه[5]، شاخص شکل سیما[6] و دایره محاط[7] برای بررسی‌ها و تحلیل‌های بیش‌تر مدنظر قرار گرفتند (Naseri & Mostafazadeh, 2023).

جدول ۱- تعاریف فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین
Tabel – Landscape change processes definition

فرآیند	تعریف
تغییر شکل	شکل در حال تغییر است
جابه‌جایی	موقعیت در حال تغییر است
کاهش سطح	تعداد لکه‌ها ثابت، اما مساحت در حال کاهش است
جمع‌شدگی	مساحت و محیط در حال کاهش، اما تعداد لکه‌ها ثابت است
افزایش سطح	تعداد لکه‌ها ثابت، اما مساحت در حال افزایش است
تنزل	تعداد لکه‌ها و مساحت در حال کاهش است
تجمع	تعداد لکه‌ها در حال کاهش، اما مساحت ثابت یا در حال افزایش است
ایجاد	تعداد لکه‌ها و مساحت در حال افزایش است
تفکیک	تعداد لکه‌ها در حال افزایش و مساحت در حال کاهش است
تکه‌تکه شدن	تعداد لکه‌ها در حال افزایش و مساحت به شدت در حال کاهش است

بررسی فرآیندهای تغییر یکی از رویکردهای شناسایی رفتار کاربری اراضی در مطالعات سیمای سرزمین است. فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین شامل تغییر شکل[8]، جابه‌جایی[9]، کاهش سطح[10]، افزایش سطح[11]، جمع‌شدگی[12]، تنزل[13]، تجمع[14]، ایجاد[15]، تفکیک[16] و تکه‌تکه شدن[17] هستند که تعریف هر یک از آن‌ها بر تغییرات سه سنجه تعداد لکه، مساحت لکه و محیط لکه استوار است (Bogaert *et al.*, 2004). در همین راستا، فرآیندهای تغییر طی یک دوره زمانی با استفاده از درخت تصمیم و بررسی دو نقشه کاربری اراضی در زمان‌های t_1 و t_2 و نحوه تغییرات سنجه‌های مدنظر در تعریف فرآیندها و برای کاربری‌های اراضی مختلف تعیین می‌شوند (Anagonou *et al.*, 2023). تعاریف هریک از فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین (Bogaert *et al.*, 2004) در جدول ۱ ارائه شده است.

استخراج فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار به‌سبب تهیه و وجود نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ طی دوره‌های زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۹، ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ و ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹ و در دو مقیاس مکانی آبخیز و زیرآبخیز با استفاده از نرم‌افزار TerrSet صورت پذیرفت.

- مدلســـازی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند تولید آب در مدل InVEST، ابتدا نقشه مکانی بارش سالانه در سال‌های مطالعاتی با استفاده از روش گرادیان بارندگی و تابع نمایی تهیه گردید. برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع، رابطه اصلاح شده Hargreaves مطابق با دستورالعمل مدل InVEST به کار گرفته شد (Wei *et al.*, 2021). در این رابطه، تابش خورشیدی به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه سینوپتیک قراخیل قائمشهر شامل طول و عرض جغرافیایی، دما و رطوبت نسبی محاسبه شد (Allen *et al.*, 1998). دمای متوسط با استفاده از روش گرادیان در آبخیز تالار استخراج و مقادیر حداقل و حداکثر دما از ایستگاه سنگده که در ارتفاع متوسط آبخیز واقع شده است، استفاده شد.

پارامترهای دیگر مدل مانند عمق لایه محدودکننده ریشه بر اساس مطالعات پیشین انجام شده در منطقه

[1] Patch area_Area weighted mean, PA
[2] Patch density, PD
[3] Largest patch index, LPI
[4] Shape index_Area weighted mean, AWMSI
[5] Edge density, ED
[6] Landscape shape index, LSI
[7] Circumscribing circle_Area weighted mean, AWMCC
[8] Deformation
[9] Shift
[10] Perforation
[11] Enlargement
[12] Shrinkage
[13] Attrition
[14] Aggregation
[15] Creation
[16] Dissection
[17] Fragmentation

(DNRWM Mazandaran, 2000) معادل عمق خاک پروفیل‌های نمونه‌برداری شده لحاظ گردید. میزان آب در دسترس گیاه نیز از تفاوت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک براساس داده‌های بافت خاک محاسبه شد (Alizadeh, 2015). عمق ریشه گیاهان غالب هر کاربری اراضی نیز با توجه به پوشش گیاهی غالب و محدودیت عمق خاک تعیین شد. در مواردی که عمق ریشه نسبت به عمق خاک بیشتر بود، عمق خاک به‌عنوان معیار نهایی پذیرفته شد. وضعیت پوشش گیاهی هر کاربری به صورت دو حالته (وجود یا عدم وجود پوشش) تعریف شد، به طوری که تمامی کاربری‌ها به جز مناطق مسکونی، دارای پوشش در نظر گرفته شدند. برای اصلاح تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تبخیر و تعرق پتانسیل، ضرایب اختصاصی هر کاربری بر اساس ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه یونجه مطابق با توصیه Sharp و همکاران (۲۰۱۸) اعمال گردید. با توجه به الگوی بارش غالب در منطقه (وقوع بارش در فصل زمستان)، پارامتر فصلی بودن مدل برابر با ۱۰ تعیین شد. مصرف آب در کاربری‌های کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و باغ‌ها با استفاده از نرم‌افزار OptiWAT و براساس کشت غالب هر دوره و در مناطق مسکونی با توجه به آمار جمعیتی شهرستان و سرانه مصرف آب (Hamdi Ahmadabad *et al.*, 2019) برآورد شد. سایر کاربری‌ها به‌دلیل محاسبه مصرف آب آن‌ها از طریق تبخیر و تعرق، مقدار مصرف صفر اختصاص یافت (Sharp *et al.*, 2018).

ماژول نسبت تحویل رسوب مدل InVEST قابلیت شبیه‌سازی الگوی مکانی و زمانی هدررفت خاک و همچنین تخمین سهمی از رسوب انتقال‌یافته از واحدهای مختلف سطح آبخیز به خروجی را فراهم می‌سازد. محاسبات این مدل مبتنی بر معادله جهانی هدررفت خاک[1] انجام می‌پذیرد که در آن فاکتورهای کلیدی ازجمله فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک (Rostami & Rabbani, 2023)، مدیریت پوشش گیاهی و کاربری اراضی، در کنار شاخص‌های توپوگرافی، تعیین‌کننده میزان فرسایش بالقوه هستند. در راستای اجرای مدل مذکور برای تحلیل و برآورد نگهداشت رسوب در سال‌های مورد پژوهش، عامل فرسایندگی باران بر پایه رابطه‌ای تجربی از بارندگی سالانه و با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی بارش، محاسبه شد. عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز بر اساس خصوصیات فیزیکی–شیمیایی لایه‌های سطحی خاک در واحدهای اراضی استخراج و از رابطه Wischmeier و Smith استفاده شد (Qiao *et al.*, 2024). با توجه به پایداری نسبی ویژگی‌های خاک در دوره کوتاه‌مدت، این عامل در سال‌های مورد مطالعه یکسان لحاظ شد. برای استخراج عامل مدیریت زراعی (C)، به‌عنوان نمایه‌ای از میزان حفاظت زیستی خاک، شاخص پوشش گیاهی NDVI از تصاویر ماهواره‌ای پردازش‌شده در نرم‌افزار ENVI 5.3 و پس از انجام تصحیحات رادیومتری و اتمسفری محاسبه شد.

مقدار عامل C برای هر سال با استفاده از میانگین مقادیر فصلی NDVI و رابطه تجربی مربوطه (Khademalrasoul & Amerikhah, 2021) برآورد گردید. عامل مدیریت اراضی (P) نیز متناسب با نوع کاربری و بر اساس مقادیر پیشنهادی در منابع علمی (Khorsand *et al.*, 2016) برای هر کلاس کاربری تعیین شد. پارامترهای توپوگرافی مدل ازجمله مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر از سازمان نقشه‌برداری کشور اخذ شد. آستانه تجمع جریان، که بیانگر تعداد سلول‌های لازم برای تشکیل یک آبراهه است، با تحلیل نقشه آبراهه‌های طبیعی و براساس دستورالعمل مدل InVEST برابر با ۱۰۰ سلول در نظر گرفته شد. در بخش مربوط به شاخص اتصال رسوبی که نقش کلیدی در برآورد نسبت تحویل رسوب دارد، با توجه به عدم انطباق خروجی مدل SedInConnect با

[1] Universal soil loss equation, USLE

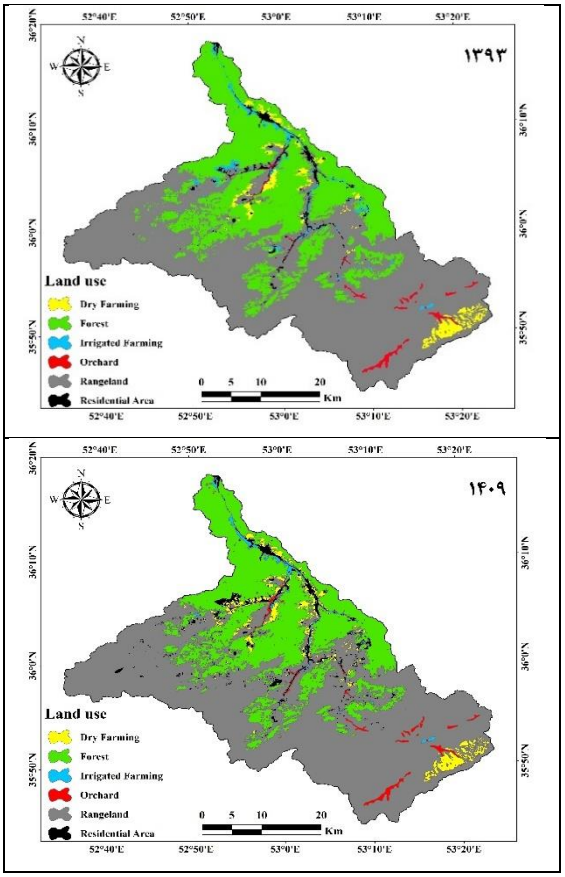
واقعیت‌های منطقه، از مقادیر پیش‌فرض توصیه‌شده مدل مذکور برای شاخص اتصال رسوبی و پارامتر شکل منحنی به‌ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ استفاده شد. در نهایت در این تحقیق، حداکثر مقدار نسبت تحویل رسوب با توجه به اقلیم و الگوی کاربری منطقه برابر با ۰/۸ منظور گردید.

- تعیین ارتباط سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان

به‌منظور تعیین ارتباط سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز از آزمون همبستگی پیرسون (Zhang *et al.*, 2019) در هر یک از سال‌های مورد بررسی به‌سبب وجود پیش‌نیازهای لازم آزمون یادشده استفاده شد. در راستای تعیین میزان همبستگی پیرسون بین سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز، از مقدار سنجه‌های موردنظر در زیرآبخیزهای مختلف و در سال‌های مطالعاتی با مقادیر تولید آب و نگهداشت رسوب در زیرآبخیزها و سال‌های مطالعاتی مربوطه در محیط نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در ادامه و با هدف تعیین ارتباط بین فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش، مقایسه تغییرات تولید آب و نگهداشت رسوب در انواع کاربری‌های اراضی طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ بررسی و ارتباط آن با فرآیند تغییر سیمای سرزمین به‌وقوع پیوسته در آن کاربری تعیین شد.

نتایج

نتایج تهیه نقشه کاربری اراضی در سال ۱۳۹۳ و نیز پیش‌بینی سال ۱۴۰۹ با استفاده از مدل LCM در آبخیز تالار در شکل ۱ ارائه شده است. براساس نتایج، عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات کاربری با مقادیر K_{no} و $K_{location}$ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶۴ و ۰/۹۶۹ تأیید شد. مقدار ضریب کاپا برای نقشه تهیه شده سال ۱۳۹۳ نیز برابر با ۰/۸۲ محاسبه شد. سطح تحت پوشش انواع کاربری‌های اراضی در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی آبخیز تالار در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹

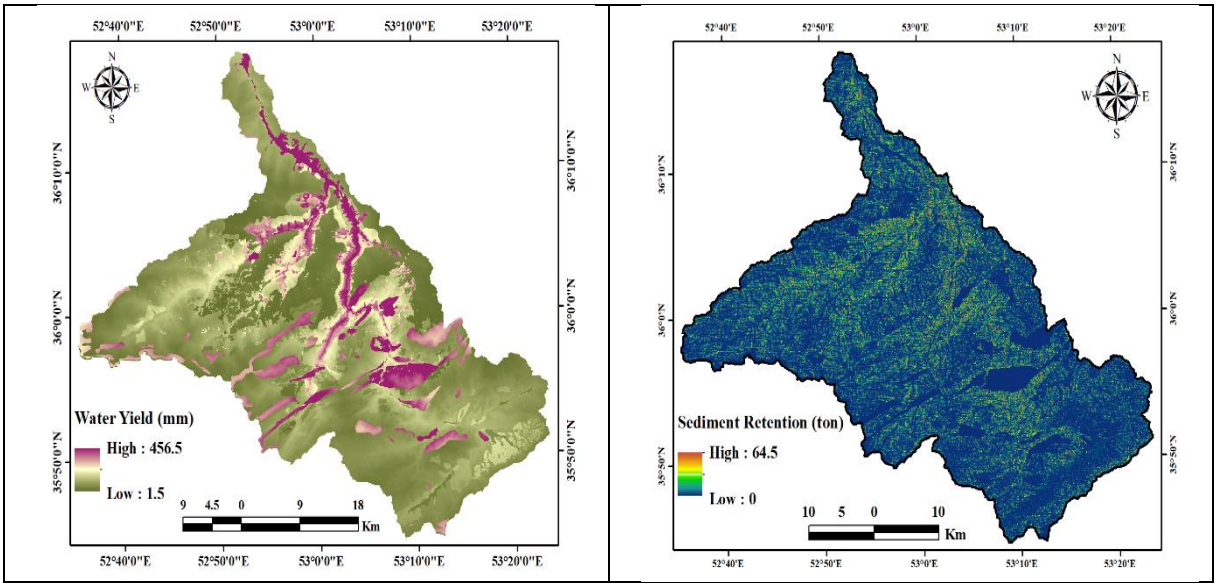
Figure 1– Land use maps of the Talar watershed in 2014 and 2030

جدول ۲- مساحت کاربری‌های اراضی آبخیز تالار در شرایط فعلی و آتی

Table 2- Land use areas in the talar watershed under current and future conditions

کاربری اراضی	2014		2030	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد
کشاورزی دیم	45.79	2.60	81.66	3.79
جنگل	546.10	30.96	523.23	30.11
کشاورزی آبی	26.90	1.52	21.24	1.20
باغ	17.18	0.97	22.93	1.30
مرتع	1100.5	62.38	1080.6	61.26
منطقه مسکونی	27.63	1.57	41.23	2.34

نتایج پیش‌بینی تولید آب و نگهداشت رسوب به‌عنوان خدمات هیدرلوژیک بوم‌سازگان در آبخیز تالار در شکل ۲ نشان داده شده است. یافته‌های حاصل از محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح سیما در مقیاس‌های آبخیز و زیرآبخیز در جدول ۳ ارائه شده است. فرآیندهای تغییر به وقوع پیوسته در انواع کاربری‌های اراضی طی دوره‌های مطالعاتی در مقیاس آبخیز و زیرآبخیز تالار در جدول ۴ آمده است. نتایج به‌دست آمده از بررسی همبستگی سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز در منطقه مورد پژوهش نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه خدمات بوم‌سازگان تولید آب (چپ) و نگهداشت رسوب (راست) در آبخیز تالار برای سال ۱۴۰۹

Figure 2- Map of water yield (left) and sediment retention (right) ecosystem services in the Talar watershed for 2030

جدول ۳- نتایج محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح سیما در مقیاس‌های آبخیز و زیرآبخیز

Table 3- Results of landscape metrics calculation at the landscape level across watershed and sub-watershed scales

زیرآبخیز	سال	NP	PD	LPI	ED	LSI	PA	AWMSI	AWMCC
فلورد	1989	82	1.1	86.79	13.9	4.76	5654.4	4.08	0.72
	2000	114	1.52	82.95	18.47	5.75	5173.1	4.3	0.73
	2014	151	2.02	82.96	20.12	6.1	5168	4.33	0.73
	2030	206	2.76	82.81	21.12	6.31	5145.5	4.21	0.73
آریم	1989	78	1.06	71.65	21.25	6.09	4030.4	5.96	0.64
	2000	76	1.03	74.1	21.16	6.07	4235.2	5.89	0.63
	2014	62	0.84	74.84	20.5	5.93	4308.5	5.78	0.63
	2030	133	1.81	74.71	22.42	6.33	4217.9	5.5	0.64
نیزوا	1989	6	0.1	99.11	0.99	1.71	6193.7	1.69	0.45
	2000	9	0.14	99.35	1.48	1.8	6222.6	1.8	0.44
	2014	5	0.08	96.91	2.57	2.02	5923.3	2.01	0.47
	2030	5	0.08	96.9	2.63	2.03	5919.5	2.02	0.47
آسران	1989	36	0.73	77.55	14.44	3.93	3119.7	3.61	0.58

	0.62	5.14	2503.8	5.64	24.13	68.49	1.11	55	2000
	0.68	5.15	1668.5	6.97	31.71	54.69	1.33	66	2014
	0.68	5.06	1586.4	7.86	36.86	53.16	4.99	247	2030
دشت سفید	0.61	3	9396.1	2.96	4.88	94.1	0.09	10	1989
	0.62	3.29	9220.4	3.28	6.1	93.2	0.21	22	2000
	0.63	3.34	8874.6	3.35	6.37	91.4	0.14	15	2014
	0.63	3.37	8834.8	3.55	7.16	91.2	0.61	65	2030
قدمگاه	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	1989
	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	2000
	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	2014
	0.58	1.56	10415.8	1.56	0	100	0.01	1	2030
ورسک	0.63	5.29	5854	5.66	17.32	80.29	0.88	79	1989
	0.62	5.1	6136.2	5.57	16.92	82.35	0.79	71	2000
	0.62	4.66	6295.8	5.04	14.72	83.42	0.57	51	2014
	0.61	4.56	6450.9	5.02	14.66	84.64	0.81	73	2030
اوریم	0.54	3.09	3153.4	3.58	11.41	73.49	0.67	36	1989
	0.55	3.3	3154.8	3.95	13.43	74.15	0.73	39	2000
	0.55	3.18	3184.5	3.84	12.83	74.53	0.73	39	2014
	0.55	3.24	3176.4	3.9	13.13	74.45	0.84	45	2030
پالند	0.77	6.58	7351.9	8.71	19.76	44.92	1.23	250	1989
	0.78	6.53	6636.2	9.55	22.12	40.13	1.29	262	2000
	0.78	6.29	6569.1	9.8	22.83	40.75	1.48	302	2014
	0.76	6.33	6595.9	10.3	24.22	41.84	2.02	411	2030
آلاشت	0.79	7.17	15148.4	9.53	17.75	68.35	1.5	458	1989
	0.75	6.8	16140.5	9.33	17.29	70.74	1.25	381	2000
	0.76	5.98	15903.1	9.19	16.96	71.23	1.21	370	2014
	0.73	5.15	15283.8	9.86	18.49	69.84	1.71	521	2030
ناحیه داخلی	0.75	8.27	17615.8	14.43	18.29	44.13	1.35	867	1989
	0.75	7.94	18050.4	14.56	18.5	46.06	1.12	718	2000
	0.76	6.81	16597.1	14.68	18.69	43.59	1.06	679	2014
	0.77	7.22	15758.5	16.72	21.93	42.13	1.75	1122	2030
آبخیز تالار	0.76	12.19	69519.1	18.3	15.45	59.44	1.03	1817	1989
	0.74	13.1	76195.8	19.21	16.32	60.6	0.93	1637	2000
	0.75	11.95	73119.67	19.51	16.6	59.23	0.92	1625	2014
	0.75	11.78	71862.01	20.99	18.06	58.81	1.52	2686	2030

جدول ۴- فرآیندهای تغییر در انواع کاربری‌های اراضی طی دوره‌های مطالعاتی در مقیاس آبخیز و زیرآبخیز تالار

Table 4 – Landscpe change processes in different land use types during the study periods at the watershed and sub-watershed scales of Talar

ردیف	زیرآبخیز	کاربری اراضی	1989-2000	2000-2014	1989-2014	2014-2030
3	نیزوا	کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	افزایش سطح	افزایش سطح
		باغ	ایجاد	تجمع	تجمع	افزایش سطح
		مرتع	افزایش سطح	کاهش سطح	کاهش سطح	کاهش سطح
4	آسران	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	تجمع
		باغ	افزایش سطح	تجمع	تجمع	ایجاد
		مرتع	کاهش سطح	تفکیک	تفکیک	جمع‌شدگی
5	دشت سفید	کشاورزی دیم	ایجاد	تجمع	ایجاد	جابه‌جایی
		باغ	ایجاد	تجمع	تجمع	ایجاد
		مرتع	تفکیک	تنزل	تفکیک	تفکیک
6	قدمگاه	مرتع	-	-	-	-
7	ورسک	کشاورزی دیم	-	-	-	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تفکیک
		کشاورزی آبی	ایجاد	تنزل	ایجاد	جمع‌شدگی
		مرتع	ایجاد	تجمع	ایجاد	تجمع
		منطقه مسکونی	افزایش سطح	افزایش سطح	افزایش سطح	ایجاد
8	اوریم	جنگل	تفکیک	تنزل	تفکیک	تجمع
		مرتع	افزایش سطح	ایجاد	ایجاد	تفکیک
		منطقه مسکونی	تجمع	ایجاد	تجمع	ایجاد
9	پالند	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	تفکیک
		جنگل	تنزل	تجمع	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	تفکیک	تفکیک	تنزل
		باغ	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تفکیک	ایجاد
		منطقه مسکونی	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
10	آلاشت	کشاورزی دیم	-	-	-	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	تجمع	تفکیک
		باغ	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	ایجاد	تجمع	تنزل
		منطقه مسکونی	تجمع	ایجاد	ایجاد	ایجاد
11	ناحیه داخلی	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تفکیک
		کشاورزی آبی	تجمع	تفکیک	ایجاد	تفکیک
		باغ	ایجاد	تجمع	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تجمع	تفکیک
		منطقه مسکونی	تجمع	تجمع	تجمع	ایجاد
12	آبخیز تالار	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	ایجاد	تفکیک

ردیف	زیرآبخیز	کاربری اراضی	1989-2000	2000-2014	1989-2014	2014-2030
		باغ	ایجاد	تجمع	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تجمع	تنزل
		منطقه مسکونی	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد

جدول ۵- نتایج همبستگی پیرسون بین سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز تالار

Table 5 – Pearson correlation results between landscape metrics and hydrological services in the Talar watershed

خدمات آبخیز	آماره	NP	PD	LPI	ED	LSI	PA	AWMSI	AWMCC
تولید آب	ضریب همبستگی	0.625**	0.310	-0.558**	0.282	0.621**	0.699	0.660	0.634**
	معنی‌داری	0.000	0.079	0.001	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000
نگهداشت رسوب	ضریب همبستگی	0.604**	0.310	-0.387*	0.163	0.539**	0.782**	0.592**	0.654**
	معنی‌داری	0.000	0.079	0.026	0.364	0.001	0.000	0.000	0.000

*معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، **معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

بحث

بیشترین مقدار ضریب همبستگی کرامر برای متغیر فاصله از منطقه مسکونی در دوره واسنجی (۰/۳۴) و اعتبارسنجی (۰/۳۶)، نقش انسان در تغییر کاربری اراضی و توسعه مناطق مسکونی را تأیید می‌کند (Nor *et al.*, 2017; Krajewski *et al.*, 2018). فاصله از مرتع نیز با مقدار ۰/۳۵ ضریب کرامر بالایی به خود اختصاص داد که می‌تواند به‌دلیل وسعت مراتع (حدود ۶۲ درصد سطح آبخیز مطالعاتی) و تأثیر آن بر تغییرات کاربری اراضی باشد. کمترین مقدار ضریب مذکور نیز به فاصله از رودخانه با مقدار ۰/۱۷ اختصاص یافت که با نتایج Shooshtari و Gholamalifard (۲۰۱۵)، Kumar و همکاران (۲۰۱۴) و Abuelaish و Olmedo (۲۰۱۶) هم‌خوانی دارد. دلیل این امر را می‌توان به ویژگی‌های منطقه مطالعاتی ازجمله شیب بالای آن نسبت داد. طبیعتاً در فواصل بیش‌تر از رودخانه و مناطق پرشیب پتانسیل تغییر کاربری اراضی کاهش می‌یابد. ارتفاع از سطح دریا با مقدار ضریب کرامر برابر با ۰/۳۳ از اهمیت زیادی در مدل‌سازی انتقال کاربری اراضی برخوردار بود که در مطالعه Kavian و همکاران (۲۰۱۷) نیز بر آن تأکید شده است. افزایش ویلاسازی و توسعه باغات در مناطق کوهستانی شمال البرز، نقش ارتفاع را در تغییرات کاربری توجیه می‌کند.

یافته‌های حاصل از ارزیابی مدل‌سازی توانایی انتقال بیان‌گر عملکرد نسبتاً خوب مدل با میزان صحت ۷۴/۵۳ و ۷۶/۷۱ درصد به‌ترتیب برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ می‌باشد. در همین راستا، میزان صحت در مطالعه Shooshtari و Gholamalifard (۲۰۱۵) در آبخیز نکارود حدود ۸۰ درصد به‌دست آمد. دلیل این اختلاف را شاید بتوان به تفاوت در مساحت آبخیزهای مطالعاتی و در نتیجه نیروهای مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در دو آبخیز نسبت داد. لازم به توضیح است که عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی آبخیز تالار براساس ارزیابی آماری نقشه پیش‌بینی شده کاربری اراضی برای سال ۱۳۹۳ با مقادیر K_{no} و $K_{location}$ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶۴ و ۰/۹۶۹ مشخص شد. مقادیر به‌دست آمده از مقادیر محاسباتی شاخص‌های مذکور در پژوهش‌های Nadoushan و همکاران (۲۰۱۲) در منطقه اراک و Megahed و همکاران (۲۰۱۵) در منطقه Greater Cairo کشور مصر بالاتر است.

براساس نقشه پیش‌بینی شده کاربری اراضی برای سال ۱۴۰۹، مساحت کاربرهای کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی به‌ترتیب با تغییر ۲۱/۰۱، ۱۴/۸۶-، ۵/۶۶-، ۵/۷۶، ۱۹/۸۵-، ۱۳/۶۰ کیلومترمربع به ۶۶/۸۱، ۵۳۱/۲۳، ۲۱/۲۴،

۲۲/۹۳، ۱۰۸۰/۶۶ و ۴۱/۲۳ کیلومترمربع خواهد رسید. در همین ارتباط، کاهش مساحت اراضی جنگلی، کشاورزی آبی و مرتعی و افزایش مساحت اراضی کشاورزی دیم، باغ و منطقه مسکونی بیان‌گر آن است که عامل انسانی در تغییر کاربری اراضی آبخیز تالار نقش به‌سزایی خواهد داشت که لازم است تا تصمیمات لازم در خصوص مدیریت کاربری اراضی با اقدامات مختلف ازجمله حفظ جنگل مانند جنگل‌کاری، حفظ اراضی آبی و همچنین اراضی مرتعی و یا محدود نمودن توسعه کشاورزی دیم در اراضی شیب‌دار و یا ایجاد باغ در اراضی مرتعی بالادست و در نتیجه مدیریت پایدار آبخیز اتخاذ گردد. ساختار سیمای سرزمین تعیین کننده جریان انرژی شامل تشعشع خورشیدی، دما، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، هدررفت خاک و تولید رسوب می‌باشد (Shi *et al.*, 2013). براساس نتایج تحلیل همبستگی پیرسون (جدول ۴) و به‌منظور تبیین اثر الگوی سیمای سرزمین بر خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب، کلیه سنجه‌های منتخب در پژوهش حاضر به‌جز تراکم لکه و تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب ارتباط معنی‌دار دارند. در همین ارتباط، سنجه مساحت لکه حداکثر همبستگی با هر دو خدمت هیدرولوژیک مورد مطالعه را نشان داد. این ضریب برای تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب برابر با ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ به‌دست آمد. تحلیل بیش‌تر یافته‌ها حاکی از ارتباط مستقیم کلیه سنجه‌های مطالعاتی به‌جز شاخص بزرگ‌ترین لکه (دارای ارتباط معکوس) با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش دارد. Shi و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خویش بر ارتباط مستقیم تراکم و مساحت لکه با هدررفت خاک و تولید رسوب اشاره نمودند. وجود ارتباط معکوس سنجه LPI با هدررفت خاک در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌دست آمد.

براساس یافته‌های مندرج در جدول ۴، سنجه تعداد لکه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد ارتباط مستقیم معنی‌دار دارد. شایان ذکر است که طی دوره ۲۵ ساله پژوهش، سنجه تعداد لکه‌ها در راستای کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب از ۱۸۱۷ به ۱۶۲۵ کاهش یافته است. در تحلیل نتیجه به‌دست آمده می‌توان گفت که کاهش تعداد لکه‌های جنگل و مرتع سهم بیش‌تری نسبت به افزایش تعداد لکه‌های سایر کاربری اراضی در کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب را داشته است. کاهش نگهداشت رسوب را نیز می‌توان به کاهش میزان پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل و مرتع در آبخیز مطالعاتی نسبت داد. نتایج سنجه تراکم لکه نیز همانند تعداد لکه حاکی از وجود رابطه مستقیم با خدمات مذکور و مطابق با یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۳) است. در این راستا، سنجه مورد اشاره با ضریب همبستگی ۰/۳۱۰ و سطح معنی‌داری ۰/۰۷۹ از میزان ارتباط کم‌تری با خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه نسبت به سنجه تعداد لکه برخوردار است. بایستی اضافه کرد که اگرچه تعداد لکه ارتباط معنی‌داری با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب نشان داد، اما این امر در بررسی تعداد لکه در واحد سطح با خدمات بوم‌سازگان پیش‌گفته غیرمعنی‌دار بود. دلیل این امر را شاید بتوان به نوع رابطه محاسباتی سنجه تراکم لکه (تعداد لکه در واحد سطح) نسبت داد. یافته‌های پژوهش نشان داد که سنجه بزرگ‌ترین لکه با تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد ارتباط معکوس معنی‌دار دارد. Shi و همکاران (۲۰۱۳) هم در مطالعه خود از شاخص بزرگترین لکه به‌عنوان یکی از سنجه‌های مهم کنترل‌کننده هدررفت خاک و تولید رسوب یاد کردند که با هدررفت خاک و تولید رسوب ارتباط معکوس دارد. بایستی یادآوری شود که بالا بودن شاخص LPI نشان‌دهنده بالا بودن سطح پوشاننده کاربری اراضی خاص در منطقه مطالعاتی می‌باشد. در همین ارتباط، افزایش مقدار نفوذ به‌سبب افزایش زمان تمرکز ناشی از افزایش سنجه LPI در کاربری جنگل منجر به کاهش تولید آب در کاربری مورد اشاره می‌شود. کاهش میزان نگهداشت رسوب در کاربری‌های غالب شامل جنگل،

مرتع و کشاورزی آبی نیز به سبب تخریب و کاهش سطح پوشش گیاهی در منطقه مطالعاتی باعث کاهش میزان نگهداشت رسوب شده است. وجود ارتباط معکوس سنجه LPI با هدررفت خاک در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌دست آمد. علاوه بر این، Boongaling و همکاران (۲۰۱۸) به کاهش میزان رواناب سطحی و تولید رسوب با افزایش شاخص بزرگ‌ترین لکه دست یافتند. رابطه میان LPI و خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در این پژوهش از نوع همبستگی آماری است و بیانگر رابطه علّی مستقیم نیست. با این حال، تفسیر نتایج بر پایه منطق بوم‌شناسی و شواهد پژوهش‌های پیشین انجام شده است که نشان می‌دهند تغییر در اندازه و پیوستگی لکه‌های کاربری اراضی می‌تواند از طریق اثرگذاری بر فرآیندهای فیزیکی مانند نفوذ، رواناب، فرسایش خاک، بر میزان تولید آب و نگهداشت رسوب تأثیر بگذارد. ازاین‌رو، به‌نظر می‌رسد همبستگی مشاهده‌شده بازتابی از سازوکارهای اکوهیدرولوژیکی حاکم بر سیمای سرزمین باشد. میزان طول لبه‌های کاربری‌های اراضی مختلف در واحد سطح نشان دهنده سنجه تراکم لبه می‌باشد (Sertel *et al.*, 2018) که در این پژوهش کمینه میزان ارتباط با خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار را دارد. یافته‌های پژوهش حاکی از عدم وجود ارتباط معنی‌دار تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب است. در همین راستا بایستی اشاره شود که با افزایش میزان تراکم لبه در یک منطقه، مقدار نسبت محیط به مساحت افزایش و در نتیجه میزان نسبی مساحت کاهش می‌یابد. لذا با توجه به رابطه مستقیم مساحت با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش (جدول ۵) و همچنین مساحت با سنجه تراکم لبه، ارتباط مستقیم تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک مورد اشاره هرچند به‌صورت اندک توجیه می‌شود. به‌نظر می‌رسد برآیند کاهش سنجه تراکم لبه در کاربری‌های جنگل و مرتع و افزایش آن در سایر کاربری‌های اراضی اثر یکدیگر را خنثی کرده و سبب عدم وجود ارتباط معنی‌دار آن با تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار شده است. رابطه بین سنجه شاخص شکل سیما و خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی به‌صورت مستقیم بوده و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. بررسی شاخص شکل سیما در کاربری‌های مختلف اراضی حاکی از روند کاهشی در کاربری‌های جنگل و مرتع و روند افزایشی در سایر کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی طی دوره ۲۵ ساله است. در همین ارتباط، به‌نظر می‌رسد تغییرات شاخص شکل سیما در کاربری‌های انسان‌ساخت تأثیر کم‌تری بر وضعیت خدمات هیدرولوژیک نسبت به کاربری‌های جنگل و مرتع در آبخیز مطالعاتی دارد. با توجه به روند کاهشی شاخص شکل سیما در کاربری‌های جنگل و مرتع طی دوره پژوهش و نظر به ارتباط مستقیم شاخص شکل سیما با خدمات هیدرولوژیک پیش‌گفته، میزان تولید آب و نگهداشت رسوب کاهش یافته است. از طرفی، با افزایش میزان شاخص شکل سیما به‌سبب افزایش لبه‌های کاربری‌های اراضی، نسبت محیط به مساحت افزایش می‌یابد. در همین مورد، افزایش شاخص LSI و کاهش مساحت در شرایط یکسان سبب کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب می‌شود. سنجه مساحت لکه بیان‌گر میانگین مساحت لکه‌های موجود در سیمای سرزمین می‌باشد که براساس نتایج پژوهش فعلی بیشینه میزان همبستگی با خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب با ضرایب ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ را در آبخیز تالار دارد. با توجه به ارتباط مستقیم میانگین مساحت لکه با خدمات مذکور و در راستای یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۳)، مقدار میانگین مساحت لکه در آبخیز تالار در کاربری‌های کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، باغ و مرتع روند کاهشی داشته است که موجب کاهش خدمات هیدرولوژیک پیش‌گفته شده است. علاوه بر این، روند تغییر میانگین مساحت لکه در کاربری‌های منطقه مسکونی و جنگل افزایشی بوده است. افزایش سطوح غیرقابل نفوذ در کاربری

منطقه مسکونی منجر به افزایش میزان تولید آب و کاهش میزان نگهداشت رسوب در کاربری مورد اشاره شده است. در کاربری جنگل کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب به سبب کاهش سطح اراضی جنگلی به وقوع پیوسته است. در مجموع و براساس یافته‌های پژوهش فعلی، ارتباط سنجه میانگین مساحت لکه با خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه در سطح سیما مستقیم و معنی‌دار می‌باشد. سنجه دایره محاط که بر اساس رابطه Baker و Cai (۱۹۹۲) محاسبه می‌شود از اندازه لکه تأثیر نمی‌پذیرد. بالا بودن مقدار سنجه AWMCC نشان‌دهنده حالت خطی بودن لکه کاربری اراضی است و حداقل مقدار این سنجه بیان‌گر دایره‌ای بودن آن لکه می‌باشد. بررسی‌های انجام گرفته در خصوص ارتباط سنجه دایره محاط با خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی حاکی از ارتباط مستقیم و معنی‌دار آن‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد می‌باشد. در همین ارتباط، ضریب همبستگی ۰/۶۳۴ و ۰/۶۵۴ به‌ترتیب برای تولید آب و نگهداشت رسوب با سنجه مورد اشاره در آبخیز تالار به‌دست آمد. در تشریح دلایل ارتباط سنجه دایره محاط با خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی می‌توان اظهار داشت که ارتباط آن‌ها به‌سبب استفاده از عامل مساحت در رابطه محاسباتی این سنجه معنی‌دار شده است. بر همین اساس و با توجه به ارتباط مستقیم سنجه AWMCC با خدمات هیدرولوژیک و همچنین روند کاهشی نگهداشت رسوب و تولید آب آبخیز تالار احتمالاً لکه‌های خطی نسبت به لکه‌های دایره‌ای تأثیر بیش‌تری در تأمین خدمات بوم‌سازگان دارند.

بررسی فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار نشان می‌دهد که طی دوره مطالعاتی فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی دیم به‌وقوع پیوسته است. در همین راستا، میزان تولید آب در کشاورزی دیم در آبخیز تالار طی دوره مورد پژوهش (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳) افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کشاورزی دیم ناشی از تخریب جنگل و مرتع در آبخیز تالار مرتبط دانست. افزایش میزان رواناب و رسوب ناشی از تبدیل اراضی جنگل به کشاورزی در سایر مطالعات نیز مورد تایید قرار گرفته است (Abbasi *et al.*, 2017؛ Esmali *et al.*, 2015). بالا بودن میزان تولید رواناب و رسوب در کاربری کشاورزی دیم نسبت به مرتع توسط Ahmadi Iikhchi و همکاران (۲۰۰۳) در منطقه دوراهان استان چهارمحال و بختیاری گزارش شد. بایستی ذکر شود که تبدیل جنگل و مرتع به کشاورزی دیم منجر به کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش تولید آب می‌شود. از طرف دیگر به‌دلیل حذف تاج پوشش گیاهی، اثر ریشه درختان و گیاهان جنگلی و مرتعی و همچنین عملیات‌های خاک‌ورزی و شخم در جهت شیب میزان نفوذ آب کاهش یافته و بر میزان رواناب افزوده می‌شود (Claggett *et al.*, 2013)؛ بنابراین، فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی دیم همراه با افزایش تولید آب در منطقه مطالعاتی مشاهده شده است. در خصوص نگهداشت رسوب نیز اشاره می‌شود که فرآیند ایجاد و در نتیجه افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کاربری کشاورزی دیم باعث کاهش نگهداشت رسوب طی دوره پژوهش شده است. دلیل این امر را می‌توان به شخم و عملیات‌های خاک‌ورزی در جهت شیب دامنه نسبت داد که باعث افزایش پتانسیل انتقال رسوب و در نتیجه کاهش نگهداشت رسوب می‌شود. اگرچه بنا بر گزارش Ferreira و همکاران (۲۰۲۰)، شناخت پویایی رسوب بعد از وقوع تغییرات کاربری اراضی به‌دلیل پیچیدگی و تغییرپذیری مکانی پیچیده است. کاهش تعداد و مساحت لکه‌های جنگلی از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ از دیگر یافته‌های این پژوهش است که منجر به فرآیند تنزل در منطقه شده است. فرآیند تنزل در کاربری جنگل منجر به افزایش سطح کاربری‌های مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و منطقه مسکونی در آبخیز تالار شده است؛ بنابراین، کاهش پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل منجر به کاهش نگهداشت رسوب در آبخیز تالار طی دوره پژوهش شده است. کاهش تولید آب نیز در کاربری جنگل به‌سبب کاهش مساحت برابر با ۷۱/۰۲ کیلومترمربعی آن از سال ۱۳۶۸

تا ۱۳۹۳ می‌باشد. شایان ذکر است که به‌منظور بررسی و تحلیل جامع‌تر نتایج بایستی سهم اثر عوامل مؤثر بر کاهش تولید آب و کاهش نگهداشت رسوب را مدنظر داشت و به عبارت دیگر نمی‌توان تغییرات خدمات هیدرولوژیک آبخیز را تنها به یک عامل خاص ارتباط داد. بلکه بایستی مجموعه‌ای از عوامل دخیل را مرتبط دانست. قابل ذکر است که در ارزیابی مقدار نگهداشت رسوب تأثیر عوامل اقلیمی و خاک و نیز برآیند آن‌ها بیش از اثر کاربری اراضی بوده است. در همین ارتباط، سهم اندک کاربری اراضی در ارزیابی رفتار تولید آب و در نتیجه نگهداشت و تولید رسوب در مطالعات دیگر نیز به‌دست آمده است (Belete *et al.*, 2020). کاربری کشاورزی آبی به‌سبب افزایش تعداد و مساحت لکه‌ها طی دوره پژوهش تحت تأثیر فرآیند ایجاد بوده است. افزایش سطح و تعداد لکه‌های کاربری کشاورزی آبی ناشی از تخریب جنگل و مرتع تولید آب را به‌سبب کاهش پوشش گیاهی و همچنین اجرای عملیات‌های خاک‌ورزی طی دوره پژوهش افزایش داده است. با این توضیحات، فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی آبی سبب افزایش میزان آبدهی شده است. افزایش مقدار خدمت نگهداشت رسوب در کاربری کشاورزی آبی طی دوره پژوهش را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با توجه به کشت غالب برنج و نوع آبیاری غرقابی و همچنین شیب اندک در کاربری اراضی مذکور از پتانسیل انتقال رسوب کاسته شده و میزان نگهداشت رسوب افزایش می‌یابد. علاوه بر این رشد گونه‌های زراعی خود سبب افزایش میزان نگهداشت رسوب در اراضی کشاورزی آبی می‌شود. تخریب کاربری‌های مرتع، کشاورزی آبی و جنگل منجر به فرآیند ایجاد و در نتیجه افزایش تعداد و مساحت لکه‌ها در کاربری باغ طی دوره پژوهش (۱۳۶۸-۱۳۹۳) در آبخیز مطالعاتی شده است. در همین ارتباط، فرآیند ایجاد در کاربری باغ سبب افزایش میزان آبدهی در آبخیز تالار شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش نفوذ و نهایتاً افزایش آبدهی در خلال تغییرات کاربری اراضی به وقوع پیوسته در آبخیز مطالعاتی نسبت داد. در این نوع از کاربری اراضی به‌دلیل افزایش سطح و همچنین رشد درختان باغی و نیز استفاده از گیاهان پوششی هم‌چون یونجه در کف اراضی باغی منجر به بیش‌تر شدن تراکم پوشش و در نتیجه افزایش میزان نگهداشت رسوب شده است. علی‌رغم کم‌تر بودن سطح باغ نسبت به کشاورزی آبی در منطقه، میزان نگهداشت رسوب در باغ بیش‌تر از کاربری کشاورزی آبی می‌باشد که دلیل این امر را شاید بتوان به بالا بودن تراکم پوشش گیاهی و نقش آن در کاهش اثر عامل فرسایندگی باران و همچنین دست‌خوردگی‌های نسبی کم‌تر در کاربری اراضی مذکور نسبت داد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مساحت کاربری مرتع طی دوره ۲۵ ساله پژوهش افزایش اندکی داشته است (حدود دو کیلومترمربع)، لکن کاربری مرتع بیشینه مقدار تبادلات و تغییرات بین کاربری‌های اراضی مختلف را به خود اختصاص داده است. در همین ارتباط، بیشینه تغییر سطح کاربری مرتع ناشی از کاهش سطح کاربری جنگل و افزایش سطح سایر کاربری‌های اراضی در آبخیز تالار طی دوره پژوهش می‌باشد. در مجموع، کاربری مرتع طی دوره مطالعاتی به سبب کاهش تعداد لکه و افزایش اندک مساحت لکه تحت پوشش فرآیند تجمع بوده است. بایستی اشاره شود که فرآیند تجمع در کاربری مرتع منجر به کاهش میزان تولید آب و نگهداشت رسوب در کاربری مذکور شده است. دلیل این امر با توجه تغییر ثبات تقریبی مساحت و افزایش تعداد لکه را می‌توان به نقش آرایش مکانی لکه‌های کاربری مرتع در آبخیز تالار مرتبط دانست. کاربری منطقه مسکونی در آبخیز تالار تحت تأثیر فرآیند ایجاد طی دوره پژوهش بوده است. در همین ارتباط، تخریب کاربری‌های مرتع، کشاورزی دیم و جنگل در منطقه پژوهش منجر به افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کاربری منطقه مسکونی شده است. بایستی ذکر شود که افزایش سطوح با نفوذپذیری کم و یا غیرقابل نفوذ در کاربری موردنظر و مطابق با

یافته‌های Zare و همکاران (۲۰۱۶) باعث افزایش خدمت هیدرولوژیک تولید آب در آبخیز تالار از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ شده است. در خصوص نگهداشت رسوب در این نوع از کاربری اراضی نیز بایستی ذکر شود که افزایش سطوح با نفوذپذیری کم و یا غیرقابل نفوذ از طریق احداث واحدهای مسکونی و همچنین اجرای عملیات‌های زیرسازی، احداث جوی و شبکه فاضلاب منجر به افزایش میزان نگهداشت رسوب در کاربری منطقه مسکونی علی‌رغم افزایش میزان تولید آب می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در آبخیز تالار، شامل تولید آب و نگهداشت رسوب، در شرایط تداوم روند فعلی تغییرات کاربری اراضی انجام شده است. در این راستا، با استفاده از مدل‌های LCM و InVEST و تحلیل سیمای سرزمین، ارتباط میان تغییرات کاربری و خدمات بوم‌سازگان به‌صورت آماری و مکانی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند کنونی، جنگل‌ها کاهش و کاربری‌های کشاورزی و مسکونی افزایش یافته که این تغییرات منجر به کاهش عملکرد خدمات هیدرولوژیک می‌شود. شاخص‌هایی مانند مساحت لکه، تعداد لکه و شاخص بزرگترین لکه بیش‌ترین همبستگی را با تغییرات تولید آب و نگهداشت رسوب دارند. بررسی فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین به‌عنوان عاملی کلیدی در تحلیل کاربری اراضی و عملکرد بوم‌سازگان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا ساختار و توزیع لکه‌های کاربری تأثیر مستقیم بر خدمات هیدرولوژیکی دارند (Lei *et al.*, 2021). شناخت دقیق این فرآیندها به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد مدیریت پایدار و مبتنی بر شواهد علمی را به‌ویژه در مناطق حساس بهبود بخشند. کاربردهای عملی پژوهش شامل اولویت‌بندی مناطق بحرانی برای حفاظت منابع آب و خاک، برنامه‌ریزی کاهش فرسایش، طراحی کمربندهای حفاظتی و اصلاح الگوهای کاربری است. در سطح سیاست‌گذاری، پیشنهاد می‌شود مناطق با بیشترین خطر کاهش خدمات بوم‌سازگان به‌عنوان اولویت حفاظتی تعیین شوند و نتایج در طرح‌های مدیریت جامع آبخیز و توسعه کاربری اراضی با رویکرد بوم‌شناسی ادغام گردد. همچنین، آموزش جوامع محلی درباره اهمیت پوشش گیاهی طبیعی و پیامدهای تغییر کاربری می‌تواند مشارکت آنها را افزایش دهد. از منظر پژوهشی، انجام مطالعات مقایسه‌ای در آبخیزهای مجاور، بررسی همزمان تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری، و ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های سنجش از دور و مدل‌های هیدرولوژیک، به افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و توسعه ابزارهای تصمیم‌سازی کمک می‌کند. با توجه به نتایج، تداوم روند فعلی تغییر کاربری به کاهش تولید آب، نگهداشت رسوب و تاب‌آوری حوزه آبخیز تالار منجر خواهد شد. این امر لزوم بازنگری در سیاست‌های توسعه کشاورزی و توقف تخریب جنگل‌ها را آشکار می‌سازد. از محدودیت‌های پژوهش، عدم بررسی جامع تأثیرات تغییرات اقلیمی و استفاده از پارامترهای پیش‌فرض بود. برای مطالعات آینده، بررسی اثرات ترکیبی تغییرات اقلیم و کاربری اراضی با مدل‌های دقیق‌تر پیشنهاد می‌گردد. در نهایت، این مطالعه تصویری جامع از وضعیت گذشته، حال و آینده خدمات هیدرولوژیک آبخیز تالار ارائه می‌دهد و تأکید می‌کند که تداوم روند فعلی توسعه نامتوازن، عملکرد طبیعی بوم‌سازگان را تضعیف می‌کند. این پژوهش، گامی مؤثر در درک بهتر تعامل انسان و محیط‌زیست و ارتقای مدیریت پایدار منابع طبیعی به شمار می‌رود.

References

Abbasi, M., Najafinejad, A., Sheikh, V.B., & Azim Mohseni, M. (2017). Investigating Land Use and Slope Effects on Soil Properties, Runoff and Sediment Using Rainfall Simulator Case Study of Kechik Watershed in Golestan Province.

Environmental Erosion Research, 6 (4), 104-124. (In Persian)

Abdolalizadeh, Z., Ebrahimi, A., & Mostafazadeh, R. (2019). Landscape pattern change in Marakan protected area, Iran. *Regional Environmental Change*, 19(6), 1683-1699. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01504-9

Abuelaish, B., & Olmedo, M. T. C. (2016). Scenario of land use and land cover change in the Gaza Strip using remote sensing and GIS models. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 274. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2292-7

Ahmadi Iikhchi, A., Hajabbassi, M.A., & Jalalian, A. (2003). Effects of Converting Range to Dry-farming Land on Runoff and Soil Loss and Quality in Dorahan, Chaharmahal & Bakhtiari Province. *Journal of Crop Production and Processing*; 6(4):103-115. (In Persian)

Alaei, N., Mohammadzadeh, F., Mostafazadeh, R., & Talebi Khiavi, H. (2024). Assessing spatiotemporal urban green space per capita and its connectivity in a small size city in Northwest Iran. *GeoJournal*, 89(4), 148. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11159-7

Alizadeh, A. (2015). *Principles of applied hydrology* (40th ed.). Mashhad: Imam Reza University Press. (In Persian)

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage* paper No. 56. Rome: food and agriculture organization of the United Nations, 56(97), e156. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Amini Parsa, V., Istanbuly, M. N., Kronenberg, J., Russo, A., & Jabbarian Amiri, B. (2024). Urban trees and hydrological ecosystem service: a novel approach to analyzing the relationship between landscape structure and runoff reduction. *Environmental Management*, 73(1), 243-258. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01868-z

Anagonou, S. P. G., Ewemoje, T. A., Toyi, S. S. M., & Olubode, O. S. (2023). Landscape ecological risk assessment and transformation processes in the Guinean-Congolese climate zone in Benin Republic. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, 100985. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100985

Baker, W.L., & Cai, Y. (1992). The r. le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape ecology*, 7(4), 291-302. https://doi.org/10.1007/BF00131258

Belete, M., Deng, J., Abubakar, G. A., Teshome, M., Wang, K., Woldetsadik, M., Zhu, E., Comber, A., & Gudo, A. (2020). Partitioning the impacts of land use/land cover change and climate variability on water supply over the source region of the Blue Nile Basin. *Land Degradation & Development*, 31(15), 2168-2184. https://doi.org/10.1002/ldr.3589

Bogaert, J., Ceulemans, R., & Salvador-Van Eysenrode, D. (2004). Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental management*, 33(1), 62-73. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0027-0

Bogdan, S. M., Pătru-Stupariu, I., & Zaharia, L. (2016). The assessment of regulatory ecosystem services: the case of the sediment retention service in a mountain landscape in the Southern Romanian Carpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 12-27. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.008

Boongaling, C.G.K., Faustino-Eslava, D.V., & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land use policy*, 72, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.042

Cabral, P., Feger, C., Levrel, H., Chambolle, M., & Basque, D. (2016). Assessing the impact of land-cover changes on ecosystem services: A first step toward integrative planning in Bordeaux, France. *Ecosystem Services*, 22, 318-327. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.08.005

Chen, W., Chi, G., & Li, J. (2019). The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015. *Science of the Total Environment*, 669, 459-470.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.139

Claggett, P. R., Irani, F. M., & Thompson, R. L. (2013). Estimating the extent of impervious surfaces and turf grass across large regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(5), 1057-1077. https://doi.org/10.1111/jawr.12110

DNRWM Mazandaran. (2001). Comprehensive detailed-executive study of the Talar watershed. Department of Natural Resources and Watershed Management of Mazandaran Province (In Persian)

Eshghizadeh, M., & Mohammadpoor, M. (2025). An intelligent method to identify land use changes in an urban watershed in Iran. *GeoJournal*, 90(1), 32. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11254-9

Esmali, A., Kavian, A., Jafarian, Z., & Kavianpoor, A.H. (2015). Effect of vegetation covers on decreasing runoff and soil loss using rainfall simulation in Nesho rangeland, Mazandaran province. *Geography and Environmental Planning*, 26(2), 179-190. (In Persian)

Ferreira, C.S.S., Walsh, R.P.D., Kalantari, Z., & Ferreira, A. J. D. (2020). Impact of land-use changes on spatiotemporal suspended sediment dynamics within a peri-urban catchment. *Water*, 12(3), 665. https://doi.org/10.3390/w12030665

Fu, Q., Li, B., Hou, Y., Bi, X., & Zhang, X. (2017). Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total Environment*, 607, 633-646. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.241

Guo, S., Wu, C., Wang, Y., Qiu, G., Zhu, D., Niu, Q., & Qin, L. (2022). Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China. *Ecological Indicators*, 136, 108603. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108603

Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., & Ghaderpour, R. (2019). Investigation of in the Capita Water Consumption Variation in Iran Based on the Past Two-Deca Diet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 77-87. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.246084.667795 (In Persian)

Jafarpour Ghalehteimouri, K., Shamsoddini, A., Mousavi, M.N., Ros, F.B.C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019–2049) Zarriné-Rūd River Basin in Iran. *Environmental Challenges*, 6, 100399. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399

Jahanishakib, F., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, S.H., & Poodat, F. (2021). Hydrological connectivity assessment of landscape ecological network to mitigate development impacts. *Journal of Environmental Management*, 296, 113169. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113169

Kavian, A., Golshan, M., & Abdollahi, Z. (2017). Flow discharge simulation based on land use change predictions. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 588. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6906-0

Khademalrasoul, A., & Amerikhah, H. (2021). Assessment of soil erosion patterns using RUSLE model and GIS tools (case study: the border of Khuzestan and Chaharmahal Province, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 885-895. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00931-6

Khorsand, M., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2016). Comparison between estimated annual soil lossusing RUSLE model with data from the erosion pins and plots in Khamsan representative watershed. *Journal of Ecohydrology*, 3(4), 669-680. https://doi.org/10.22059/ije.2016.60376 (In Persian)

Krajewski, P., Solecka, I., & Mrozik, K. (2018). Forest landscape change and preliminary study on its driving forces in Ślęża Landscape Park (Southwestern Poland) in 1883–2013. *Sustainability*, 10(12), 4526. https://doi.org/10.3390/su10124526

Kumar, S., Radhakrishnan, N., & Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5(2), 145-156.

https://doi.org/10.1080/19475705.2013.795502

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. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 101, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003

Lausch, A., Blaschke, T., Haase, D., Herzog, F., Syrbe, R. U., Tischendorf, L., & Walz, U. (2015). Understanding and quantifying landscape structure–A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, 295, 31-41. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018

Lei, J. C., Wang, S., Wu, J., Wang, J. W., & Xiong, X. (2021). Land-use configuration has significant impacts on water-related ecosystem services. *Ecological Engineering*, 160, 106133. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106133

Li, S., & Yang, B. (2015). Introducing a new method for assessing spatially explicit processes of landscape fragmentation. *Ecological Indicators*, 56, 116-124. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.031

Li, J., Zhou, K., Xie, B., & Xiao, J. (2021). Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 133, 108372. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108372

Liang, Y., He, Y., & Liu, L. (2024). Integrated assessment of land-use management effects on ecosystem services under climate-adaptive scenarios in the Loess Plateau region of China. *GeoJournal*, 89(5), 195. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11201-8

Liu, J., Zhou, Y., Wang, L., Zuo, Q., Li, Q., & He, N. (2023). Spatiotemporal Analysis and Multi-Scenario Prediction of Ecosystem Services Based on Land Use/Cover Change in a Mountain-Watershed Region, China. *Remote Sensing*, 15(11), 2759. https://doi.org/10.3390/rs15112759

Liu, Y., Huang, X., & Liu, Y. (2024). Detection of long-term land use and ecosystem services dynamics in the Loess Hilly-Gully region based on artificial intelligence and multiple models. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141560. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141560

Loc, H. H., Thanavanh, T., Nguyet, D. A., Upadhyay, S., Maung, T. M., Shrestha, S., Park, E., & Hamel, P. (2024). Understanding the impacts of land use changes on the sustainability of hydrological ecosystem services: the case of Pasak River Basin, Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05824-7

Marchioni, M., Raimondi, F., Becciu, G., & Dresti, C. (2025). Nature-based solutions for watershed management: An investigation on water-related ecosystem services delivery at multiple spatial scales. *Ecosystem Services*, 73, 101718. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101718

McGarigal, K. (2015). *FRAGSTATS help*. University of Massachusetts: Amherst, MA, USA, 182.

Megahed, Y., Cabral, P., Silva, J., & Caetano, M. (2015). Land cover mapping analysis and urban growth modelling using remote sensing techniques in Greater Cairo Region—Egypt. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3), 1750-1769. https://doi.org/10.3390/ijgi4031750

Mohammadi, M., Kavian, A., & Gholami, L. (2017). Simulation of discharge and nitrate in Tallar Basin using SWAT model. *Jorunal of Watershed Management Researc*h, 8(15), 45-60. http://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.45 (In Persian)

Nadoushan, M.A., Soffianian, A., & Alebrahim, A. (2012). Predicting urban expansion in Arak Metropolitan Area using two land change models. *World Applied Sciences Journal*, 18, 1124-1132. http://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.08.1217

Naseri, N., & Mostafazadeh, R. (2023). Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification.

Earth Science Informatics, 16(4), 3797-3810. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01119-z

Nor, A. N. M., Corstanje, R., Harris, J. A., & Brewer, T. (2017). Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecological Indicators*, 81, 274-284. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031

Pratt, B., & Chang, H. (2012). Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of hazardous materials*, 209, 48-58. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.068

Qiao, X., Li, Z., Lin, J., Wang, H., Zheng, S., & Yang, S. (2024). Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 298-312. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001

Qiu, L., Chang, Z., Luo, X., Chen, S., Jiang, J., & Lei, L. (2025). Monitoring Forest Disturbances and Associated Driving Forces in Guangdong Province Using Long-Term Landsat Time Series Images. *Forests*, 16(1), 189. https://doi.org/10.3390/f16010189

Rahmannejad, F., Amiri, M.J., Nohegar, A., & Nabi Bidhendi, G. (2024). Evaluation and analysis of land use changes and their impacts on habitat quality (Case study: Talar Watershed, Mazandaran Province). *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(2), 1-17. (In Persian)

Rostami, N., & Rabbani, M. (2023). Zoning of soil erodibility and determination of affecting factors (Case study: Golan watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 3(3), 1-15. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2004738.1084 (In Persian)

Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data–sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 646, 573-586. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347

Salmoral, G., Willaarts, B.A., Troch, P.A., & Garrido, A. (2015). Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. *Science of the total environment*, 503, 258-268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.041

Sertel, E., Topaloğlu, R. H., Şallı, B., Yay Algan, I., & Aksu, G.A. (2018). Comparison of landscape metrics for three different level land cover/land use maps. ISPRS International *Journal of Geo-Information*, 7(10), 408. https://doi.org/10.3390/ijgi7100408

Seto, K. C., & Fragkias, M. (2005). Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecology*, 20(7), 871-888. https://doi.org/10.1007/s10980-005-5238-8

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D and Douglass, J. (2018). *InVEST 3.5.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota*. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, 498, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.031

Shooshtari, S.J., & Gholamalifard, M. (2015). Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1, 1-19. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.05.001

Stephens, C. M., Lall, U., Johnson, F. M., & Marshall, L. A. (2021). Landscape changes

and their hydrologic effects: Interactions and feedbacks across scales. *Earth-Science Reviews*, 212, 103466. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103466

Tang, X., Zhuo, M., Zhou, M., Guo, S., Gong, C., Wang, J., & Yang, H. (2025). Spatiotemporal Response Relationships Between Changes in Water Conservation Service and Landscape Pattern in Zoige Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 36(5), 1641-1655. https://doi.org/10.1002/ldr.5453

Tavangar, S., Moradi, H., Massah Bavani, A., & Gholamalifard, M. (2021). A futuristic survey of the effects of LU/LC change on stream flow by CA–Markov model: A case of the Nekarood watershed, Iran. *Geocarto International*, 36(10), 1100-1116. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1633419

Wei, P., Chen, S., Wu, M., Deng, Y., Xu, H., Jia, Y., & Liu, F. (2021). Using the InVEST model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin. *Water*, 13(9), 1250. https://doi.org/10.3390/w13091250

Zabihi, M., Moradi, H., Gholamalifard, M., Khaledi Darvishan, A., & Fürst, C. (2020). Landscape management through change processes monitoring in Iran. *Sustainability*, 12(5), 1753. https://doi.org/10.3390/su12051753

Zare, M., Samani, A. A.N., & Mohammady, M. (2016). The impact of land use change on runoff generation in an urbanizing watershed in the north of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(18), 1279. https://doi.org/10.1007/s12665-016-6058-7

Zhang, M., Chen, E., Zhang, C., Liu, C., & Li, J. (2024). Multi-scenario simulation of land use change and ecosystem service value based on the markov–FLUS model in Ezhou city, China. *Sustainability*, 16(14), 6237. https://doi.org/10.3390/su16146237

Zhang, S., Fan, W., Li, Y., & Yi, Y. (2017). The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 574, 34-45. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024

Zhang, Y., Bi, Z., Zhang, X., & Yu, Y. (2019). Influence of landscape pattern changes on runoff and sediment in the Dali River watershed on the Loess Plateau of China. *Land*, 8(12), 180. https://doi.org/10.3390/land8120180

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 73-94 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2068029.1245 **Online ISSN: 2783-4581**

Farmers' Adaptation to Climate Change in Iran: A Bibliometric Analysis Based on International Sources

Saeid Barkhori*

Department of Rangeland and Watershed manegemet, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran

*Corresponding author Email: barkhoris@gmail.com

(Received: 05 August 2025 Revised: 22 September 2025 Accepted: 15 December 2025)

Extended Abstract

Introduction: Climate change stands as one of the most critical environmental challenges of the 21st century, with profound implications for natural resources and the agricultural sector. It disrupts established climate patterns, directly threatening water sustainability, soil fertility, and the ecological cycles that underpin agricultural production. Globally, rising temperatures, shifting precipitation regimes, prolonged droughts, and the increased frequency of extreme weather events like floods and heatwaves jeopardize agricultural yields. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global temperatures have already increased by approximately 1.1°C since pre-industrial times and could exceed 4°C by the century's end if current trends continue. Such changes are projected to reduce yields of staple crops such as wheat, rice, and maize by 10 to 25 percent in some regions by 2050, with disproportionate impacts on developing nations reliant on subsistence farming. Iran, with its predominantly arid and semi-arid climate, is highly vulnerable. The country faces reduced precipitation, rising temperatures, recurrent droughts, and the depletion of surface and groundwater resources. These climatic stressors endanger agricultural productivity, rural livelihoods, and national food security, presenting multidimensional environmental, economic, and social challenges. This study employs a systematic bibliometric analysis to map and evaluate the international scientific literature on Iranian farmers' adaptation to climate change, addressing key quantitative, qualitative, conceptual, and geographic research questions.

Materials and methods: This research utilizes a systematic bibliometric analysis to map and evaluate the international scientific literature concerning Iranian farmers' adaptation to climate change. The focus on internationally indexed sources ensures methodological rigor and global scientific representation. A two-stage systematic search was conducted to identify relevant publications. First, a general search combining terms for adaptation, climate change, and Iran yielded 384 documents, including research articles, reviews, conference proceedings, and books. Second, a refined search incorporating agriculture and farmer-specific terms narrowed the corpus to 140 publications. The bibliographic data from these publications were imported into VOS viewer software for quantitative analysis. Techniques such as co-authorship and keyword co-occurrence analysis were applied to uncover collaboration networks, identify prolific authors and countries, and trace thematic trends and conceptual evolution. This quantitative bibliometric approach provides a data-driven overview of the research landscape, revealing knowledge gaps, methodological tendencies, and priority topics within this critical domain.

Results and Discussion: The findings indicate that scientific production on Iranian farmers' climate adaptation has followed a steadily increasing trend, with international collaborations enhancing both methodological quality and policy relevance. Thematically, most studies have focused on individual and socio-economic factors, vulnerability assessments, and behavioral models, although a significant portion (25%) lacked a clear theoretical framework. Geographically, research has been concentrated in agriculturally intensive and climate-vulnerable provinces such as Khuzestan, Fars, and Azerbaijan. The analysis identified a wide range of adaptive behaviors among farmers, including adjustments to planting dates, the adoption of drought-resistant seeds, improved water management practices (e.g., drip irrigation, rainwater harvesting), the use of innovative technologies like precision agriculture, engagement with economic mechanisms such as crop insurance, participation in educational interventions via extension services, and responses influenced by psychosocial factors like risk perception and self-efficacy.

Conclusion: This bibliometric analysis provides a comprehensive, data-driven overview of international research on Iranian farmers' adaptation to climate change, illuminating publication trends, key contributors, collaborative networks, dominant themes, and geographic focus areas. The findings highlight the multifaceted nature of adaptation, underscoring the necessity of integrating social, economic, and environmental factors while also pointing to a need for more robust theoretical frameworks to guide future empirical work. The study reveals significant regional research disparities, advocating for targeted investigations in understudied provinces. Furthermore, the results emphasize the critical role of international cooperation in elevating research quality and policy relevance. These insights can inform strategic planning for climate adaptation policies tailored to Iran's diverse agro-ecological contexts, ultimately supporting resilient agricultural development in the face of ongoing climatic shifts.

Keywords: Adaptive strategies, Vulnerability, Socio-economic factors, Behavioral models, Climate resilience

CitationBarkhori, S. (2026). Farmers' Adaptation to Climate Change in Iran: A Bibliometric Analysis Based on International Sources. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 73-94. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2068029.1245

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۹۴-۷۳) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2068029.1245

سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران: تحلیلی کتاب‌سنجی بر پایه منابع بین‌المللی

سعید برخوری*

گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

***نویسنده مسئول:** barkhoris98@gmail.com

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۶/۳۱ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۹/۲۴)

چکیده مبسوط

مقدمه: تغییر اقلیم یکی از مهمترین تهدیدهای زیست‌محیطی قرن بیست و یکم محسوب می‌شود که تأثیرات عمیقی بر منابع طبیعی و به‌ویژه بخش کشاورزی دارد. این پدیده با تغییر الگوهای اقلیمی، مستقیماً بر پایداری منابع آبی، حاصلخیزی خاک و چرخه‌های بوم‌شناختی که برای تولید کشاورزی حیاتی هستند، اثر می‌گذارد. در سطح جهانی، افزایش میانگین دمای هوا، تغییر در الگوهای بارندگی، تداوم دوره‌های خشکسالی، کاهش ذخایر آب و افزایش دفعات و شدت حوادث حدی نظیر سیل و موج‌های گرما، موجب تهدید بازده محصولات کشاورزی شده‌اند. بر اساس گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، دمای جهانی از زمان پیش از صنعتی شدن تاکنون حدود ۱/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش‌یافته است و اگر روند کنونی ادامه یابد، ممکن است تا پایان قرن از ۴ درجه سانتی‌گراد فراتر رود. این تغییرات می‌تواند بازده محصولات اساسی مانند گندم، برنج و ذرت را تا سال ۲۰۵۰ در برخی مناطق بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کاهش دهد. این مسئله به‌ویژه کشورهایی را که به کشاورزی معیشتی وابسته‌اند، به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. ایران که عمدتاً دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، به‌شدت در برابر این تأثیرات آسیب‌پذیر است؛ چرا که کاهش بارندگی، افزایش دما، خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی را تجربه می‌کند. این فشارهای اقلیمی تولید کشاورزی، معیشت روستایی و امنیت غذایی ملی را تهدید می‌کند و درنتیجه چالش‌هایی چندبعدی در زمینه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و امنیتی برای کشور به وجود می‌آورد. مطالعه حاضر با رویکردی نظام‌مند به بررسی ادبیات علمی انتشار یافته در مجلات بین‌المللی درباره سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم می‌پردازد و مجموعه‌ای از پرسش‌های کلیدی تحقیق را در ابعاد کمی، کیفی، مفهومی و جغرافیایی بررسی می‌کند.

مواد و روش‌ها: این مطالعه از روش تحلیل کتاب‌سنجی نظام‌مند برای ترسیم و ارزیابی ادبیات علمی بین‌المللی مربوط به سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم بهره گرفته است. تمرکز بر منابع نمایه شده بین‌المللی، تضمین‌کننده دقت علمی و بازنمایی جهانی است. فرآیند جست‌وجو در دو مرحله انجام شد. ابتدا با ترکیب کلیدواژه‌های مرتبط با «سازگاری»، «تغییر اقلیم» و «ایران» در ۳۸۴ سند شامل مقاله‌های پژوهشی، مروری و کنفرانسی، یادداشت‌های تخصصی و کتاب‌های تخصصی شناسایی شد. در مرحله دوم، جست‌وجو با افزودن واژه‌های «کشاورزی» و «کشاورزان» محدودتر شد و در نهایت ۱۴۰ سند انتخاب گردید. داده‌های استخراج شده از پایگاه داده اسکوپوس برای انجام کتاب‌شناختی به نرم‌افزار *VOSviewer* وارد شد تا تحلیل محتوای کمی شامل هم‌نویسندگی و هم‌رخدادی واژگان کلیدی انجام گیرد. این تحلیل به شناسایی شبکه‌های همکاری، نویسندگان و کشورهای پرکار، روندهای موضوعی و تکامل مفهومی کمک کرد. روش کتاب‌سنجی کمی با تحلیل محتوا ترکیب شد تا نمایی جامع از چشم‌انداز پژوهش‌ها، شکاف‌های دانشی، روندهای روش‌شناختی و موضوعات اولویت‌دار در این حوزه حیاتی ارائه شود.

نتایج و بحث: یافته‌ها نشان داد تولید علمی در زمینه سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم روندی افزایشی داشته و همکاری‌های بین‌المللی کیفیت روش‌شناسی و ارتباط با سیاست‌گذاری در این حوزه را ارتقا داده است. بیشتر مطالعات انجام شده بر عوامل فردی و اجتماعی–اقتصادی، آسیب‌پذیری و مدل‌های رفتاری متمرکز بوده‌اند، هرچند ۲۵ درصد آن‌ها فاقد چارچوب نظری مشخص‌اند. از نظر جغرافیایی نیز تمرکز بر استان‌های کشاورزی‌محور و آسیب‌پذیر مانند خوزستان، فارس و آذربایجان بوده است. همچنین، رفتارهای سازگاری کشاورزان شامل اقداماتی مانند تغییر تاریخ کاشت و بذرهای مقاوم، مدیریت منابع آب (آبیاری قطره‌ای، جمع‌آوری آب باران)، فناوری‌های نوین (کشاورزی دقیق)، سازوکارهای اقتصادی (بیمه و حمایت مالی)، مداخلات آموزشی (ترویج کشاورزی) و عوامل روان‌شناختی–اجتماعی (ادراک ریسک و خودکارآمدی) بوده است.

نتیجه‌گیری: این تحلیل کتاب‌سنجی، تصویری جامع و مبتنی بر داده از پژوهش‌های بین‌المللی درباره سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم ارائه می‌دهد و روندهای انتشاراتی، پژوهشگران کلیدی، شبکه‌های همکاری، موضوعات غالب و مناطق جغرافیایی متمرکز را روشن می‌سازد. یافته‌ها به ماهیت چندوجهی سازگاری اشاره دارند و اهمیت ادغام عوامل اجتماعی، اقتصادی و محیطی در پژوهش‌ها را یادآور می‌شوند. همچنین، نابرابری منطقه‌ای در پژوهش‌ها آشکار است و انجام مطالعات هدفمند در استان‌های کمتر مطالعه‌شده توصیه می‌گردد. علاوه بر این، نتایج این مطالعه بر نقش حیاتی همکاری‌های بین‌المللی در ارتقای کیفیت علمی و کاربردی بودن پژوهش‌ها برای سیاست‌گذاری تأکید می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود برنامه‌ریزی راهبردی در زمینه سیاست‌های سازگاری اقلیمی متناسب با شرایط اکولوژیکی متنوع ایران کمک کرده و توسعه پایدار کشاورزی را در برابر تغییرات اقلیمی در حال وقوع تقویت نمایند.

واژه‌های کلیدی: راهبردهای سازگاری، آسیب‌پذیری، عوامل اجتماعی–اقتصادی، مدل‌های رفتاری، تاب‌آوری اقلیمی

استناد: برخوری، س. (۱۴۰۵). سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران: تحلیلی کتاب‌سنجی بر پایه منابع بین‌المللی. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۹۴-۷۳. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2068029.1245

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

برخوری

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از اساسی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود که پیامدهای گسترده‌ای بر منابع طبیعی، به‌ویژه بخش کشاورزی، بر جای گذاشته است. این پدیده نه‌تنها الگوهای اقلیمی را دگرگون کرده، بلکه پایداری منابع آب، حاصلخیزی خاک و چرخه‌های بوم‌شناختی حیاتی برای تولیدات کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار داده است. افزایش میانگین دما، تغییر الگوی بارش، گسترش دوره‌های خشکسالی، کاهش ذخایر آبی و افزایش شدت و فراوانی پدیده‌های حدی مانند سیلاب‌ها و امواج گرمایی ازجمله اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییرات اقلیمی بر تولیدات کشاورزی در مقیاس جهانی است (Shaffril *et al.*, 2018; Malhi *et al.*, 2021). بر اساس گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم[1] (IPCC)، دمای کره زمین از دوران قبل از انقلاب صنعتی تاکنون حدود ۱/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش‌یافته و در صورت تداوم روند فعلی تا پایان قرن ممکن است به بیش از ۴ درجه برسد (IPCC, 2021). همچنین پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۵۰ عملکرد محصولات کشاورزی کلیدی نظیر گندم، برنج و ذرت ممکن است در برخی مناطق جهان بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کاهش یابد (IPCC, 2001). این کاهش عملکرد به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه که اقتصاد آن‌ها به‌شدت به کشاورزی معیشتی وابسته است، می‌تواند منجر به بروز بحران‌های اقتصادی، ناامنی غذایی، افزایش فقر روستایی و مهاجرت‌های اقلیمی گسترده منجر شود (Mendelsohn, 2009). ازاین‌رو، کشاورزی در سطح جهانی نه‌تنها یک قربانی مستقیم تغییرات اقلیم محسوب می‌شود، بلکه به یکی از حوزه‌های بحرانی در مسیر دستیابی به امنیت غذایی و توسعه پایدار بدل شده است (Kurukulasuriya & Rosenthal, 2003).

ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک، ازجمله کشورهایی است که به‌شدت در معرض اثرات منفی تغییرات اقلیمی قرار دارد. کاهش میانگین بارندگی سالانه، افزایش دمای هوا، گسترش پدیده‌های حدی مانند خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی از مهمترین نشانه‌های تغییرات اقلیمی در ایران هستند که به‌طور مستقیم و غیر مستقیم تولیدات کشاورزی کشور را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Amiri & Eslamian, 2010). مطالعات نشان می‌دهد که طی دهه‌های اخیر، ارزش‌افزوده بخش کشاورزی ایران در اثر تغییرات اقلیمی کاهش‌یافته و بهره‌وری منابع تولید به‌ویژه آب‌وخاک با اختلال مواجه شده است. در مطالعه Malakootikhah و Farajzadeh (۲۰۲۰) تأثیر منفی افزایش دما بر کاهش بیش از ۵ درصدی ارزش افزوده بخش کشاورزی در بلندمدت مشاهده شده است. همچنین بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی اقتصادی، تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر تولید محصولات کشاورزی استراتژیک و افزایش واردات این محصولات در آینده نزدیک شود (Khaleghi *et al.*, 2015). این تغییرات به‌ویژه در حوضه‌های حساس که منابع آبی آن تحت فشار شدید قرار دارند، موجب افزایش تنش‌های اجتماعی، ایجاد نزاع عمومی برای کسب منابع و تهدید معیشت کشاورزان شده‌اند (Naderi *et al.*, 2024). بنابراین، تغییر اقلیم در ایران نه‌تنها یک تهدید محیطی‌زیستی، بلکه یک چالش چندبعدی اقتصادی، اجتماعی و امنیتی در حوزه کشاورزی محسوب می‌شود.

در واکنش به اثرات فزاینده تغییرات اقلیمی، سازگاری به‌عنوان یک سازوکار کلیدی در کاهش آسیب‌پذیری کشاورزان موردتوجه بسیاری از پژوهشگران قرارگرفته است. کشاورزان، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، اغلب با محدودیت‌هایی نظیر کمبود منابع، دانش فنی

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

ناکافی یا ضعف در دسترسی به خدمات پشتیبانی مواجه هستند و همین امر سازگاری آن‌ها را پیچیده‌تر می‌سازد (Below *et al*., 2012). در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی رفتارها، عوامل مؤثر و راهبردهای سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند (Keshavarz *et al*., 2014; Keshavarz & Karami, 2016; Karimi *et al*., 2018; Shaffril *et al*., 2018; Azadi *et al*., 2019; Savari & Shokati Amghani, 2021; Delfiyan *et al*., 2021; Kheiri *et al*., 2024; Dargahi Maraghe & Keshavarz, 2025). به عنوان نمونه، Keshavarz و Karami (۲۰۱۶) با استفاده از نظریه انگیزش حفاظت، رفتارهای محیط‌زیستی کشاورزان در شرایط خشکسالی را بررسی کردند و نشان دادند که خودکارآمدی، آسیب‌پذیری درک شده و کارآمدی پاسخ تأثیر مثبت بر رفتارهای سازگارانه کشاورزان دارند، در حالی که شدت تهدید و هزینه‌های پاسخ تأثیر منفی داشتند. در مطالعه دیگر، Savari و Shokati Amghani (۲۰۲۱)، به بررسی عوامل موثر بر راهبردهای سازگاری کشاورزان ایرانی با خشکسالی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که عواملی مانند باورهای فرهنگی، روانشناختی و اجتماعی به همراه ادراک ریسک و نگرش‌ها، نقش مهمی در انتخاب راهبردهای فنی و غیرفنی کشاورزان ایفا می‌کنند. همچنین، Dargahi Maraghe و Keshavarz (۲۰۲۵)، به بررسی آسیب‌پذیری معیشتی و راهبردهای سازگاری خانواده‌های کشاورز استان تهران در برابر تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند. عوامل اثرگذار بر میزان سازگاری کشاورزان شامل قصد سازگاری، ویژگی‌های مزرعه، خودکارآمدی درک شده، مواجهه با تغییر اقلیم و اثربخشی سازگاری بودند. با وجود این‌که این بدنه‌ی پژوهشی از غنای قابل‌توجهی در سطح بین‌المللی برخوردار است، اما همچنان خلأهایی در درک جامع رفتارهای سازگاری کشاورزان ایرانی وجود دارد. به‌ویژه، جریان‌شناسی علمی این حوزه و روند تحول مفهومی و روش‌شناختی مطالعات، به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است. مشخص نیست که تمرکز جغرافیایی، چارچوب‌های نظری، یا روش‌های غالب در این پژوهش‌ها چگونه توزیع شده‌اند و چه شکاف‌هایی در ادبیات علمی باقی مانده‌اند. ازاین‌رو، هدف مطالعه حاضر، شناسایی و تحلیل جریان‌های علمی، روندهای زمانی و موضوعی و شبکه‌های تولید دانش در زمینه سازگاری کشاورزان ایران با تغییر اقلیم، از طریق یک تحلیل کتاب‌سنجی نظام‌مند است. این مطالعه می‌کوشد تا با ترسیم نقشه‌ای جامع از پژوهش‌های انجام‌شده، به درک بهتر مسیرهای طی شده و اولویت‌های مغفول‌مانده یاری رساند.

با توجه به اهمیت فزاینده موضوع سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی و پراکندگی پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، مطالعه حاضر به‌منظور دستیابی به تصویری جامع و قابل‌اتکا از وضعیت پژوهش‌های مربوط به سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییرات اقلیمی انجام شده است. در این خصوص، از منابع منتشرشده در مجلات بین‌المللی معتبر استفاده شده است. تمرکز بر این منابع، ازآن‌رو حائز اهمیت است که پژوهش‌های نمایه شده در پایگاه‌های معتبر علمی معمولاً دارای استانداردهای بالای علمی، داوری دقیق و نمایندگی گسترده‌تری از جریان‌های علمی جهانی هستند (Mongeon & Paul-Hus, 2016). در کنار این، روش کتاب‌سنجی[1] به‌عنوان رویکردی کمی و نظام‌مند برای تحلیل محتوای انتشارات علمی، امکان شناسایی روندهای زمانی، شبکه‌های همکاری، حوزه‌های پرمطالعه و مغفول‌مانده و تحول مفاهیم کلیدی را فراهم می‌آورد[2] (Aria & Cuccurullo, 2017; Donthu *et al*., 2021). ترکیب این دو رویکرد یعنی بهره‌گیری از مطالعات بین‌المللی و تحلیل کتاب‌سنجی،

[1] Bibliometric Analysis

[2] کتاب‌سنجی روشی علمی برای تحلیل کمی انتشارات پژوهشی است که با استفاده از شاخص‌هایی مانند تعداد مقالات، استنادها و نویسندگان، وضعیت و روند تحقیقات را نشان می‌دهد. این روش امکان شناسایی خلأهای پژوهشی و ترسیم تصویری از مسیر علمی یک حوزه را فراهم می‌سازد.

برخوری

امکان ترسیم دقیق‌تری از وضعیت واقعی پژوهش در این حوزه را فراهم کرده و به سیاست‌گذاران و پژوهشگران کمک می‌کند تا خلأها، تمرکزهای موضوعی و مسیرهای آتی تحقیق را شفاف‌تر بشناسند. بنابراین، مطالعه حاضر باهدف بررسی نظام‌مند ادبیات علمی منتشرشده درباره سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم در سطح بین‌المللی انجام شده است. برای دستیابی به تصویری دقیق از روند، محتوای مفهومی و تعاملات علمی این حوزه، مجموعه‌ای از پرسش‌های کلیدی پژوهش طراحی‌شده است. این پرسش‌ها، ابعاد کمی، کیفی، مفهومی و جغرافیایی مطالعات را پوشش می‌دهند که به شرح زیر است:

- روند کمی انتشار مطالعات سازگاری با تغییر اقلیم در ایران که در مجلات معتبر بین‌المللی چاپ شده‌اند چگونه است؟
- محققان پرکار و اثرگذار در این حوزه چه کسانی هستند و شبکه تعاملات پژوهشگران چه ساختاری دارد؟
- پژوهشگران ایرانی بیشتر با محققان کدام کشورها همکاری علمی دارند؟
- روند مفهومی مطالعات بر اساس کلیدواژه‌ها و واژه‌های پرتکرار چگونه ترسیم می‌شود؟
- اهداف پژوهشی مقالات منتشرشده در حوزه سازگاری با تغییر اقلیم چه بوده‌اند؟
- این مطالعات عمدتاً در کدام استان‌های ایران انجام شده‌اند؟
- عوامل اثرگذار بر سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در این مطالعات کدام‌اند؟
- چه مدل‌ها یا چارچوب‌های نظری در تحلیل سازگاری مورداستفاده قرار گرفته‌اند؟
- راهبردهای سازگاری کشاورزان ایرانی چه بوده و بیشتر کدام راهبردها موردتوجه قرار گرفته‌اند؟
- خلاءهای پژوهشی شناسایی‌شده کدام‌اند و چه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده وجود دارد؟

مواد و روش‌ها

برای پاسخ‌گویی به پرسش‌های پژوهش، از رویکرد کتاب‌سنجی به‌عنوان یک روش تحلیلی نظام‌مند، کمی و شفاف بهره گرفته شد. روش کتاب‌سنجی، به‌عنوان ابزاری معتبر در تحلیل ساختار، محتوا و روند تحول ادبیات علمی، این امکان را فراهم می‌سازد که با تکیه بر داده‌های انتشارات علمی، الگوهای تولید و انتشار دانش شناسایی شوند (Tanselle, 2009; Kumar *et al.*, 2023). در گام نخست، پایگاه داده اسکوپوس[1] به‌عنوان یکی از جامع‌ترین و معتبرترین منابع اطلاعاتی در سطح بین‌المللی برای استخراج داده‌ها انتخاب شد (Pranckutė, 2021). در شکل (۱) نقشه راه پژوهش ترسیم شده است.

جستجوی منابع در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول از استراتژی جستجوی زیر استفاده شد؛ مطالعاتی که در آن‌ها مفاهیم سازگاری، تغییر اقلیم و ایران به‌طور هم‌زمان استفاده‌شده باشد، شناسایی شدند. لازم به ذکر است که اولین مقاله نگاشته شده در این زمینه به سال ۲۰۰۶ برمی‌گردد.

Strategy 1: "Adaptation" AND "climate change" AND "Iran"

در جستجو اولیه، ۳۸۴ سند علمی شناسایی شد. اگرچه این مطالعه به سازگاری با تغییر اقلیم در ایران پرداخته است، اما برای تمرکز بیشتر بر حوزه کشاورزی، جستجوی دوم با استراتژی دقیق‌تر زیر انجام گرفت:

Strategy 2: "Adaptation" AND "climate change" AND "Iran" AND "agriculture" OR "farmers"

در مرحله دوم، ۱۴۰ سند علمی استخراج شناسایی گردید. فایل‌های مربوط به این اسناد با فرمت *BibTeX* دانلود و به نرم‌افزار VOSviewer وارد شدند. این

[1] Scopus

نرم‌افزار، ابزاری تخصصی برای مصورسازی و تحلیل داده‌های کتاب‌سنجی، به‌ویژه در حوزه تحلیل هم‌نویسندگی[1] و هم‌رخدادی واژه‌ها است (Van Eck & Waltman, 2023). در این مرحله، دو نوع بررسی انجام شد که شامل تحلیل هم‌نویسندگی و تحلیل هم‌رخدادی واژه‌ها[2] بود. تحلیل هم‌نویسندگی باهدف شناسایی پژوهشگران پرکار، بررسی شبکه تعاملات علمی میان نویسندگان و کشورهای همکار ایران در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم صورت گرفت. در مقابل، تحلیل هم‌رخدادی به بررسی واژه‌های پرتکرار در عناوین و چکیده مقالات پرداخت تا روندهای مفهومی و موضوعات کلیدی در حوزه سازگاری با تغییر اقلیم در ایران شناسایی شود.

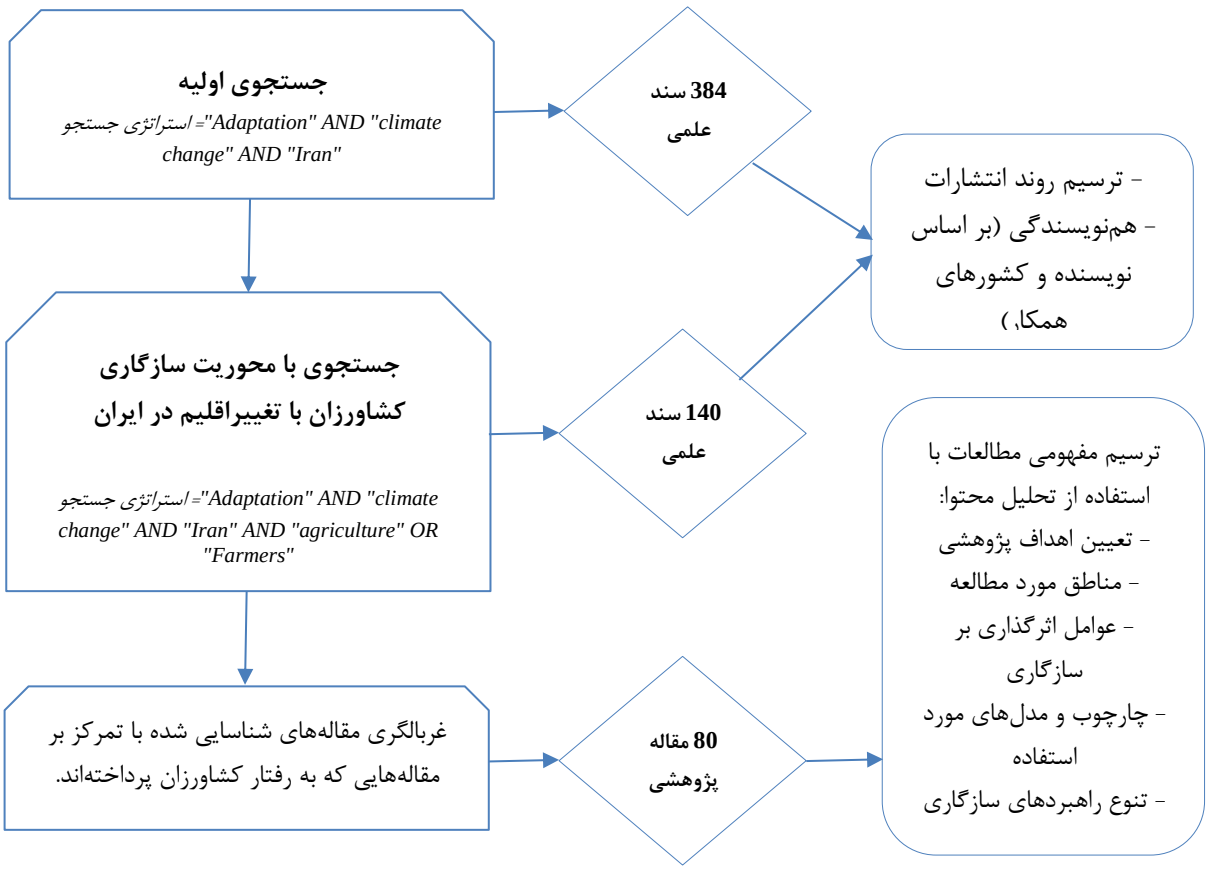
در ادامه، فرآیند غربالگری محتوا با مرور عنوان و چکیده اسناد علمی انجام شد و در نهایت ۸۰ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب گردید. معیار کلیدی گزینش مقاله برای این مرحله پرداختن به رفتار سازگاری کشاورزان بوده است. در این مرحله، از تحلیل محتوای کمی برای بررسی دقیق‌تر استفاده شد. تحلیل محتوا به‌عنوان روشی منعطف و ساختاریافته برای استخراج اطلاعات از متون، امکان شناسایی مفاهیم، طبقه‌بندی عناصر تکرارشونده و تحلیل فراوانی آن‌ها را فراهم می‌سازد (White & Marsh, 2006).

محورهای تحلیل محتوایی در این مرحله شامل اهداف پژوهشی مقالات، استان‌های محل انجام مطالعه، عوامل اثرگذار بر سازگاری با تغییر اقلیم، چارچوب‌ها و مدل‌های نظری مورداستفاده و راهبردهای سازگاری کشاورزان ایرانی بود. فراوانی هر یک از عناصر یادشده اندازه‌گیری و طبقه‌بندی شد. تحلیل‌های ترکیبی کتاب‌سنجی و محتوایی، علاوه بر ترسیم وضعیت موجود پژوهش در این حوزه، به شناسایی خلاءهای علمی و ارائه پیشنهادهایی برای مسیرهای آتی پژوهشی نیز کمک کرده‌اند.

[1] Co-authorship analysis

[2] Co-occurrence analysis

برخوری



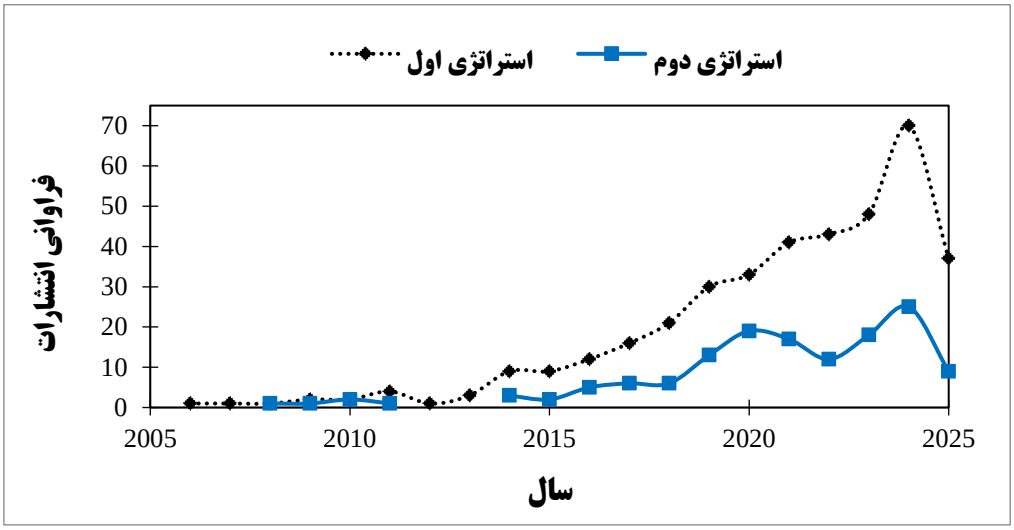
شکل ۱. روش مطالعه کتاب‌سنجی در زمینه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران

Figure 1. The method of bibliometric study on farmers' adaptation to climate change in Iran

نتایج و بحث

روند رشد انتشارات

بررسی روند انتشارات مرتبط با سازگاری با تغییر اقلیم در پایگاه داده اسکوپوس نشان‌دهنده رشد شتابان توجه پژوهشگران ایرانی به این حوزه در دو دهه گذشته است. روند انتشارات سازگاری با تغییر اقلیم در شکل (۲) ترسیم شده است. در جستجوی نخست (استراتژی اول) که کلیه مطالعات مرتبط با سازگاری و تغییر اقلیم در ایران را شامل می‌شد، ۳۸۴ سند علمی شناسایی شد. رشد چشمگیر تولیدات علمی از سال ۲۰۱۶ به بعد، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، با یافته‌های Hadi و همکاران (۱۴۰۱) هم‌راستاست که نشان دادند موج جدید تحقیقات تغییر اقلیم در ایران، هم‌زمان با شدت‌گیری بحران‌های اقلیمی و محیط‌زیستی، آغاز شده است. در جستجوی دوم (استراتژی دوم) که تمرکز آن بر سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم در ایران بود، ۱۴۰ سند علمی استخراج شد. این مطالعات نیز از سال ۲۰۱۸ به بعد رشد معناداری یافته‌اند که نشان‌دهنده حساسیت فزاینده جامعه علمی به بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های در معرض خطر تغییر اقلیم است. یکی از محرک‌های کلیدی در این روند، چالش گسترده آب در ایران است (Ladi *et al.*, 2021). این ارتباط مؤید آن است که پژوهش‌های سازگاری، به‌ویژه در بخش کشاورزی، نه‌تنها پاسخی به تهدیدهای اقلیمی هستند، بلکه بازتابی از فشارهای ساختاری ناشی از کم‌آبی و نابرابری‌های توسعه‌ای‌اند. بدین ترتیب، رشد مطالعات سازگاری را می‌توان ناشی از تلاقی بحران‌های زیست‌محیطی با ملاحظات توسعه انسانی در ایران دانست.



شکل ۲. روند انتشارات مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران (منبع داده‌ها: اسکوپوس)

Figure 2. Publication trend of studies on farmers' adaptation to climate change in Iran (Data source: Scopus)

مشارکت پژوهشگران در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

مشارکت پژوهشگران در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، نشان‌دهنده حضور گسترده و متنوع جامعه علمی در این زمینه است. بر اساس تحلیل ۱۴۰ مطالعه استخراج‌شده از پایگاه اسکوپوس، مجموعاً ۳۹۹ پژوهشگر از ایران و سایر کشورها در تولید این آثار نقش داشته‌اند. بررسی فراوانی انتشارات و تعداد ارجاعات پژوهشگران فعال، نشان می‌دهد که برخی افراد، نه‌تنها از نظر کمی بلکه از منظر کیفی (اثرگذاری علمی) نیز نقش برجسته‌ای در این حوزه داشته‌اند. بر این اساس، مسعود *یزدان‌پناه* (*Masoud Yazdanpanah*) با ۱۴ مقاله، بیشترین تولید علمی را داشته و درعین‌حال، با دریافت ۵۶۹ ارجاع، در رتبه نخست از نظر اثرگذاری علمی نیز قرارگرفته است. *حسین آزادی* (*Hossein Azadi*) و *طاهره زبیده* (*Tahereh Zobeideh*) نیز به ترتیب با ۱۲ و ۹ مقاله در رده‌های بعدی از لحاظ فراوانی انتشارات قرار دارند. درحالی‌که از منظر تعداد ارجاعات، مرضیه کشاورز (۵۶۳ ارجاع) و *عزت‌الله کرمی* (۵۰۲ ارجاع) در جایگاه‌های دوم و سوم قرار دارند که نشان‌دهنده سطح بالای توجه به آثار آن‌ها در ادبیات علمی این حوزه است. این یافته‌ها بیانگر آن است که بخشی از پژوهشگران نه‌تنها فعال بلکه تأثیرگذار نیز هستند و شبکه‌ای از نویسندگان کلیدی در حال شکل‌گیری در این حوزه است (جدول ۱).

جدول ۱. فهرست پژوهشگران بر پایه فراوانی انتشارات و تعداد ارجاعات

Table 1. List of researchers based on publication frequency and number of citations

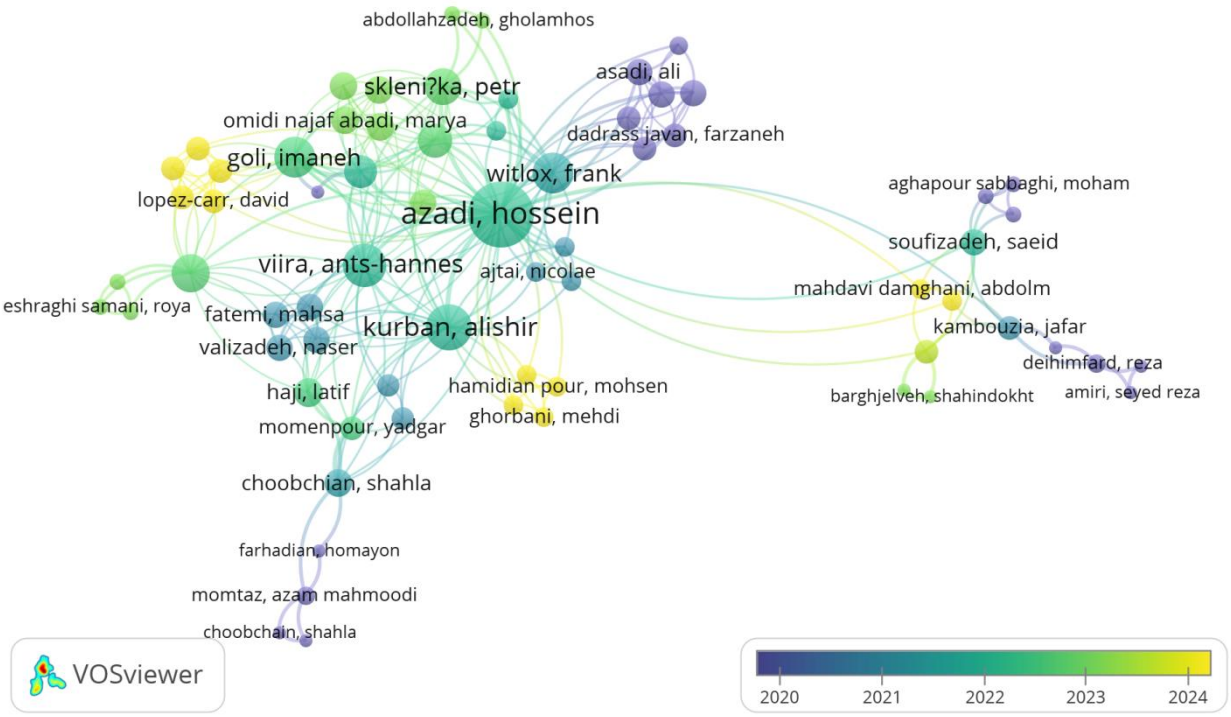
ردیف	رتبه‌بندی بر پایه فراوانی انتشارات		رتبه‌بندی بر پایه تعداد ارجاعات	
	پژوهشگر	فراوانی انتشارات	پژوهشگر	تعداد ارجاعات
1	مسعود یزدان‌پناه	14	مسعود یزدان‌پناه	569
2	حسین آزادی	12	مرضیه کشاورز	563
3	طاهره زبیده	9	عزت‌اله کرمی	502
4	مرضیه کشاورز	7	وحید کریمی	250
5	مسلم سواری	7	حسین آزادی	211

برخوری

بخش قابل‌توجهی از آثار پژوهشگران برجسته این حوزه، نه‌تنها به تحلیل‌های توصیفی و پیمایشی در سطح روستاها و مناطق کشاورزی ایران پرداخته‌اند، بلکه تلاش کرده‌اند چارچوب‌های نظری تلفیقی و بین‌رشته‌ای را برای فهم رفتارهای سازگاری ارائه دهند. به‌عنوان‌مثال، یزدان‌پناه، کشاورز، آزادی و زبیده در مقالات متعددی به بررسی نقش باورهای اقلیمی، درک خطر، فاصله روان‌شناختی و احساسات در تصمیمات سازگاری کشاورزان پرداخته‌اند (Azadi *et al*., 2019; Zobeidi *et al*., 2022; Yazdanpanah *et al*., 2025). این پژوهش‌ها، با تمرکز بر مناطق آسیب‌پذیری چون جنوب‌غرب ایران، نه‌تنها درک عمیق‌تری از عوامل انسانی مؤثر بر رفتار سازگاری ارائه داده‌اند، بلکه مسیر را برای ورود مفاهیمی چون دل‌بستگی مکانی، هنجارهای اخلاقی و تنش‌های هیجانی در تحلیل‌های بعدی هموار کرده‌اند (Arjomandi *et al*., 2025).

افزون بر این، برخی پژوهشگران مانند Keshavarz و Karami (۲۰۱۶) توجه ویژه‌ای به پیوند تغییر اقلیم با ساختارهای اجتماعی-اقتصادی و راهبردهای کشاورزی هوشمند اقلیمی داشته‌اند؛ آن‌ها نشان داده‌اند که پذیرش فناوری، سطح آموزش و حمایت نهادی، در کنار ادراکات فردی، در شکل‌گیری رفتارهای سازگاری نقش تعیین‌کننده دارد (Memarbashi *et al*., 2022; Goli *et al*., 2024). بنابراین، مشارکت این گروه از نویسندگان نه‌تنها از منظر انتشار و ارجاع علمی، بلکه از حیث تولید دانش مسئله‌محور، در تبیین ابعاد پیچیده سازگاری کشاورزان ایرانی با تغییر اقلیم، نقشی کلیدی ایفا کرده است.

شبکه علمی پژوهشگران در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، نشان‌دهنده شکل‌گیری خوشه‌هایی از همکاری‌های علمی میان نویسندگان داخلی و بین‌المللی است. این شبکه که از طریق تحلیل هم‌نویسندگی و با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer ترسیم شده، در قالب شکل (۳) ارائه‌شده است. نقشه هم‌نویسندگی روابط میان پژوهشگرانی را نشان می‌دهد که در تولید حداقل دو مقاله مشترک نقش داشته‌اند. بررسی این شبکه نشان می‌دهد که برخی از پژوهشگران به‌عنوان گره‌های مرکزی عمل کرده و نقش مهمی در پیوند میان خوشه‌های مختلف علمی ایفا کرده‌اند (گره‌های بزرگ‌تر در شکل ۳). این ساختار خوشه‌ای بیانگر وجود گروه‌های تحقیقاتی فعال در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی خاص است که از طریق پروژه‌های مشترک یا همکاری‌های بین‌المللی به هم متصل شده‌اند. قدرت ارتباطات علمی در این حوزه، به‌ویژه میان پژوهشگران پرکار، می‌تواند زمینه‌ساز تولید دانش هم‌افزایانه و جهت‌دهی به سیاست‌های سازگاری در بخش کشاورزی کشور باشد.



شکل ۳. شبکه تعاملات پژوهشگران در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم (خروجی نرم‌افزار VOSviewe)

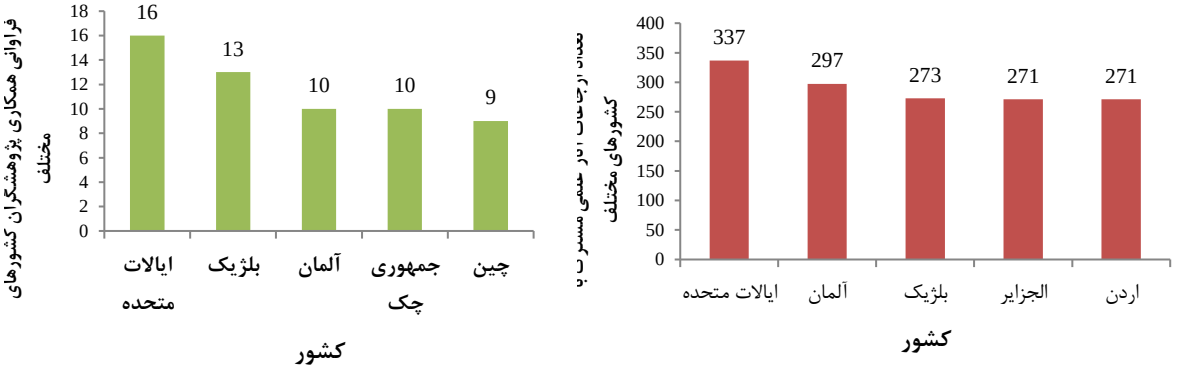
Figure 3. Co-authorship Network of Researchers in Studies on Farmers' Adaptation to Climate Change (Output of VOSviewer Software)

مشارکت پژوهشگران در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

تحلیل مشارکت پژوهشی بر اساس کشور در مطالعات مربوط به سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، نشان‌دهنده حضور گسترده و متنوع جامعه علمی بین‌المللی است. درمجموع، پژوهشگرانی از ۳۷ کشور در نگارش ۱۴۰ مقاله علمی مشارکت داشته‌اند که این خود بیانگر توجه جهانی به موضوع تغییر اقلیم در ایران، به‌ویژه در بخش کشاورزی است. از این میان، ۹ کشور بیش از ۵ مقاله منتشر کرده‌اند که نشان‌دهنده تعامل پژوهشی فعال‌تری در این حوزه بوده است.

ایالات‌متحده با ۱۶ مقاله، در صدر فهرست کشورها از نظر فراوانی انتشارات قرار دارد و از لحاظ تعداد ارجاعات (۳۳۷ ارجاع) نیز جایگاه نخست را حفظ کرده است. بلژیک و آلمان به‌ترتیب با ۱۳ و ۱۰ مقاله، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. اما از منظر ارجاعات، آلمان (۲۹۷ ارجاع) و بلژیک (۲۷۳ ارجاع) از اثرگذاری بالایی برخوردار بوده‌اند. جالب آنکه کشورهایی چون الجزایر و اردن نیز با وجود تعداد مقاله کمتر، از نظر ارجاع در جایگاه‌های بالا قرار دارند (هر دو با ۲۷۱ ارجاع) که نشان می‌دهد آثار تولیدشده از این کشورها از نظر محتوایی موردتوجه بالای جامعه علمی قرار گرفته‌اند. جزئیات این بخش در شکل (۴) ارائه شده است.

برخوری

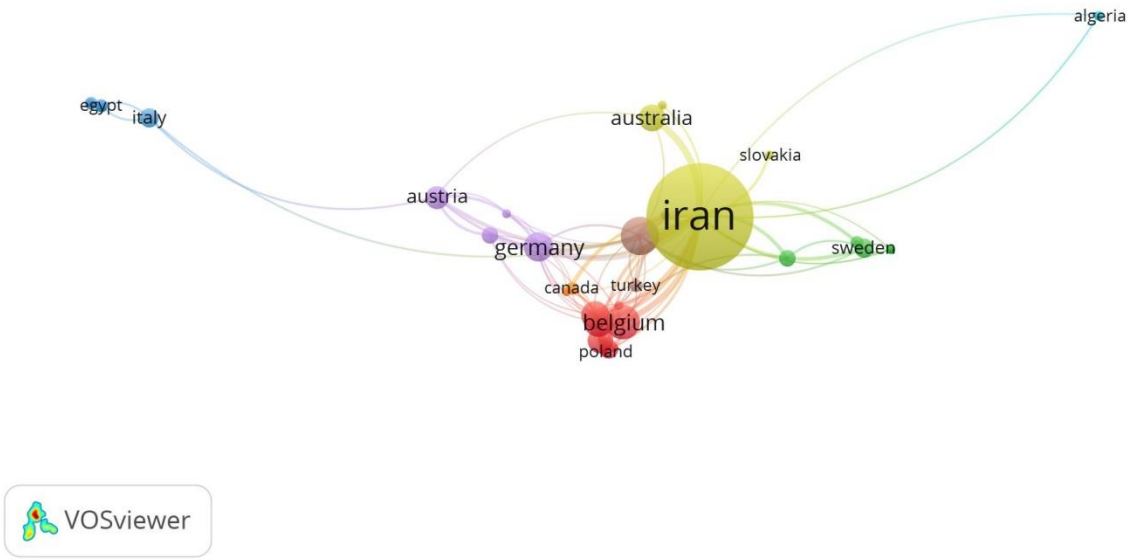


شکل ۴. فراوانی کشورهای همکار بر پایه فراوانی انتشارات و تعداد ارجاعات

Figure 4. Frequency of Collaborating Countries Based on Publication Frequency and Citation Number

نمونه‌هایی از همکاری‌های علمی موفق میان ایران و ایالات‌متحده نیز در پژوهش‌هایی درباره تغییر تاریخ کاشت گندم دیم (Nouri et al., 2017) و پیرامون تخصیص منابع آب در شرایط اقلیمی جدید (Golfam et al., 2019) مشهود است. این نوع مشارکت‌ها، ضمن ارتقای سطح علمی مقالات، به بهبود کاربردی بودن یافته‌ها در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و کشاورزی منجر می‌شوند و بیانگر اهمیت همکاری‌های فرامرزی در مواجهه با چالش‌های اقلیمی پیچیده هستند. همچنین، همکاری‌های علمی با کشورهایی دارای زیرساخت پژوهشی قوی، به‌ویژه آلمان و بلژیک، نقش چشم‌گیری در ارتقای سطح علمی این حوزه داشته‌اند (Jamshidi *et al.*, 2019; Ghanian *et al.*, 2020). این تعاملات علمی، ظرفیت بالایی برای انتقال دانش، تقویت روش‌شناسی و افزایش اعتبار بین‌المللی پژوهش‌ها ایجاد کرده‌اند.

شبکه تعاملات هم‌نویسندگی بر پایه کشورها که در شکل (۵) نمایش داده‌شده است، تصویری گویا از گستردگی و پیچیدگی همکاری‌های علمی در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران ارائه می‌دهد. این شبکه نشان می‌دهد که ایران به‌عنوان گره مرکزی تعاملات، با طیف وسیعی از کشورها وارد همکاری پژوهشی شده است. کشورهایی نظیر ایالات‌متحده، آلمان، بلژیک، چین و جمهوری چک، از مهم‌ترین شرکای علمی ایران در این حوزه به شمار می‌روند. ضخامت پیوندها در این شبکه نیز بیانگر شدت همکاری‌هاست؛ به‌طوری‌که پیوندهای قوی‌تری بین ایران و کشورهای دارای بیشترین انتشار و ارجاع مشاهده می‌شود. این الگوی شبکه‌ای، علاوه بر نمایاندن ساختار تعاملات علمی، اهمیت نقش‌آفرینی کشورهایی با زیرساخت تحقیقاتی قوی در تقویت بدنه علمی حوزه تغییر اقلیم در ایران را نیز برجسته می‌سازد.



شکل ۵. شبکه همکاری پژوهشگران کشورهای دیگر در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم (خروجی نرم‌افزار VOSviewe)

Figure 5. Collaboration Network of Researchers from Other Countries in Studies on Farmers' Adaptation to Climate Change (Output of VOSviewer Software)

شبکه مفهومی مطالعات

در تحلیل مفهومی مطالعات مرتبط با سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم، می‌توان روندی تدریجی و ساختاریافته را در جهت‌گیری پژوهش‌ها مشاهده کرد. شکل (۶) که نقشه هم‌رخدادی واژگان را نمایش می‌دهد، نشان می‌دهد که پژوهش‌ها از پرداختن به اثرات مستقیم تغییر اقلیم بر کشاورزی آغاز شده‌اند و به‌مرور به سوی جنبه‌های مدیریتی و نهایتاً ابعاد انسانی و اجتماعی این پدیده حرکت کرده‌اند. در بخش‌های اولیه این روند، مفاهیمی مانند «خشک‌سالی»، «عملکرد محصول» و «کشاورزی دیم» به‌عنوان دغدغه‌های اصلی مطرح بوده‌اند. این مفاهیم بازتاب‌دهنده تمرکز اولیه بر ارزیابی تأثیرات اقلیمی بر بهره‌وری کشاورزی و منابع طبیعی هستند.

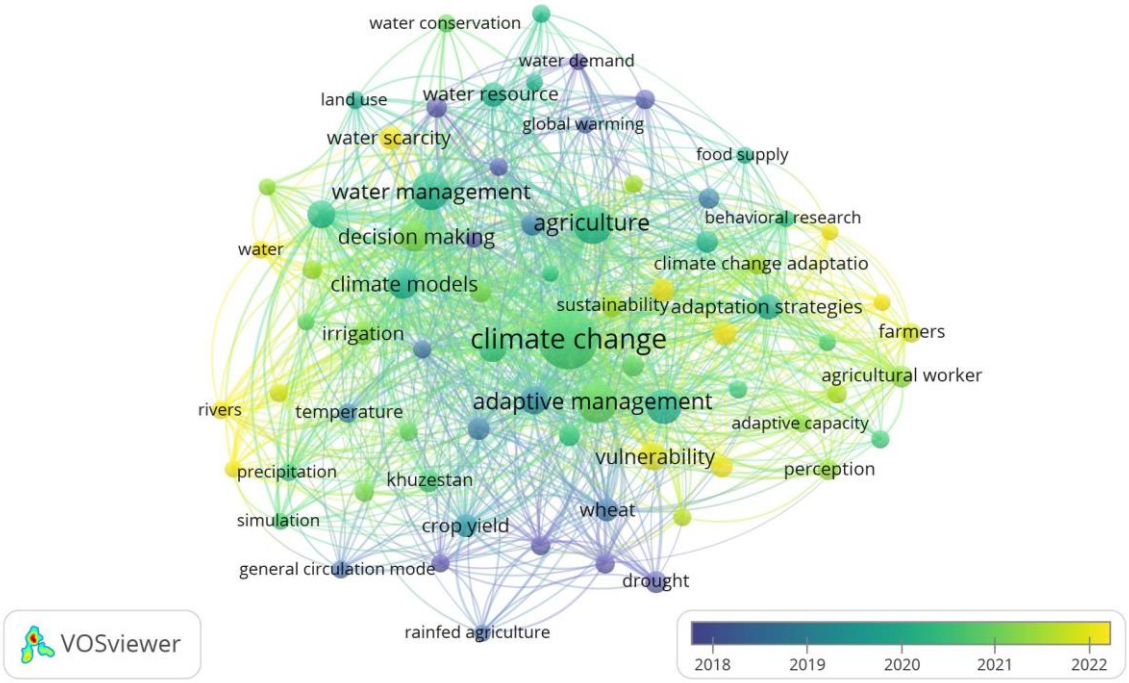
با پیشرفت مطالعات، واژگانی نظیر «مدیریت تطبیقی[1]»، «مدیریت آب»، «تصمیم‌سازی» و «مدل‌های اقلیمی» جایگاه برجسته‌تری در نقشه مفهومی یافته‌اند. این تغییر نشان‌دهنده افزایش توجه به طراحی راهبردها و مداخلات مدیریتی برای سازگاری بهتر با شرایط اقلیمی متغیر است.

در مرحله بعد، همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، محور توجه مطالعات به سمت ابعاد اجتماعی و انسانی گسترش یافته است. مفاهیمی مانند «آسیب‌پذیری»، «امنیت آبی»، «رودخانه‌ها»، «کشاورزان» و «کارگران کشاورزی» در مرکز تحلیل‌ها قرار گرفته‌اند. این روند حاکی از آن است که درک سازگاری به‌تدریج از سطح فنی و مدیریتی فراتر رفته و به درک عمیق‌تری از مسائل ساختاری، عدالت

[1] Adaptive Management

برخوری

اجتماعی و تاب‌آوری جوامع کشاورزی تبدیل‌شده است. درمجموع، شکل (۶) به‌خوبی این تحول مفهومی را بازتاب می‌دهد؛ تحولی که از شناخت اثرات زیست‌محیطی آغازشده و به سمت مدیریت پایدار، مشارکت اجتماعی و سیاست‌گذاری چندسطحی در حوزه سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم گسترش‌یافته است.



شکل ۶. روند تغییرات مفهومی در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم (خروجی نرم‌افزار VOSviewe)

Figure 6. Conceptual Development Trends in Studies on Farmers' Adaptation to Climate Change (Output of VOSviewer Software)

مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم بر پایه اهداف پژوهشی

با استفاده از تحلیل محتوای ۸۰ مقاله گزینش‌شده، مطالعات در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی در ایران به‌طورکلی در پنج دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند که هرکدام هدف خاصی را دنبال می‌کنند. نخستین دسته، شناسایی عوامل مؤثر بر سازگاری کشاورزان است که با ۳۵ درصد از کل مطالعات، بیشترین سهم را دارد و پرچم‌دار تحقیقات در این زمینه پژوهشی به شمار می‌آید. دسته دوم، بررسی رفتارها و راهبردهای سازگاری است که ۲۳ درصد از مطالعات را شامل می‌شود. دسته سوم، تحلیل سطح آسیب‌پذیری و تاب‌آوری کشاورزان با ۱۴ درصد سهم، کمترین توجه را در مقایسه با دیگر دسته‌ها به خود اختصاص داده است. در ادامه، توسعه و آزمون مدل‌های مفهومی رفتاری در ۱۳ درصد از پژوهش‌ها قرار دارد و در نهایت، دسته ارائه سیاست‌ها یا پیشنهادهای کاربردی برای بهبود سازگاری با ۱۰ درصد سهم، آخرین گروه در این طبقه‌بندی است. همچنین، مطالعات مروری و تحلیلی نیز تنها ۶ درصد از کل پژوهش‌ها را شامل می‌شود. جزئیات مربوط به این دسته‌بندی در جدول (۲) ارائه شده است.

بر اساس این دسته‌بندی از مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، مسائل مختلفی همچون شناسایی عوامل مؤثر، تحلیل رفتارها و راهبردهای سازگاری و مدل‌سازی مفهومی به‌طور دقیق‌تری مشخص شده است، درحالی‌که حوزه‌هایی همچون آسیب‌پذیری و تاب‌آوری کشاورزان و

سیاست‌گذاری‌های کاربردی کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند. این طبقه‌بندی علاوه بر روشن‌سازی این مسائل، شکاف‌های موجود در ادبیات علمی را نیز به‌طور برجسته‌تری نمایان می‌سازد.

جدول ۲. دسته‌بندی اهداف پژوهشی در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

Table 2. Categorization of Research Objectives in Studies on Farmers' Adaptation to Climate Change

ردیف	دسته	تعریف	نمونه‌ها	فراوانی	درصد
1	شناسایی عوامل مؤثر بر سازگاری کشاورزان	تمرکز بر متغیرهای فردی، روان‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی مانند دانش، نگرش، درآمد، تجربه.	Keshavarz *et al*.,2014; Karimi *et al*., 2018	28	35
2	بررسی رفتارها و راهبردهای سازگاری اتخاذشده توسط کشاورزان	مطالعه انواع پاسخ‌های کشاورزان به تغییر اقلیم؛ راهبردهایی مانند تغییر نوع محصول، صرفه‌جویی در مصرف آب، یا بیمه محصولات.	Savari & Shokati Amghani, 2021	18	23
3	تحلیل سطح آسیب‌پذیری و تاب‌آوری کشاورزان	استفاده از شاخص‌های ترکیبی برای سنجش تاب‌آوری یا آسیب‌پذیری مناطق مختلف.	Kheiri *et al*., 2024; Naderi *et al*., 2024	11	14
4	توسعه و آزمون مدل‌های مفهومی رفتاری در زمینه سازگاری	بهره‌گیری از مدل‌هایی چون TPB، PMT و... برای تحلیل سازگاری.	Keshavarz & Karami, 2016	10	13
5	ارائه سیاست‌ها یا پیشنهادهای کاربردی برای بهبود سازگاری در سطح محلی یا ملی	تمرکز بر تحلیل نهادی، مشارکت نهادهای دولتی و توصیه‌های سیاست‌محور.	Azadi *et al*., 2019	8	10
6	مطالعات مروری و تحلیلی (نقشه راه، مرور نظام‌مند، تحلیل کتاب‌سنجی)	بررسی روندهای علمی، تحلیل موضوعی یا جریان‌شناسی دانش.	Shaffril *et al*., 2018	5	6

مناطق موردپژوهش در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران

بر اساس جدول (۳)، تحلیل جغرافیایی مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران نشان می‌دهد که تمرکز پژوهش‌ها بر برخی استان‌های خاص بوده است. استان خوزستان با ۱۴ مطالعه (۱۸ درصد) در صدر قرار دارد و بیشترین توجه را در ادبیات پژوهشی به خود اختصاص داده است (Yazdanpanah *et al*., 2025). پس‌ازآن، استان فارس با ۹ مطالعه (۱۱ درصد) و همدان با ۶ مطالعه (۸ درصد) در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین، مجموعه استان‌های آذربایجان شرقی و غربی درمجموع با ۱۰ بار اشاره (۱۲ درصد) سهم قابل‌توجهی از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند.

در ردیف‌های دیگر، استان‌هایی مانند سیستان و بلوچستان، کرمانشاه، لرستان و مازندران هرکدام ۴ مطالعه داشته‌اند، اما به دلیل تعدد استان‌ها در یک ردیف، مجموع فراوانی آن‌ها به ۱۶ مورد (۲۰ درصد) می‌رسد. این الگو در مورد سایر استان‌ها نیز مشاهده می‌شود، ازجمله استان‌های کرمان، خراسان رضوی و قزوین با ۹ مورد (۱۱ درصد) و استان‌هایی مانند تهران، گلستان، ایلام و کردستان با ۸ مورد (۱۰ درصد). استان‌های کم مطالعه شده مانند البرز، سمنان و یزد نیز تنها با ۳ مطالعه (۴ درصد) در انتهای جدول قرار دارند.

این توزیع نشان می‌دهد که مناطق دارای کشاورزی گسترده، تنوع اقلیمی بالا، یا آسیب‌پذیری بیشتر در برابر تغییرات اقلیمی، بیشترین سهم را در مطالعات

برخوری

داشته‌اند؛ درحالی‌که برخی استان‌ها به‌رغم شرایط خاص خود، هنوز در ادبیات علمی کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند و نیازمند بررسی‌های هدفمندتر در آینده هستند.

جدول ۳. استان‌های موردمطالعه در ادبیات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم
Table 3. Provinces Studied in the Literature on Farmers' Adaptation to Climate Change

ردیف	استان*	فراوانی مطالعات	فراوانی در تعداد استان	درصد
1	خوزستان	14	14	18
2	فارس	9	9	11
3	همدان	6	6	8
4	آذربایجان‌های غربی و شرقی	5	10	12
5	اصفهان	5	5	6
6	سیستان و بلوچستان، کرمانشاه، لرستان، مازندران	4	16	20
7	کرمان، خراسان رضوی و قزوین	3	9	11
8	تهران، گلستان، ایلام، کردستان	2	8	10
9	البرز، سمنان و یزد	1	3	4

* در ردیف‌هایی که بیش از یک استان ذکرشده، فراوانی مطالعات برای هر استان به‌طور جداگانه و به تعداد ذکرشده محاسبه می‌شود.

عوامل اثرگذار بر سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

نتایج حاصل از تحلیل محتوای ۸۰ مقاله در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، در جدول (۴) دسته‌بندی و ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که عوامل مؤثر را می‌توان در قالب پنج مؤلفه اصلی شامل انگاره‌های روان‌شناختی، سرمایه اجتماعی، ویژگی‌های دموگرافیک و عوامل پشتیبان طبقه‌بندی کرد. در میان این مؤلفه‌ها، انگاره‌های روان‌شناختی بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند؛ به‌ویژه متغیرهایی مانند «آگاهی و دانش نسبت به تغییر اقلیم» (۱۲ درصد)، «نگرش» (۱۰ درصد) و «ادراک ریسک» (۵ درصد) از برجسته‌ترین عوامل روانی اثرگذار هستند. مطالعاتی مانندKeshavarz و همکاران (۲۰۱۴) نیز بر نقش محوری آگاهی، نگرش و باورهای ذهنی در اتخاذ تصمیمات سازگارانه تأکید کرده‌اند.

در مؤلفه سرمایه اجتماعی، متغیرهایی مانند مشارکت اجتماعی (۵ درصد)، عضویت در سازمان‌های کشاورزی و اعتماد اجتماعی بیانگر این نکته‌اند که پیوندهای اجتماعی می‌توانند بستر مناسبی برای تبادل اطلاعات و پذیرش راهبردهای سازگاری فراهم آورند. این یافته‌ها همسو با نتایج مرور نظام‌مند Shaffril و همکاران (۲۰۱۸) هستند که نشان می‌دهند سرمایه اجتماعی در تقویت اقدامات سازگارانه در جوامع کشاورزی آسیایی نیز نقش محوری دارد.

در بخش ویژگی‌های دموگرافیک، عواملی مانند تجربه کشاورزی (۷ درصد) و سطح تحصیلات (۶ درصد) به‌عنوان متغیرهای کلیدی شناخته شده‌اند که میزان درک و واکنش کشاورزان به تغییرات اقلیمی را تعیین می‌کنند. از سوی دیگر، عوامل پشتیبان مانند دسترسی به منابع مالی (۹ درصد)، حمایت‌های نهادی (۷ درصد) و دسترسی به اطلاعات (۵ درصد) نیز در افزایش ظرفیت انطباق کشاورزان تأثیرگذار هستند. استفاده از فناوری‌های نوین، نوآوری و منابع طبیعی نیز گرچه با فراوانی کمتر ذکر شده‌اند، اما نقش مؤثری در توانمندسازی عملی کشاورزان ایفا می‌کنند. درمجموع، این دسته‌بندی به درک عمیق‌تری از ابعاد گوناگون سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران منجر می‌شود و می‌تواند مبنایی برای طراحی پژوهش‌های آتی، سیاست‌های هدفمند، متناسب با زمینه‌های روانی، اجتماعی و نهادی موجود در مناطق مختلف باشد.

جدول ۴. عوامل اثرگذار بر سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران
Table 4. Factors Influencing Farmers' Adaptation to Climate Change in Iran

ردیف	مؤلفه	متغیر	فراوانی	درصد
1	انگاره‌های روان‌شناختی	آگاهی و دانش نسبت به تغییر اقلیم	18	12
2		نگرش نسبت به تغییر اقلیم	15	10
3		ادراک ریسک	7	5
4		اعتقادات دینی یا فرهنگی مرتبط با طبیعت	5	3
5		باور به کارآمدی اقدامات سازگاری	4	3
6		نگرش	4	3
7		خودکارآمدی	4	3
8		ویژگی‌های روان‌شناختی ازجمله اضطراب یا امید	2	1
9	سرمایه اجتماعی	مشارکت اجتماعی	8	5
10		عضویت در سازمان‌های کشاورزی	5	3
11		اعتماد اجتماعی	4	3
12	ویژگی‌های دموگرافیک	تجربه کشاورزی	11	7
13		سطح تحصیلات کشاورز	9	6
14		اندازه زمین کشاورزی	7	5
15		درآمد سالانه خانوار	6	4
16	عوامل پشتیبان	دسترسی به منابع مالی	13	9
17		حمایت دولتی / نهادی	10	7
18		دسترسی به اطلاعات و آموزش	8	5
19		استفاده از فناوری و نوآوری	6	4
20		دسترسی به آب و منابع طبیعی	5	3

مدل‌ها و چارچوب‌های نظری به کار گرفته‌شده در مطالعات سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

در مطالعات صورت گرفته درباره سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم، بهره‌گیری از مدل‌ها و چارچوب‌های نظری نقش مهمی در تبیین رفتارها و تحلیل عوامل تأثیرگذار ایفا کرده است. بر اساس نتایج تحلیل محتوای ۸۰ مقاله منتخب که خلاصه آن در جدول (۵) ارائه شده است، می‌توان مشاهده کرد که طیف متنوعی از رویکردهای نظری در این حوزه استفاده شده است. این جدول نشان می‌دهد که هفت گروه اصلی از مدل‌ها و چارچوب‌های نظری در مطالعات موردبررسی به کار گرفته شده‌اند.

در این میان، نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده با سهم ۱۸ درصد، رایج‌ترین چارچوب نظری بوده است که بیشتر برای تحلیل قصد رفتاری کشاورزان در اتخاذ اقدامات سازگارانه مورداستفاده قرارگرفته است (Keshavarz & Karami, 2016). چارچوب آسیب‌پذیری و مدل‌های تلفیقی هر یک با سهم ۱۵ درصد، جایگاه بعدی را دارند؛ چارچوب آسیب‌پذیری عمدتاً برای تحلیل ریسک‌ها و نقاط ضعف ساختاری مورداستفاده قرارگرفته و مدل‌های ترکیبی نیز تلاش کرده‌اند با ادغام نظریه‌هایی چون رفتار برنامه‌ریزی‌شده، نظریه انگیزش حفاظت و چارچوب معیشت پایدار، دیدگاه جامعی در تحلیل سازگاری ارائه دهند. سایر چارچوب‌ها شامل چارچوب معیشت پایدار با ۱۳ درصد، نظریه انگیزش حفاظت با ۱۰ درصد و نظریه انتخاب عقلانی با ۵ درصد هستند. نکته قابل‌توجه اینکه ۲۵ درصد از مطالعات از چارچوب نظری مشخصی پیروی نکرده‌اند و عمدتاً رویکردی توصیفی یا اکتشافی داشته‌اند. این

برخوری

امر بیانگر آن است که همچنان بخشی از ادبیات در این حوزه از انسجام نظری برخوردار نیست و نیاز به تقویت مبانی نظری در پژوهش‌های آینده احساس می‌شود.

جدول ۵. مدل یا چارچوب‌های نظری مورداستفاده در مطالعات سازگاری با تغییر اقلیم

Table 5. Theoretical Models or Frameworks Used in Studies on Adaptation to Climate Change

ردیف	مدل یا چارچوب	درصد فراوانی	نمونه یا توضیحات
1	نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده	18	Karimi *et al*., 2018؛Keshavarz & Karami, 2016
2	نظریه انگیزش حفاظت	10	Savari & Shokati Amghani, 2021
3	چارچوب معیشت پایدار	13	Kheiri *et al*., 2024؛Azadi *et al*., 2019
4	نظریه انتخاب عقلانی	5	Delfiyan *et al*., 2021
5	چارچوب آسیب‌پذیری	15	Kheiri *et al*., 2024؛Naderi *et al*., 2024
6	چارچوب‌های تلفیقی (مدل ترکیبی)	15	استفاده از نظریه‌های رفتار برنامه‌ریزی‌شده، انگیزش حفاظتی و چارچوب معیشت پایدار با مفاهیم جامعه‌شناختی
7	تحلیل بدون چارچوب نظری مشخص (مطالعات توصیفی یا اکتشافی)	25	برخی مطالعات اولیه در مناطق مختلف کشور

راهبردهای سازگاری کشاورزان ایران با تغییر اقلیم

نتایج حاصل از تحلیل محتوای ۸۰ مقاله در زمینه راهبردهای سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی در ایران در جدول (۶) ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که راهبردهای سازگاری به‌طورکلی در پنج گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: راهبردهای زراعی و مدیریتی، مدیریت منابع آب، راهبردهای فنی و فناورانه، راهبردهای اقتصادی و راهبردهای آموزشی و نهادی.

در این میان، راهبردهای زراعی و مدیریتی با بیشترین فراوانی (۹ مورد) ازجمله پرکاربردترین راهبردها محسوب می‌شود و شامل تغییر زمان کاشت و برداشت، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و گرما، تنوع‌بخشی به محصولات و کاهش سطح زیرکشت محصولات آب‌بر است. این نتایج بر لزوم انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی‌های زراعی و استفاده از تکنیک‌های جدید برای مقابله با چالش‌های اقلیمی تأکید دارند.

راهبردهای مربوط به مدیریت منابع آب دومین گروه پرکاربرد (با ۱۰ مورد) است که شامل بهبود شیوه‌های آبیاری، استفاده از منابع آب جایگزین و ذخیره‌سازی و جمع‌آوری آب باران می‌شود. این دسته از راهبردها به‌ویژه در مناطقی با کمبود منابع آبی از اهمیت بالایی برخوردار است و نشان می‌دهد که کشاورزان به دنبال بهره‌گیری از روش‌های کارآمد برای حفظ منابع آبی هستند. در راهبردهای فنی و فناورانه، استفاده از فناوری‌های نوین مانند نرم‌افزارها، سامانه‌های هشدار و مکانیزاسیون نیز با تعداد ۴ مورد مطرح‌شده است. این دسته از راهبردها به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به فناوری‌های مدرن و اطلاعات دقیق وجود دارد، می‌تواند تأثیر زیادی بر بهبود سازگاری داشته باشد.

راهبردهای اقتصادی شامل بیمه محصولات کشاورزی و دریافت وام‌ها و حمایت‌های مالی است که درمجموع ۱۲ مورد از راهبردها را به خود اختصاص داده‌اند. این دسته تأکید بر لزوم حمایت‌های مالی و دولتی برای تأمین امنیت اقتصادی کشاورزان دارد. در نهایت، راهبردهای آموزشی و نهادی شامل آموزش‌های ترویجی، اطلاع‌رسانی نهادها و مشارکت مردمی است که سهم ۱۵ درصدی از راهبردهای ذکرشده را به خود اختصاص داده‌اند. این راهبردها نشان‌دهنده اهمیت آگاهی‌بخشی و توانمندسازی کشاورزان برای مقابله با تغییرات اقلیمی است. این دسته‌بندی نشان می‌دهد که

کشاورزان ایران به‌طور گسترده از مجموعه‌ای متنوع از راهبردها برای سازگاری با تغییرات اقلیمی استفاده می‌کنند که ترکیبی از رویکردهای فنی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی را در بر می‌گیرد.

جدول ۶. راهبردهای سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم

Table 6. Farmers' Adaptation Strategies to Climate Change

ردیف	راهبرد کلی	راهبردهای زیرمجموعه	فراوانی	نمونه مطالعه
1	راهبردهای زراعی و مدیریتی	تغییر زمان کاشت و برداشت	9	Keshavarz *et al*., 2014; Azadi *et al*., 2019; Delfiyan *et al*., 2021
2		استفاده از ارقام مقاوم به خشکی/گرما	6	Savari & Shokati Amghani, 2021; Kheiri *et al*., 2024
3		تنوع‌بخشی به محصولات	4	Keshavarz & Karami, 2016; Karimi *et al*., 2018
4		کاهش سطح زیر کشت محصولات آب‌بر	3	Azadi *et al*., 2019; Naderi *et al*., 2024
5	راهبردهای مربوط به مدیریت منابع آب	بهبود شیوه‌های آبیاری (قطره‌ای، بارانی، بهینه‌سازی)	10	Azadi *et al*., 2019; Naderi *et al*., 2024
6		استفاده از منابع آب جایگزین (آب‌های شور، فاضلاب تصفیه‌شده)	2	Karimi *et al*., 2018
7		مدیریت بهره‌برداری از آب زیرزمینی	4	Naderi *et al*., 2024
8		ذخیره‌سازی و جمع‌آوری آب باران	2	Keshavarz *et al*., 2014
9	راهبردهای فنی و فناورانه	استفاده از فناوری‌های نوین (نرم‌افزار و سامانه‌های هشدار)	4	Shaffril *et al*., 2018; Azadi *et al*., 2019
10		مکانیزاسیون و ماشین‌آلات نوین	3	Kheiri *et al*., 2024
11		بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی و پیش‌بینی اقلیم	3	Keshavarz & Karami, 2016; Shariatzadeh & Bijani, 2022
12	راهبردهای اقتصادی	بیمه محصولات کشاورزی	7	Keshavarz et al., 2014; Delfiyan et al., 2021
13		دریافت وام و حمایت‌های مالی	5	Dargahi Maraghe & Keshavarz, 2025
14		تنوع درآمدی با فعالیت‌های غیرکشاورزی	3	Karimi *et al*., 2018
15	راهبردهای آموزشی و نهادی	آموزش‌های ترویجی و کارگاه‌های آگاهی‌بخش	8	Azadi *et al*., 2019; Kheiri *et al*., 2024
16		اطلاع‌رسانی نهادها درباره خطرات اقلیمی	4	Keshavarz *et al*., 2014
17		نقش نهادهای محلی و مشارکت مردمی	3	Delfiyan *et al*., 2021
18		اعتماد نهادی به دولت و سازمان‌ها	2	Shariatzadeh & Bijani, 2022
19	راهبردهای اجتماعی – روان‌شناختی	ادراک ریسک و خطر اقلیمی	4	Below *et al*., 2012; Shariatzadeh & Bijani, 2022
20		خودکارآمدی و انگیزش درونی	3	Karimi *et al*., 2018; Delfiyan *et al*., 2021
21		اعتماد اجتماعی و تعاملات محلی	4	Keshavarz & Karami, 2016

نتیجه‌گیری کلی

مرور نظام‌مند مطالعات انجام‌شده در حوزه سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم در ایران، تصویری چندبعدی و میان‌رشته‌ای از ماهیت این پدیده ارائه می‌دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که رفتار سازگاری کشاورزان صرفاً واکنشی به شرایط اقلیمی یا اقتصادی نیست، بلکه در بستر پیچیده‌ای از عوامل روانی (باورها، نگرش‌ها و ادراک خطر)، اجتماعی (حمایت اجتماعی و هنجارهای فرهنگی)، نهادی (نقش دولت، نهادهای محلی، سیاست‌گذاری‌ها) و محیطی (میزان منابع طبیعی، زیرساخت‌ها) شکل می‌گیرد. این دیدگاه جامع مستلزم آن است که پژوهشگران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان،

برخوری

نگاه صرفاً فنی به مسئله را کنار گذاشته و به تعامل عوامل نرم و سخت توجه داشته باشند.

در عین حال، تحلیل انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که با وجود افزایش کمی پژوهش‌ها در سال‌های اخیر، توزیع فضایی، مفهومی و روشی آن‌ها متوازن نبوده و شکاف‌های مشخصی در این حوزه وجود دارد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، مهم‌ترین خلأهای این حوزه پژوهشی شناسایی شده و مسیرهای مشخصی برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد که به شرح زیر است:

۱. توزیع فضایی نامتوازن مطالعات

خلاء پژوهشی: بیشتر پژوهش‌ها در استان‌هایی نظیر خوزستان، فارس، همدان، آذربایجان‌های غربی و شرقی و اصفهان متمرکز شده‌اند، در حالی‌که استان‌هایی چون بوشهر، مرکزی، کهگیلویه و بویراحمد و کرمانشاه و سایر استان‌ها به‌شدت کم‌مطالعه هستند.

پیشنهاد: طراحی مطالعات میدانی منطقه‌ای با تمرکز بر ویژگی‌های بومی، اقلیمی و نیازهای خاص این استان‌ها.

۲. فقدان مطالعات طولی برای بررسی پویایی رفتار سازگاری

خلاء پژوهشی: اکثر مطالعات مقطعی هستند و قادر به درک روند تغییرات نگرشی یا رفتاری کشاورزان طی زمان نیستند.

پیشنهاد: اجرای پژوهش‌های پیمایشی طولی برای رصد تغییر رفتار و استراتژی‌های تطبیقی کشاورزان در بازه‌های چندساله.

۳. کم‌توجهی به روش‌های نوین تحلیل داده

خلاء پژوهشی: هنوز از ظرفیت تحلیل‌های پیشرفته چون یادگیری ماشین، داده‌کاوی و مدل‌های هوش مصنوعی برای تحلیل رفتار سازگاری بهره کافی گرفته نشده است.

پیشنهاد: به‌کارگیری الگوریتم‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی رفتارها و تصمیمات کشاورزان بر پایه داده‌های ترکیبی.

۴. غفلت از نقش سرمایه اجتماعی و نهادهای محلی

خلاء پژوهشی: در حالی‌که نهادهای محلی و مشارکت اجتماعی در تاب‌آوری جوامع روستایی نقش کلیدی دارند، این موضوع در بیشتر مطالعات مغفول مانده است.

پیشنهاد: بررسی نقش شبکه‌های اجتماعی، نهادهای مردمی و تعاملات نهادی در ارتقای ظرفیت سازگاری.

۵. توجه ناکافی به گروه‌های آسیب‌پذیر مانند زنان و سالمندان

خلاء پژوهشی: نیازهای خاص و موانع فرهنگی، اقتصادی یا نهادی برای این گروه‌ها هنوز به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است.

پیشنهاد: پژوهش‌های اختصاصی درباره چالش‌ها و توانمندی‌های اقشار خاص با تأکید بر سیاست‌گذاری‌های هدفمند.

۶. نبود چارچوب‌های نظری بومی‌شده یا ترکیبی

خلاء پژوهشی: بیشتر مطالعات به‌طور پراکنده از مدل‌های بین‌المللی استفاده می‌کنند و کمتر تلاشی برای ترکیب یا بومی‌سازی آن‌ها صورت گرفته است.

پیشنهاد: توسعه چارچوب‌های نظری ترکیبی مانند تلفیق نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده[1] (TPB) با چارچوب معیشت پایدار[2] (SLF) متناسب با شرایط ایران.

۷. فقدان ارزیابی سیاست‌ها و برنامه‌های اجرایی موجود

خلاء پژوهشی: اثربخشی برنامه‌های دولتی نظیر بیمه کشاورزی یا طرح‌های آموزشی به‌ندرت به‌طور علمی ارزیابی شده‌اند.

[1] Theory of Planned Behavior (TPB)
[2] Sustainable Livelihood Framework (SLF)

پیشنهاد: تحلیل جامع اثربخشی این سیاست‌ها با رویکردهای ارزیابی کمی و کیفی برای بهبود برنامه‌ریزی.

۸. کمبود مطالعات هزینه–فایده و تحلیل ریسک در راهبردهای سازگاری

خلاء پژوهشی: تصمیم‌گیری بهینه کشاورزان نیازمند اطلاعات دقیق از مزایا و هزینه‌های نسبی راهبردهای مختلف است.

پیشنهاد: انجام تحلیل‌های اقتصادی–اجتماعی نظیر تحلیل ریسک، هزینه–فایده و پایداری مالی راهبردها.

۹. نبود تحلیل‌های جریان‌شناسی دانش و نقشه‌راه علمی در سطح ملی

خلاء پژوهشی: تاکنون هیچ پژوهشی به‌صورت جامع به ترسیم روند علمی، جریان‌های دانشی و خلأهای بنیادین در این حوزه نپرداخته است.

پیشنهاد: انجام تحلیل‌های کلان مانند کتاب‌سنجی، تحلیل شبکه استنادی و نقشه‌برداری دانش برای برنامه‌ریزی علمی کشور در این حوزه.

در نهایت، روشن است که مسیر آینده پژوهش‌های حوزه سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم، نیازمند رویکردی جامع‌نگر، منطقه‌محور و چندرشته‌ای است. تلفیق داده‌های کمّی و کیفی، بهره‌گیری از چارچوب‌های بومی‌سازی‌شده و تمرکز بر عدالت اقلیمی برای گروه‌های آسیب‌پذیر ازجمله الزامات ضروری این مسیر به شمار می‌روند.

References

Amiri, M. J., & Eslamian, S. S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, *3*(4), 208–216. https://doi.org/10.3923/jest.2010.208.216

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007

Arjomandi, P., Yazdanpanah, M., Zobeidi, T., Komendantova, N., & Shirzad, A. (2025). Place attachment, activation of personal norms, and the role of emotions to save water in scarcity. *Environmental and Sustainability Indicators*, *25*, 100567. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100567

Azadi, Y., Yazdanpanah, M., & Mahmoudi, H. (2019). Understanding smallholder farmers' adaptation behaviors through climate change beliefs, risk perception, trust, and psychological distance: Evidence from wheat growers in Iran. *Journal of Environmental Management*, *250*, 109456. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109456

Below, T. B., Mutabazi, K. D., Kirschke, D., Franke, C., Sieber, S., Siebert, R., & Tscherning, K. (2012). Can farmers' adaptation to climate change be explained by socio-economic household-level variables? *Global Environmental Change*, *22*(1), 223–235. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.11.012

Dargahi Maraghe, M., & Keshavarz, M. (2025). Livelihood Vulnerability and Adaptation of Tehran Province'Farm Families to Climate Change: Strategies and Drivers. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, *20*(2), 199-221. https://doi.org/10.22034/iaeej.2024.462375.1804

Delfiyan, F., Yazdanpanah, M., Forouzani, M., & Yaghoubi, J. (2021). Farmers' adaptation to drought risk through farm–level decisions: the case of farmers in Dehloran county, Southwest of Iran. *Climate and Development*, *13*(2), 152-163. https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1737797

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Ghanian, M., Ghoochani, O. M., Dehghanpour, M., Taqipour, M., Taheri, F., & Cotton, M. (2020). Understanding farmers' climate adaptation intention in Iran: A protection-motivation extended model. *Land Use Policy*, 94, 104553.

برخوری

https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104553

Golfam, P., Ashofteh, P. S., Rajaee, T., & Chu, X. (2019). Prioritization of water allocation for adaptation to climate change using multi-criteria decision making (MCDM). *Water Resources Management, 33*, 3401–3416. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02307-7

Goli, I., Kriaučiūnienė, Z., Zhang, R., Bijani, M., Koohi, P. K., Rostamkalaei, S. A., ... & Azadi, H. (2024). Contributions of Climate Smart Agriculture Toward Climate Change Adaptation and Food Security: The Case of Mazandaran Province, Iran. *Trends in Food Science & Technology*, 104653. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104653

Hadi, M., Hashemkhani, M., & Iravani, E. (2022). The trend of scientific research analysis on climate change in Iran. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering (IJEHSE)*, 15(2), 361–378. (In Persian)

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jamshidi, O., Asadi, A., Kalantari, K., Azadi, H., & Scheffran, J. (2019). Vulnerability to climate change of smallholder farmers in the Hamadan province, Iran. *Climate Risk Management*, 23, 146–159. https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.01.002

Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, *17*(1), 1 https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5

Keshavarz, M., & Karami, E. (2016). Farmers' pro-environmental behavior under drought: Application of protection motivation theory. *Journal of Arid Environments*, *127*, 128-136. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.11.010

Keshavarz, M., Karami, E., & Zibaei, M. (2014). Adaptation of Iranian farmers to climate variability and change. *Regional environmental change*, *14*, 1163-1174. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0558-8

Khaleghi, S., Bazazan, F., Madani, S., (2015). The Effects of Climate Change on Agricultural Production and Iranian Economy. *Agricultural Economics Research*, *7*(25), 113-135. (In Persian)

Kheiri, M., Kambouzia, J., Soufizadeh, S., Damghani, A. M., Sayahnia, R., & Azadi, H. (2024). Assessing vulnerability to climate change among farmers in northwestern Iran: A multi-dimensional approach. *Ecological Informatics*, *82*, 102669. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102669

Kumar, M., George, R. J., & PS, A. (2023). Bibliometric analysis for medical research. *Indian Journal of Psychological Medicine*, *45*(3), 277-282. https://doi.org/10.1177/02537176221103617

Kurukulasuriya, P., & Rosenthal, S. (2003). *Climate change and agriculture: A review of impacts and adaptations*. The World Bank.

Ladi, T., Mahmoudpour, A., & Sharifi, A. (2021). Assessing impacts of the water poverty index components on the human development index in Iran. *Habitat International*, 113, 102375. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2021.102375

Malakootikhah, Z., & Farajzadeh, Z. (2020). Climate change impact on agriculture value added. *Agricultural Economics and Development*, *28*(3), 1-30. https://doi.org/10.30490/aead.2020.305725.1093 (In Persian)

Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, *13*(3), 1318. https://doi.org/10.3390/su13031318

Memarbashi, P., Mojarradi, G., & Keshavarz, M. (2022). Climate-smart agriculture in Iran: Strategies, constraints and drivers. *Sustainability*, 14(23), 15573. https://doi.org/10.3390/su142315573

Mendelsohn, R. (2009). The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, *1*(1), 5–19. https://doi.org/10.1080/19390450802495882

Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis.

Scientometrics, 106(1), 213–228. https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5

Naderi, L., Karamidehkordi, E., Badsar, M., & Moghadas, M. (2024). Impact of climate change on water crisis and conflicts: Farmers' perceptions at the ZayandehRud Basin in Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101878. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101878

Nouri, M., Homaee, M., Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2017). Towards shifting planting date as an adaptation practice for rainfed wheat response to climate change. *Agricultural Water Management*, *186*, 108–119. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.004

Pranckutė, R. (2021). Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, 9(1), 12. https://doi.org/10.3390/publications9010012

Savari, M., & Shokati Amghani, M. (2021). Factors influencing farmers' adaptation strategies in confronting the drought in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 4949-4972. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00798-8

Shaffril, H. A. M., Krauss, S. E., & Samsuddin, S. F. (2018). A systematic review on Asian's farmers' adaptation practices towards climate change. *Science of the Total Environment*, *644*, 683–695. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.349

Tanselle, G. T. (2009). *Bibliographical analysis: a historical introduction.* Cambridge University Press.

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). VOSviewer manual. *Leiden: Univeristeit Leiden*, *1*(1), 1-53.

White, M. D., Marsh, E. E., Marsh, E. E., & White, M. D. (2006). Content analysis: A flexible methodology. *Library trends*, *55*(1), 22-45. https://doi.org/10.1353/lib.2006.0053

Yazdanpanah, M., Homayoon, S. B., Zobeidi, T., Woosnam, K. M., Löhr, K., & Sieber, S. (2025). Bridging farmers' non-cognitive and self-conscious emotional factors to cognitive determinants of climate change adaptation in southwest Iran. *Climate and Development*, *17*(2), 119–133. https://doi.org/10.1080/17565529.2024.1944126

Zobeidi, T., Yaghoubi, J., & Yazdanpanah, M. (2022). Farmers' incremental adaptation to water scarcity: An application of the model of private proactive adaptation to climate change (MPPACC). *Agricultural Water Management*, *264*, 107528. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107528

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 95-111 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2026.2077954.1254 **Online ISSN: 2783-4581**

Evaluation and comparison of XBeach, DBN and LightGBM models for predicting flood discharge (Case study: Taleghan Watershed)

Ramtin Tavoosi Rad, Sadaf Piri, Mohammad Ansari ghojghar*

Department of Reclamation of Arid and Mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

*** Corresponding author:** ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(Received: 15 November 2025 Revised: 24 December 2025 Accepted: 15 February 2026)

Extended Abstract

Introduction: In recent decades, the increased intensity and frequency of flood events due to climate change, urbanization, and land degradation have become a major challenge in water resource management. The occurrence of flash floods in mountainous areas of the country, including the Taleghan watershed, results in consequences such as soil erosion, damage to infrastructure and threats to water resources. Therefore, accurate prediction of flood discharge and hydrological behavior of watersheds is essential for timely decision-making in early warning systems and risk management. The present study aimed to evaluate and compare the performance of three models, XBeach, DBN, and LightGBM, in predicting the maximum monthly flood discharge in the Taleghan watershed.

Materials and methods: The data used included time series of monthly discharge from hydrometric stations in the region over several consecutive years. To evaluate the effect of temporal memory, four different seasonal combinations were designed, including lags of one to four seasons (each season consisting of three months) in the discharge modeling. After preprocessing, standardization and separation into training and test sets, the data were analyzed within the framework of the three models using the R programming software. The physical model XBeach was analyzed as a process-based baseline, while the DBN model was implemented using the structure of dynamic Bayesian networks and probabilistic hidden layers to represent temporal dependencies of the data. The LightGBM model was designed as a gradient boosting tree, with optimization of learning parameters and non-surface growth of trees. The performance of the models was evaluated using the statistical indices NSE, RMSE, MAE and the correlation coefficient (R).

Results and Discussion: The results showed that the LightGBM model had a significantly better performance than the other two models in all stations and in all temporal combinations. With NSE values ranging from 0.908 to 0.931 and correlation coefficient between 0.896 and 0.918, this model showed the highest degree of agreement with the observed data. Also, the RMSE error values for the LightGBM model at the studied stations ranged from 0.079 to 0.131, indicating the high accuracy of the model in predicting the maximum monthly discharge. The DBN model provided good performance with NSE values between 0.864 and 0.896 and correlation coefficient 0.816 to 0.832, while the XBeach numerical model with NSE values of 0.834 to 0.862 and correlation of 0.807 to 0.823 had lower accuracy than the two data-driven models. Despite the relative superiority of the DBN model over XBeach, the performance difference between the two models was not statistically significant in most temporal combinations. Given the complexity of the network structure and the higher computational cost of DBN, the use of the XBeach model is suggested as a more practical option in the second rank. In addition, the ability of the LightGBM model to reproduce seasonal fluctuations and strong flow trends was more significant than other models. The DBN model also performed better compared to XBeach, but the statistical difference resulting from the evaluation criteria between the two models was not significant in most combinations. Considering the complexity of the network structure, high computation time, and cost of adjusting DBN parameters, the use of the XBeach numerical model is recommended as a more economically and practically efficient option. In contrast, the ability of LightGBM to combine nonlinear features of input data and learn complex patterns made this model the most accurate and stable option for flow prediction.

Conclusion: Correlation analyses between observational and predicted data showed that the points resulting from the LightGBM model had the highest density along the one-to-one correlation line and showed the least dispersion, while the XBeach and DBN models had more deviation from the correlation line. These findings are consistent with recent studies that have reported the effectiveness of gradient boosting algorithms in flow and flood prediction. Overall, the findings of this study suggest that the use of lightweight and fast data-driven models such as LightGBM can play an important role in the development of flood forecasting systems in mountainous basins such as Taleghan. High accuracy, fast update capability, low computational requirements, and the possibility of integrating with remote sensing data make this model a suitable option for use in early warning systems and intelligent water resource management. The main innovation of this research is to provide a quantitative and systematic comparison between lightweight data-driven models, deep learning, and physical process models for predicting the maximum monthly discharge, as well as analyzing the sensitivity of their performance to the input temporal memory length, which leads to the presentation of an operational decision-making framework based on accuracy and computational cost.

Keywords: Data Driven Models, Deep Learning, Flood Warning System, Machine Learning.

Citation: TavoosiRad, R., Piri, S. & Ansari ghojghar, M. (2026). Evaluation and comparison of XBeach, DBN and LightGBM models for predicting flood discharge (Case study: Taleghan Watershed). *Integrated Watershed Management*, 6(3), 95-111. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077954.1254

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۱۱-۹۵) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2077954.1254

مقایسه عملکرد مدل‌های XBeach، LightGBM و DBN به‌منظور پیش‌بینی سیلاب (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز طالقان)

رامتین طاوسی‌راد، صدف پیری، محمد انصاری قوجقار*

گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

***نویسنده مسئول:** ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶)

چکیده مبسوط

مقدمه: در دهه‌های اخیر، افزایش شدت و فراوانی رخدادهای سیلابی به‌دلیل تغییرات اقلیمی، رشد شهرنشینی و تخریب اراضی به یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز و آبخیزداری شهری تبدیل شده است. وقوع سیلاب‌های ناگهانی در حوزه‌های کوهستانی کشور ازجمله حوزه آبخیز طالقان، پیامدهایی نظیر فرسایش خاک، آسیب به زیرساخت‌ها و تهدید منابع آبی را در پی دارد. در این میان، پیش‌بینی دقیق دبی سیلاب و رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز، لازمه تصمیم‌گیری به‌موقع در سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت ریسک است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه عملکرد سه مدلXBeach، DBN و LightGBM به‌مظور پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه سیلاب در حوزه آبخیز طالقان انجام گرفت.

موادوروش‌ها: داده‌های مورد استفاده شامل سری‌های زمانی دبی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه طی دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۰–۱۳۷۱) بود. برای ارزیابی اثر حافظه زمانی، چهار ترکیب فصلی مختلف طراحی شد که به‌ترتیب شامل تأخیرهای یک تا چهار فصل (هر فصل سه ماهه) در مدل‌سازی دبی بودند. داده‌ها پس از پیش‌پردازش، استانداردسازی و تفکیک به مجموعه‌های آموزش (۸۰ درصد) و آزمون (۲۰ درصد) در قالب سه مدل در نرم‌افزار برنامه نویسی R مورد بررسی قرار گرفتند. مدل فیزیکی XBeach به‌عنوان پایه فرآیندی تحلیل شد درحالی‌که مدل DBN با استفاده از ساختار شبکه‌های بیزین دینامیکی و لایه‌های پنهان احتمالاتی به‌منظور بازنمایی وابستگی‌های زمانی داده‌ها پیاده‌سازی گردید. مدل LightGBM نیز به‌صورت گرادیان تقویتی درختی و با بهینه‌سازی پارامترهای یادگیری و رشد غیرسطحی درختان طراحی شد. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری NSE، RMSE، MAE و ضریب همبستگی (R) انجام پذیرفت.

نتایج و بحث: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل LightGBM در تمامی ایستگاه‌ها و در تمام ترکیب‌های زمانی به‌طور محسوس عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر داشته است. این مدل با ثبت مقادیر شاخص نش- ساتکلیف در بازه ۰/۹۰۸ تا ۰/۹۳۱ و ضریب همبستگی بین ۰/۸۹۶ تا ۰/۹۱۸، بالاترین میزان انطباق با داده‌های مشاهده‌شده را نشان داد. همچنین مقادیر خطای RMSE برای مدل LightGBM در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه ۰/۰۷۹ تا ۰/۱۳۱ قرار داشت که بیان‌گر دقت بالای مدل در پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه است. مدل DBN عملکرد خوبی با مقادیر نش-ساتکلیف بین ۰/۸۶۴ تا ۰/۸۹۶ و ضریب همبستگی ۰/۸۱۶ تا ۰/۸۳۲ ارائه داد در حالی که مدل عددی XBeach با ثبت مقادیر نش- ساتکلیف ۰/۸۳۴ تا ۰/۸۶۲ و همبستگی ۰/۸۰۷ تا ۰/۸۲۳ دقت پایین‌تری نسبت به دو مدل داده‌محور داشت. با وجود برتری نسبی مدل DBN نسبت به XBeach، اختلاف عملکرد این دو مدل در اغلب ترکیب‌های زمانی از نظر آماری معنی‌دار نبود. علاوه بر این، توانایی مدل LightGBMدر بازتولید نوسانات فصلی و روندهای شدید جریان نسبت به سایر مدل‌ها چشم‌گیرتر بود. مدل DBN نیز در مقایسه با XBeach عملکرد بهتری داشت اما اختلاف آماری حاصل از معیارهای ارزیابیِ میان این دو مدل در اکثر ترکیب‌ها قابل‌توجه نبود. با توجه به پیچیدگی ساختار شبکه‌ای، زمان محاسبات بالا و هزینه تنظیم پارامترهای DBN، استفاده از مدل عددی XBeach به‌عنوان گزینه‌ای کارآمدتر از نظر اقتصادی و اجرایی توصیه می‌شود. در مقابل، توانایی LightGBM در ترکیب ویژگی‌های غیرخطی داده‌های ورودی و یادگیری الگوهای پیچیده سبب شد تا این مدل به‌عنوان دقیق‌ترین و پایدارترین گزینه برای پیش‌بینی جریان معرفی گردد.

نتیجه‌گیری: بررسی‌های همبستگی میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده نشان داد که نقاط حاصل از مدل LightGBM بیش‌ترین تراکم را در امتداد خط همبستگی یک‌به‌یک داشته و کم‌ترین پراکندگی را نشان می‌دهند در حالی‌که مدل‌های XBeach و DBN انحراف بیش‌تری از خط همبستگی داشتند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات اخیر که کارایی الگوریتم‌های گرادیان تقویتی در پیش‌بینی جریان و سیلاب را گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد. در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر بیان‌گر آن است که با بهره‌گیری از مدل‌های داده‌محور سبک و سریع مانند LightGBM می‌توان باعث توسعه سامانه‌هایِ پیش‌بینیِ سیلاب در حوضه‌های کوهستانی نظیر طالقان شد. دقت بالا، قابلیت به‌روزرسانی سریع، نیاز محاسباتی پایین و امکان ادغام با داده‌های سنجش‌ازدور این مدل را به گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در سامانه‌هایِ هشدارِ سریع و مدیریتِ هوشمندِ منابع آب تبدیل کرده است. با توجه به پیچیدگی ساختار شبکه‌ای و هزینه محاسباتی بالاتر DBN، استفاده از مدل XBeach به‌عنوان گزینه‌ای اجرایی‌تر در رتبه دوم پیشنهاد می‌شود. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک مقایسه کمی و سیستماتیک بین مدل‌های داده‌محور سبک، یادگیری عمیق و مدل فرآیندی فیزیکی برای پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه و همچنین تحلیل حساسیت عملکرد آن‌ها نسبت به طول حافظه زمانی ورودی‌ها است که منجر به ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری عملیاتی مبتنی بر دقت و هزینه محاسباتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سامانه‌های هشدار سیلاب، مدل‌های داده‌محور، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق

استناد: طاوسی راد، ر.، پیری، ص.، و انصاری قوجقار، م. (۱۴۰۵). مقایسه عملکرد مدل‌های XBeach، LightGBM و DBN به‌منظور پیش‌بینی سیلاب (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز طالقان). *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۱۱-۹۵. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077954.1254

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

تغییرات اقلیمی و رشد شهرنشینی ریسک وقوع سیلاب‌های ناگهانی و شدتِ دبی بیشینه را افزایش داده‌اند و بنابراین پیش‌بینی دقیقِ دبی بیشینه ماهانه برای مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری سریع عملیاتی ضروری است (Kuhaneswaran *et al.*, 2025). تحقیقات نشان داده‌اند که وقوع دبی‌های شدید می‌تواند تحت تأثیر تغییرات کوچک در الگوی بارش باشد به‌طوری که عدم دقت در پیش‌بینی بارش یا تاخیر زمانی اندک می‌تواند منجر به اشتباهات بزرگ در برآورد دبی سیلاب گردد (Okacha *et al.*, 2024). در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در حوضه‌هایی که ایستگاه‌های محدودی در آن وجود دارد، شبکه‌های سنجش هیدرولوژیکی و باران‌سنجی به‌صورت پراکنده یا ناکافی هستند که این وضعیت به کاهش دقت پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه منجر می‌شود (Brunner *et al.*, 2021). علاوه بر کمبود داده، اطلاعات دریافتی اغلب با خطا، افت زمانی، نویز و ناسازگاری مواجه‌اند. این چالش‌های کیفیت داده ازجمله خرابی سنسورها، نبود همزمانی زمانی و داده‌های گمشده موجب می‌شوند تا مدل‌های پیش‌بینی، علی‌رغم طراحی پیچیده و دقیق، عملکرد واقعی دور از واقعیت داشته باشند (Yu *et al.*, 2025). ماهیت غیرخطی و چندعاملی فرآیند تولید سیلاب و انتقال آن در شبکه‌ی هیدرولوژیک از دلایل مهم کارکرد ناموفق مدل‌های پیش‌بینی هستند. پارامترهای تأخیر زمانی، تغییرات فضاییِ ناهمگن در بارش و کارایی زهکشی، نفوذپذیری خاک، پوشش زمین، ساختار شبکه رودخانه‌ای و بازتاب‌های جریان برگشتی در زمان اوج به هم وابسته‌اند. مدل‌های ساده اغلب قادر به لحاظ کردن این تعاملات پیچیده به‌صورت کامل و دقیق نیستند (Mahmood *et al.*, 2025). در نهایت، اکثر مدل‌های موجود فقط بر تخمین نقطه‌ای تمرکز دارند اما در مدیریت احتمال وقوع سیلاب، ارائه بازه اطمینان و بیان ریسک ناشی از خطا برای تصمیم‌گیرندگان بسیار حیاتی است تا بتوانند سناریوهای محتمل را پیش‌بینی کرده و اقدامات لازم را در زمان وقوع هریک از سناریوها در نظر بگیرند (Roohi *et al.*, 2025). در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی به‌منظور به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق را برای پیش‌بینی جریان‌های رودخانه‌ای و سری‌های زمانی هیدرولوژیک بررسی کرده‌اند. برای مثال Alizadeh و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با هدف پیش‌بینی دبی ماهانه رودخانه، عملکرد چندین الگوریتم یادگیری ماشین ازجمله (ANN)[1] و مدل‌های رگرسیونی را ارزیابی کردند و نشان دادند که مدل‌های داده‌محور قادرند روابط غیرخطی موجود در سری‌های زمانی دبی ماهانه را با دقت بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک بازنمایی کنند. Nakhaei و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی بر روی حوزه آبخیز رودخانه زرینه در ایران، مدل‌های شبکه‌های بازگشتی[2] و حافظه طولانی-کوتاه‌مدت را برای پیش‌بینیِ دبیِ ماهانه توسعه دادند و نشان دادند که انتخاب ساختار مناسب شبکه و متغیرهای ورودی تأثیر معناداری بر دقت پیش‌بینی دارد؛ به‌طوری‌که برخی ساختارهایِ پیشنهادیِ آن‌ها مقادیر بالای شاخص‌های NSE و R را در دوره‌های اعتبارسنجی مستقل ثبت کردند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهدکه اگرچه پژوهش‌هایی از مدل‌هایِ یادگیریِ ماشین، یادگیری عمیق و مدل‌های فرآیندی برای پیش‌بینی جریان رودخانه استفاده کرده‌اند اما مقایسه هم‌زمان و کمی سه مدل مورد پژوهش به‌منظور پیش‌بینیِ دبیِ بیشینه ماهانه با در نظر گرفتن اثر حافظه زمانی و کارایی عملیاتی به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی ایران، تاکنون به‌طور جامع بررسی نشده است. شبکه‌های بیزی پویا (DBN)[3] به‌عنوان چارچوبی احتمالاتی شناخته می‌شوند که توانایی مدل‌سازی

1. Artificial Neural Networks
2. Recurrent Neural Network
3. Dynamic Bayesian Networks

وابستگی‌های زمانی و عدم قطعیت‌های سیستم‌های هیدرولوژیک را دارند (Chang *et al.*, 2023). پژوهش‌های قبلی نشان داده‌اند که مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های بیزی می‌توانند به‌طور مؤثری اطلاعات پیش‌بینی هواشناسی و هیدرولوژیکی را ترکیب کرده و برآوردهای دبی سیلاب را بهبود بخشند (Goodarzi *et al.*, 2019). شبکه‌های عمیقِ اعتقادی[۴]، انواع دیگر شبکه‌های عمیق (DN)[۵] و دیگر روش‌های یادگیری عمیق[۶] در مطالعات اخیر برای تخمین جریان‌های آتی و استخراج الگوهای پیچیده زمانی از داده‌های هیدرومتریک با نتایج امیدوارکننده به‌کار رفته‌اند (Nayak *et al.*, 2022). شبیه‌سازی‌های فرآیندمحورِ هیدرودینامیکی مانند XBeach قادرند فیزیکِ جریان‌های نزدیک‌ساحل، انتقال رسوب و پاسخ مورفودینامیک را پیش‌بینی کرده و هنگامی که با داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی ترکیب شوند، پایه‌ی فیزیکی دقیقی برای برآورد دبی فراهم می‌آورند (Roelvink *et al.*, 2009). الگوریتم‌های سبکِ گرادیانت‌بوس مانند LightGBM[۷] به الگوریتم‌های درخت تصمیم تعلق دارد و در حل و رگرسیون مسائل طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است (Gan *et al.*, 2021). این الگوریتم‌ها به‌خاطر سرعت آموزش، کارایی در تجزیه تحلیل داده‌های بزرگ و عملکرد بالای پیش‌بینی، گزینه‌ی مناسبی برای یادگیری رابطه‌ی غیرخطی بین متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و دبیِ خروجی هستند (Ke *et al.*, 2017).

اگرچه تاکنون مدل‌های گوناگونی برای پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه و برآورد سیلاب در حوزه‌های آبخیز ایران و سایر مناطق جهان به‌کار گرفته شده‌اند اما اغلب این مدل‌ها فیزیکی بوده و یا نیاز بالا به داده‌های دقیق تمرکز داشته‌اند و مدل‌های یادگیری ماشین بدون در نظر گرفتن ساختارهای زمانی و فصلی به کار گرفته شده‌اند. ازاین‌رو در بسیاری از موارد، پویایی زمانی سیستم‌های هیدرولوژیک و اثر تأخیر فصلی بر رفتار دبی به‌صورت جامع بررسی نشده است. از سوی دیگر، کاربرد هم‌زمان مدل‌های داده‌محور پیشرفته مانند LightGBM و DBN در کنار مدل فیزیکی XBeach به‌منظور تحلیل و پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه در حوزه‌های کوهستانی کشور به‌ویژه در حوزه آبخیز طالقان تاکنون گزارش نشده است. هدف از انجام این پژوهش، پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه به‌عنوان یک شاخص نماینده از رفتار سیلابی رودخانه در مقیاس زمانی ماهانه است. دبی بیشینه ماهانه به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب و تحلیل ریسک سیلاب در مقیاس‌های میان‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد و قادر است نوسانات سیلابی حوضه را در بازه‌های زمانی بزرگ‌تر منعکس نماید. اکنون نیاز روزافزون به مدل‌هایی است که ضمن برخورداری از دقت بالا، قابلیت اجرا و بروزرسانی سریع در سامانه‌های هشدار سیلاب داشته باشند. رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق، ضمن پاسخ‌گویی به این نیاز می‌تواند به عنوان الگویی برای توسعه مدل‌های هوشمند و کارآمد در مدیریت منابع آب کشور مورد استفاده قرار گیرد.

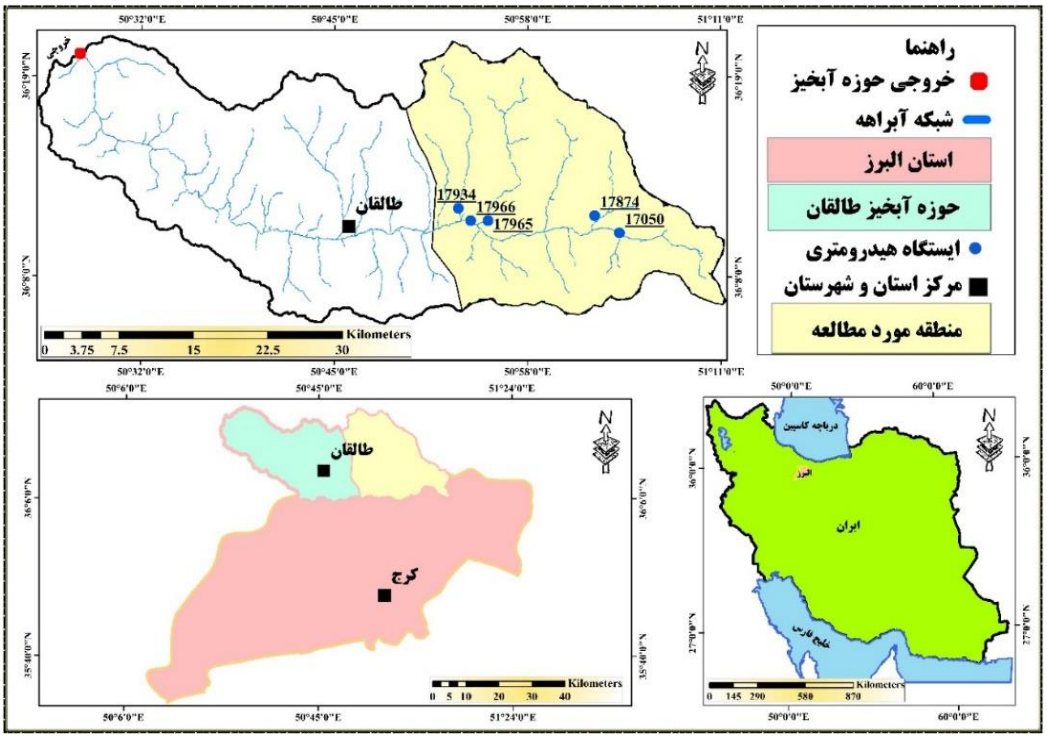
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و منابع داده‌ای

حوزه آبخیز طالقان در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز و در شمال‌غرب شهرستان کرج واقع شده و یکی از زیرحوضه‌های کلیدی و بالادستی حوزه آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌آید. این حوزه بین عرض‌های جغرافیایی ′۰۵ °۳۶ تا ′۲۰ °۳۶ شمالی و طول‌های ′۳۹ °۵۰ تا ′۱۱ °۵۱ شرقی قرار دارد (شکل ۱) و مساحت آن حدود ۱۲۴۳ کیلومترمربع برآورد می‌شود. فاصله این حوضه تا مرکز استان البرز (شهر کرج) حدود ۱۰۵ کیلومتر و تا شمال‌غرب تهران نزدیک به ۱۲۰ کیلومتر است. موقعیت کوهستانی، اختلاف ارتفاع زیاد و الگوی بارش

4. Deep Belief Networks
5. Deep Networks
6. Deep Learning
7. Light Gradient-Boosting Machine

نامنظم از عوامل اصلی در ناپایداری‌های هیدرولوژیکی و بروز سیلاب‌های فصلی در این حوزه محسوب می‌شوند (Ebrahimi *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر از داده‌های دبی بیشینه روزانه پنج ایستگاه هیدرومتری فعال در محدوده حوضه طالقان طی دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۰–۱۳۷۱) استفاده گردید که جدول ۱، مشخصات این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - منطقه حوزه آبخیز طالقان و ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه

Figure 1- Taleghan watershed area and hydrometric stations studied

جدول ۱ – مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه حوزه‌آبخیز طالقان

Table 1 - Characteristics of the hydrometric stations studied in the Taleghan watershed

شماره ردیف	کد ایستگاه	نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی (درجه دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه دقیقه)	نام رودخانه
1	17050	گته ده	2353	51°-03′	36°-10′	شاهرود
2	17874	دهدر	2268	50°-12′	36°-10′	دهدر
3	17965	مهران جوستان	2049	50°-54′	36°-10′	شاهرود
4	17966	جوستان	1979	50°-54′	36°-10′	شاهرود
5	17934	علیزان جوستان	1953	50°-53′	36°-11′	شاهرود

مدل عددیِ شبیه‌ساز فرایندهای ساحلی (Xbeach)

XBeach یک مدل فرآیندی کد باز است که برای مدل‌سازی پاسخ سواحل و نواحی نزدیک به ساحل در شرایط طوفانی طراحی شده و قادر است مکانیک موج‌شکنی، جریان‌های سطحی و تغییرات مورفودینامیکی را شبیه‌سازی کند (Roelvink *et al.*, 2009). گروه‌های موج را با استفاده از میانگین‌گیری موج کوتاه شبیه‌سازی می‌کند و به کاربران گزینه‌هایی برای انتخاب از حالت موج ثابت، حالت موج‌ضربه‌ای و حالت غیر هیدرواستاتیک را می‌دهد. معادلات آب کم‌عمق از فرمول میانگین لاگرانژی تعمیم‌یافته برای

تبدیل جریان‌های ناشی از موج و جریان‌های زیرسطحی استفاده می‌کنند. روابط بین سرعت لاگرانژی u^L، سرعت اویلری u^E و سرعت استوکس u^S در معادله مومنتوم و معادله پیوستگی به صورت رابطه (۱) و (۲) نشان داده شده است (Roelvink *et al.*, 2010):

$$u^L = u^E + u^S \quad (۱)$$

$$v^L = v^E + v^S \quad (۲)$$

که در آن u^S و v^S به ترتیب مؤلفه‌های رانش در جهت‌های x و y هستند.

مدل انتقال رسوب از معادله همرفت پخش میانگین عمقی استفاده می‌کند و در رابطه (۳) مشخص شده است:

$$\frac{\partial hC}{\partial t}+\frac{\partial hCu^E}{\partial x}+\frac{\partial hCv^E}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h h\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_h h\frac{\partial C}{\partial y}\right)=\frac{hCeq-hC}{T_s} \quad (۳)$$

که در آن C نشان دهنده غلظت رسوب میانگین عمقی است. Ceq به غلظت رسوب تعادلی (بار معلق یا بار بستر) اشاره دارد. D_h ضریب انتشار رسوب، T_s زمان انطباق مورد استفاده برای نشان دادن میزان جذب رسوب است و می‌توان آن را با عمق h و سرعت ته‌نشینی رسوب تقریب زد. همچنین h نشان دهنده عمق آب و ω_s نشان دهنده سرعت ته نشینی رسوب است (Gai *et al.*, 2025) که در رابطه (۴) قابل مشاهده است:

$$T_s = max\left(0.05\frac{h}{\omega_s}, 0.2\right)s \quad (۴)$$

اگرچه مدل XBeach در اصل برای شبیه‌سازی فرآیندهای ساحلی توسعه یافته است اما در پژوهش حاضر از این مدل به‌عنوان یک ابزار عددی هیدرودینامیکی برای شبیه‌سازی پاسخ جریان در شرایط سیلابی استفاده شده است. در این راستا، پارامترهای مرتبط با موج و مورفودینامیک غیرفعال شده و تمرکز مدل بر حل معادلات جریان کم‌عمق در بستر رودخانه‌ای قرار گرفته است. بدین ترتیب، خروجی XBeach به‌عنوان یک مدل فیزیکی مرجع برای مقایسه عملکرد با مدل‌های داده‌محور مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، داده‌های هیدرولوژیکی حوضه کوهستانی طالقان شامل دبی بیشینه ماهانه به‌عنوان شرایط مرزی ورودی مدل XBeach مورد استفاده قرار گرفتند. بدین منظور، مدل در حالت هیدرودینامیکی ساده‌شده اجرا شد و مؤلفه‌های مرتبط با موج‌سازی، مورفودینامیک و فرآیندهای ساحلی غیرفعال گردیدند. شبکه محاسباتی مدل بر اساس هندسه ساده‌شده بستر رودخانه‌ای تعریف و دبی‌های مشاهده‌ای به‌صورت هیدروگراف جریان در مرز بالادست اعمال شدند. خروجی مدل، شامل تغییرات تراز آب و سرعت جریان به‌عنوان پاسخ عددی سیستم برای مقایسه با مدل‌های داده‌محور مورد استفاده قرار گرفت.

مدل یادگیری ماشین تقویت گرادیانی سبک (LightGBM)

این الگوریتم مبتنی بر بافت‌نگار[8]، سرعت آموزش را افزایش داده و مصرف حافظه را توسط استراتژی رشد برگ به برگ درختان با حداکثر محدودیت عمق کاهش می‌دهد. طبق استراتژی رشد سطح به سطح، برگ‌های روی یک لایه به طور همزمان تقسیم می‌شوند. برگ‌های روی یک لایه به طور نامتمایز رفتار می‌شوند در حالی که بهره اطلاعات متفاوتی دارند. بهره اطلاعات نشان‌دهنده کاهش مورد انتظار در آنتروپی ناشی از تقسیم گره‌ها بر اساس ویژگی‌ها است که در رابطه ۵ و ۶ نمایش داده شده است:

$$lg(B,V) = En(B) - \sum_{v\epsilon(V)}\frac{|B_V|}{B}En(B_V) \quad (۵)$$

$$En(B) = \sum_{d=1}^{D} -p_{d\log 2}\, p_{d'} \quad (۶)$$

که در آن $En(B)$ آنتروپی اطلاعات مجموعه B است. p_d آنتروپی اطلاعات مجموعه B است. D تعداد دسته‌ها است. v مقدار ویژگی V است و B_V زیرمجموعه‌ای از

8. Histogram

B است که برای آن ویژگی مقدار V دارد (Szczepanek, 2022).

مدل LightGBM در پژوهش حاضر با استفاده از پیاده‌سازی استاندارد و با هدف یادگیری روابط غیرخطی بین داده‌های دبی ماهانه آموزش داده شد. برای بهبود عملکرد مدل، تنظیم پارامترهای اصلی شامل تعداد درخت‌ها، عمق بیشینه درخت و نرخ یادگیری به‌صورت آزمون و خطا و بر اساس کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی در دوره آموزش انجام شد. داده‌ها به‌صورت زمانی به دو بخش آموزش (۸۰ درصد) و آزمون (۲۰ درصد) تقسیم شدند تا ترتیب زمانی سری حفظ شود. به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش، عملکرد مدل در مرحله آزمون مستقل ارزیابی و شاخص‌های آماری بر اساس داده‌های آزمون گزارش گردیدند.

مدل یادگیری عمیق شبکه باور عمیق (DBN)

مدل یادگیریِ عمیقِ شبکه باور عمیق، ساختاری گرافیکی برای مدل‌سازی وابستگی‌های زمانیِ متغیرهای تصادفی است؛ این مدل قادر است وابستگی‌های درون برش و بین برش را مدل‌سازی کند و به‌راحتی مشاهدات چندمنبعی را با توزیع‌های احتمالاتی تلفیق نماید (Murphy & Weiss, 2013). مدل یادگیریِ عمیقِ شبکه باور عمیق به عنوان بسطی از شبکه باور، مدل‌سازی محیطی را قادر می‌سازند تا بر این ضعف غلبه کرده و فرآیندهای پویا را مدل‌سازی کند و بنابراین تکامل یک فرآیند محیطی را در طول زمان مشخص کند. روابط زمانی و کشف الگو را از طریق برش زمانی در ثبت پیچیدگی و ماهیت متغیر یک مسئله نشان می‌دهند. برنامه‌های مدل‌سازی اکولوژیکی و محیطی با استفاده از این مدل کمیاب هستند. به این دلیل است که الگوریتم‌های مدل یادگیریِ عمیقِ شبکه باور عمیق در بسته‌های نرم‌افزاری تجاری محبوب کمتر در دسترس هستند و کم‌تر پشتیبانی می‌شوند (Chang *et al.*, 2023).

ویژگی تعریف‌کننده‌ی شبکه‌های باور عمیق، مدل‌سازی وابستگی Xi(t)، برای هر i، به سایر کمیت‌ها است یعنی تعریف تکامل فرآیند تصادفی X(t) → X(t + 1). به طور رسمی برای هسته‌ی احتمال که تکرارهای فرآیند تصادفی را تعریف می‌کند، وابستگی باید مارکوفی باشد با اثرات خودرگرسیونی با تأخیر زمانی اضافی که در رابطه (۷) نمایش داده شده است:

$$p(X_i(t+1) \in A) = f_i\big(X(t), X_{j\neq i}(t+1), \{X_i(t-\tau)\}\tau = 1, \dots, p, Z\big) \quad (۷)$$

که در آن A مجموعه‌ای در جبر σ بورل X است. یعنی، هسته گذار می‌تواند به وضعیت فعلی سایر متغیرهای تصادفی، مقادیر متغیرهای تصادفی در زمان قبل، متغیرهای مستقل از زمان Z و همچنین احتمالاً یک اثر خودرگرسیونی از طریق وابستگی به وابسته باشد (Kungurtsev *et al.*, 2024).

یک مدل شبکه باور عمیق در قالب دو متغیر تعریف می‌شود که در آن یک شبکه باور است که احتمال پیشین را تعریف می‌کند و شبکه بیزینِ زمانیِ دوبخشی (TBN2) که با استفاده از یک گراف نظارت‌شده بدون حلقه (Graph Acyclic Directed) به شکل رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$P(Z_t|Z_{t-1}) = \prod_{i=1}^{N} P\left(Z_t^i | P_a\left(Z_t^i\right)\right) \quad (۸)$$

که در آن Z_t^i، i مین گره در زمان t است و $P_a\left(Z_t^i\right)$ والدین Z_t^i در گراف هستند. گره‌ها در بخش اول از یک شبکه بیزینِ زمانیِ دوبخشی، هیچ پارامتر مرتبطی با آن‌ها ندارند اما هر گره در بخش دوم یک ارتباط توزیع احتمال شرطی دارند که را برای همه t>1 تعریف می‌کند (Ebrahimi *et al.*, 2018).

در این پژوهش، مدل شبکه باور عمیق به‌صورت یک ساختار چندلایه شامل یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی پیاده‌سازی شد. تعداد نورون‌های لایه‌های پنهان به‌صورت آزمون و خطا و با هدف کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی تعیین گردید. فرآیند آموزش شبکه شامل دو مرحله پیش‌آموزش بدون نظارت با استفاده از ماشین بولتزمن محدود (RBM) و تنظیم نهایی وزن‌ها به‌صورت نظارت‌شده با الگوریتم

پس‌انتشار خطا بود. تابع فعال‌سازی سیگموئید برای لایه‌های پنهان و تابع خطی برای لایه خروجی مورد استفاده قرار گرفت. پیاده‌سازی مدل DBN در محیط نرم‌افزاری R انجام شد.

مدل‌های پیش‌بینی

به‌منظور پیش‌بینی سیلاب، سه مدل عددی، یادگیری ماشین و یادگیریِ عمیقِ LightGBM، Xbeach و DBN مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفتند. سپس با استفاده از شاخص‌های ارزیابی دقت، مناسب‌ترین مدل برای هر پیش‌بینی انتخاب شد. در این فرآیند، تعداد فصل‌های گذشته به عنوان عامل اصلی برای پیش‌بینی ماه آتی در نظر گرفته شد که شامل یک، دو، سه یا چهار فصل قبل از داده‌های دبی بیشینه متوسط ماهانه بود. در ترکیب اول، پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه برای ماه بعدی با تکیه بر سری زمانی دبی با یک فصل تأخیر انجام شد. به این صورت که برای برآورد در زمان $(t+1)$، از مقدار دبی در زمان (t) استفاده گردید. در ترکیب دوم، پیش‌بینی ماه آتی بر اساس داده‌های دبی تا دو فصل پیشین صورت گرفت، در ترکیب سوم، پیش‌بینی ماه آتی بر اساس داده‌های دبی تا سه فصل پیشین صورت گرفت و در ترکیب چهارم، پیش‌بینی ماه آتی بر اساس داده‌های دبی تا ۴ فصل یا یک‌سال پیشین صورت گرفت. مدل‌های پیش‌بینی به‌صورت ترکیب‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است:

ترکیب ۱) $Q_{(t+1)} = f(Q_{(t)})$

ترکیب ۲) $Q_{(t+1)} = f(Q_{(t)}, Q_{(t-1)})$

ترکیب ۳) $Q_{(t+1)} = f(Q_{(t)}, Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)})$

ترکیب ۴) $Q_{(t+1)} = f(Q_{(t)}, Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}, Q_{(t-3)})$

معیارهای ارزیابی مدل

در پژوهش حاضر برای مقایسه نتایج و ارزیابی مدل‌ها از چهار معیار اصلی استفاده گردید. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): میزان پراکندگی خطا بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده را بیان می‌کند.. مقدار کمتر به معنی دقت بالاتر مدل است و این معیار با رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o_i - f_i)^2} \quad (۹)$$

در روابط ۵ تا ۸، f_i مقادیر پیش‌بینی شده در گام زمانی i ام، o_i مقادیر مشاهداتی در گام زمانی i ام، $\bar{f}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده، n تعداد داده‌ها و $\bar{o}$ میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

میانگین قدر مطلق خطا (MAE): این معیار متوسط مقدار مطلق اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد و با رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|o_i - f_i| \quad (۱۰)$$

شاخص کارایی نش- ساتکلیف (NS): نشان‌دهنده میزان انطباق مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده است و مقدار آن بین منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. مقدار نزدیک به ۱ بیان‌گر عملکرد بسیار خوب مدل است و با رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{o} - o_i)^2} \quad (۱۱)$$

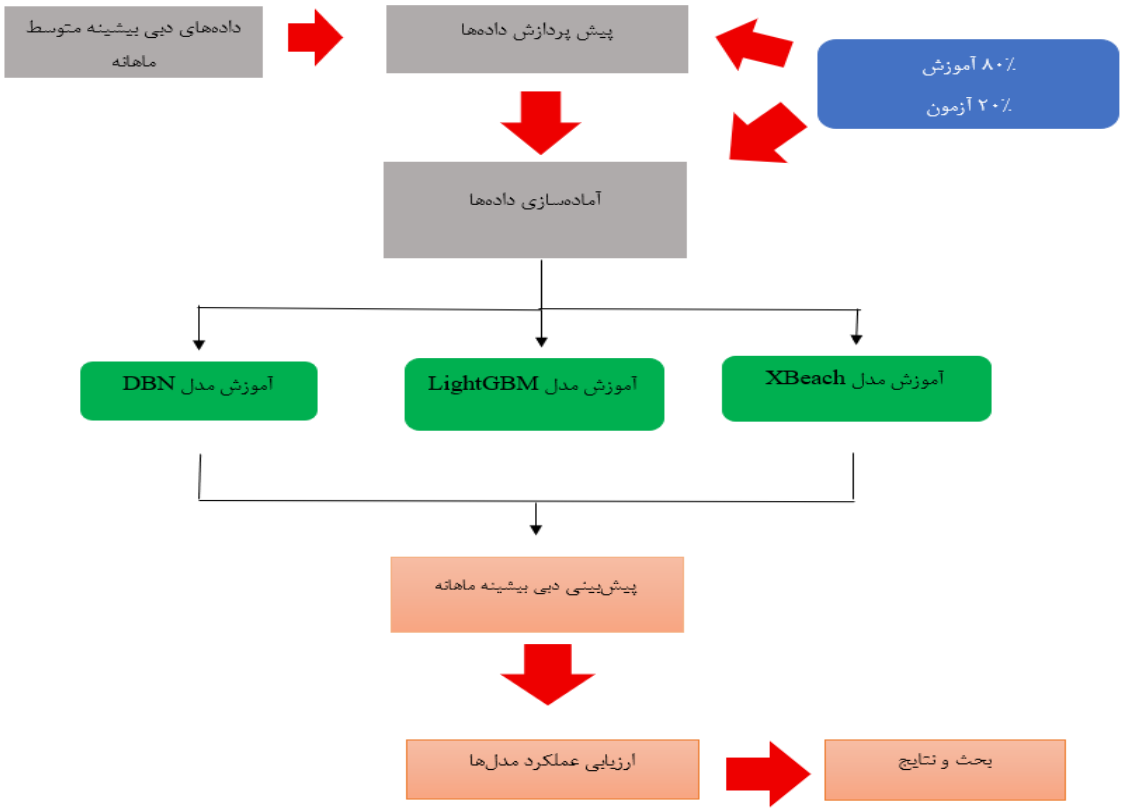
ضریب همبستگی (R): این شاخص میزان رابطه خطی بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده را مشخص می‌کند. مقدار آن در بازه {۱- تا ۱} قرار دارد و مقدار نزدیک به ۱ بیان‌گر همبستگی مثبت قوی است. با کمک رابطه ۱۲ ضریب همبستگی محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(f_i - \bar{f})^2}} \quad (۱۲)$$

به‌منظور ارزیابی پایداری و قابلیت تعمیم مدل‌ها از روش صحت‌سنجی متقاطع زمانی استفاده شد. در این روش، داده‌های دبی بیشینه ماهانه با حفظ ترتیب زمانی به چندین بازه آموزش و آزمون تقسیم شدند. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده برای هر تکرار محاسبه شده و میانگین عملکرد مدل‌ها به‌عنوان معیار نهایی گزارش شد.

مراحل انجام پژوهش

پژوهش حاضر به‌منظور مقایسه سه مدل عددی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیقِ Xbeach، LightGBM و DBN در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب در منطقه طالقان صورت گرفت. در ابتدا داده‌های موردنیاز دبی بیشینه متوسط ماهانه برای پنج ایستگاه هیدرومتری منطقه طالقان تهیه گردید و سپس با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی R، دبی بیشینه ماهانه سیلاب استخراج و به‌عنوان خروجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور پیاده‌سازی و ارزیابی مدل‌ها، داده‌های دبی بیشینه ماهانه به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند. به‌گونه‌ای که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند آموزش مدل‌های داده‌محور شامل تنظیم پارامترهای داخلی به‌منظور کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی در دوره آموزش بود. برای جلوگیری از بیش‌برازش، عملکرد مدل‌ها در مرحله اعتبارسنجی مستقل ارزیابی شد و شاخص‌های آماری صرفاً بر اساس داده‌های آزمون گزارش گردیدند. در مورد مدل عددی XBeach، پارامترهای هیدرودینامیکی مدل به‌صورت دستی و بر اساس تطابق خروجی با مقادیر مشاهده‌ای دبی تنظیم شدند. نمودار جریانی پژوهش حاضر در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل۲- نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش

Figure 2- Flowchart of the research process

نتایج و بحث

نتایج ارائه‌شده در این بخش مربوط به پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه سیلاب در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. تحلیل نتایج ارائه‌شده در جداول ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که مدل یادگیری ماشین LightGBM در تمامی سناریوها به‌صورت مداوم عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر داشته است. این برتری در شاخص‌های معیارِ عملکرد به‌صورت کاهش خطا در RMSE، MAE و افزایش توانایی بازتولید نوسان‌های زمانی مقادیر بالاتر در NS و R مشهود است. به‌طوری‌که این مدل

شاخص نش- ساتکلیف ۰/۹۰۸ تا ۰/۹۳۱ را به ثبت رساند که این امر بیان‌گر عملکرد کاملاً موفق این مدل در پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه داشته است. همچنین مقدار همبستگی ۰/۸۹۶ تا ۰/۹۱۸ به‌ثبت رسیده در این مدل نشان می‌دهد که مدل LightGBM به‌خوبی الگوهای موجود در داده‌ها و تاخیرهای زمانی را آموخته و مورد پیش‌بینی قرار داده است. از طرفی ثبتِ مقادیر خطای RMSE بین ۰/۰۷۹ تا ۰/۱۳۱ در ۴ ایستگاه مهران جوستان، علیزان جوستان، گته ده و دهدر نشان از دقت بالای این مدل در روندیابیِ الگوهای موجود دارد. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌ها، ایستگاه جوستان که بیش‌ترین حجم و دامنه تغییرات دبی را در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد، مقادیر بالاتری از خطای RMSE و MAE را نسبت به سایر ایستگاه‌ها ثبت کرده است. این موضوع را می‌توان به نوسانات شدیدتر، وقوع مقادیر حدی و پیچیدگیِ هیدرولوژیکیِ بالاتر این ایستگاه نسبت داد که پیش‌بینیِ دقیقِ دبی بیشینه ماهانه را چالش‌برانگیزتر می‌سازد. با این حال حتی در این ایستگاه نیز الگوی برتری نسبی مدل‌ها حفظ شده و مدل LightGBM در مقایسه با مدل‌های DBN و XBeach خطای کم‌تری از خود نشان داده است که بیان‌گر پایداری عملکرد این مدل در شرایط داده‌ای پیچیده‌تر می‌باشد. به بیان کلّی، LightGBM در مجموعه‌های آموزش و همچنین در مجموعه‌های آزمون پایداری و دقت بهتری نشان داد؛ این الگوی برتری در تمام ترکیب‌های زمانی از یک فصل تا چهار فصل گذشته مشاهده می‌شود. این نتیجه هم‌راستا با مطالعه Zhao و همکاران (۲۰۲۵) است که نشان داده‌اند الگوریتم‌های نظیر LightGBM به‌خصوص در مسائل هیدرولوژیک و نقشه‌برداری ریسک پیش‌بینی نقطه‌ای سیلاب، عملکرد برتر و پایدارتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مرسوم ارائه می‌دهند.

جدول ۲ - نتایج آماری داده های ورودی جهت مدل سازی و پیش بینی سیلاب با مدل LightGBM

Table 2- Statistical results of input data for modeling and forecasting floods with the LightGBM model

ایستگاه	شماره ترکیب	مجموعه داده آموزش				مجموعه داده آزمون			
		NS	RMSE	MAE	R	NS	RMSE	MAE	R
جوستان	4	0.974	0.345	0.331	0.924	0.931	0.352	0.338	0.918
	3	0.969	0.348	0.334	0.919	0.928	0.355	0.342	0.912
	2	0.963	0.351	0.335	0.914	0.923	0.358	0.343	0.907
	1	0.957	0.354	0.337	0.911	0.917	0.359	0.348	0.902
مهران جوستان	4	0.974	0.113	0.093	0.923	0.929	0.121	0.097	0.917
	3	0.968	0.114	0.095	0.918	0.927	0.123	0.101	0.911
	2	0.961	0.117	0.095	0.913	0.922	0.125	0.101	0.906
	1	0.956	0.119	0.098	0.907	0.916	0.125	0.103	0.901
علیزان جوستان	4	0.972	0.087	0.071	0.921	0.928	0.091	0.077	0.916
	3	0.966	0.088	0.072	0.916	0.925	0.091	0.079	0.909
	2	0.959	0.089	0.072	0.912	0.921	0.092	0.081	0.905
	1	0.954	0.091	0.074	0.906	0.914	0.094	0.082	0.899
گته ده	4	0.973	0.092	0.075	0.919	0.927	0.094	0.083	0.915
	3	0.965	0.093	0.075	0.915	0.924	0.096	0.085	0.908
	2	0.957	0.093	0.076	0.912	0.919	0.097	0.087	0.904
	1	0.953	0.095	0.077	0.904	0.911	0.099	0.089	0.896
دهدر	4	0.971	0.066	0.047	0.917	0.925	0.071	0.051	0.914
	3	0.964	0.068	0.048	0.914	0.923	0.073	0.052	0.907
	2	0.956	0.069	0.049	0.909	0.917	0.075	0.054	0.903
	1	0.954	0.071	0.051	0.903	0.908	0.079	0.056	0.896

نتایج نشان می‌دهد که DBN نسبت به مدل عددی فیزیکی XBeach در معیارهای دقت اغلب اندکی بهتر عمل کرده است؛ اما این تفاوت در اغلب ایستگاه‌ها و ترکیب‌ها معنادار نبود و فاصله عملکردها ناچیز است.

به‌طوری‌که مدل DBN شاخص نش- ساتکلیف ۰/۸۶۴ تا ۰/۸۸۸ را ثبت کرده است اما این مقدار در مدل XBeach بین ۰/۸۳۴ تا ۰/۸۶۲ به ثبت رسیده است. همچنین مقایسه مقادیر همبستگی ثبت شده به‌وسیله این دو مدل نشان می‌دهد که مدل DBN مقادیر ۰/۸۱۶ تا ۰/۸۳۲ را بدست آورده. مدل XBeach مقادیر ۰/۸۰۷ تا ۰/۸۲۳ را ثبت کرده که نشان از روندیابیِ صحیح و درک الگوهای موجود شده و مقادیر آزمون را نسبتاً مطابق با مقادیر آموزش ثبت کرده است. از سوی دیگر، DBN قابلیت ذاتی و مشخصی در بیان عدم‌قطعیت و ارائه توزیع احتمالی خروجی‌ها دارد؛ این امر به پیش‌بینی دبی کمک می‌کند اما با هزینه‌های زیادی همراه است. نیاز به برآورد پارامترها و ساختار، سنگینی محاسباتیِ استنتاج خصوصاً برای مدل‌های مرتبه بالاتر یا حالت‌های غیرگوسی و پیچیدگی پیاده‌سازی و نگهداری مدل در محیط عملیاتی ازجمله هزینه‌هاست. این نکته در مطالعات مشابه که کاربرد DBN را برای مسائل زمان متغیر هیدرولوژیک یا کنترل لحظه‌ای بررسی کرده‌اند نیز تکرار شده است. DBN ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی دینامیک سیستم و عدم‌قطعیت است اما هزینه‌های محاسباتی و نیاز به داده تخصص را افزایش می‌دهد. با توجه به این نکات به‌دلیل معنادار نبودن تفاوت عملکرد دو مدل DBN و XBeach، پیشنهاد پژوهش حاضر این است که LightGBM به‌عنوان نخستین گزینه عملیاتی و پژوهشی انتخاب شود و XBeach به‌عنوان گزینه دوم جایگزین اقتصادی‌ترِ DBN لحاظ گردد؛ زیرا XBeach علی‌رغم این‌که یک مدل فرایندی فیزیکی است و قابلیت فیزیکی بالایی دارد در عمل پیاده‌سازی و اجرای برخط کمتر هزینه‌بر و پیچیده از DBN است و در بسیاری از سناریوها عملکرد نزدیک به DBN ارائه می‌دهد.

جدول ۳ – نتایج آماری داده های ورودی جهت مدل سازی و پیش بینی سیلاب با مدل Xbeach

Table 3- Statistical results of input data for modeling and forecasting floods with the Xbeach model

ایستگاه	شماره ترکیب	مجموعه داده آموزش				مجموعه داده آزمون			
		NS	RMSE	MAE	R	NS	RMSE	MAE	R
جوستان	4	0.823	1.432	1.321	0.843	0.862	1.458	1.356	0.823
	3	0.868	1.435	1.325	0.835	0.854	1.461	1.359	0.821
	2	0.863	1.439	1.327	0.831	0.847	1.467	1.363	0.817
	1	0.859	1.441	1.331	0.824	0.841	1.471	1.368	0.809
مهران جوستان	4	0.871	0.437	0.423	0.842	0.861	0.451	0.425	0.822
	3	0.867	0.441	0.424	0.834	0.852	0.454	0.428	0.819
	2	0.861	0.443	0.427	0.829	0.844	0.455	0.431	0.816
	1	0.853	0.444	0.431	0.821	0.837	0.457	0.434	0.812
علیزان جوستان	4	0.871	0.371	0.352	0.841	0.859	0.383	0.364	0.822
	3	0.866	0.372	0.355	0.832	0.851	0.388	0.365	0.817
	2	0.859	0.374	0.359	0.826	0.843	0.391	0.368	0.814
	1	0.848	0.377	0.361	0.819	0.836	0.391	0.371	0.811
گته ده	4	0.869	0.379	0.362	0.838	0.858	0.393	0.374	0.821
	3	0.865	0.381	0.362	0.831	0.849	0.394	0.375	0.816
	2	0.858	0.383	0.364	0.825	0.842	0.395	0.378	0.813
	1	0.846	0.385	0.367	0.817	0.835	0.397	0.381	0.809
دهدر	4	0.867	0.303	0.294	0.837	0.857	0.313	0.297	0.821
	3	0.864	0.305	0.295	0.829	0.848	0.315	0.297	0.815
	2	0.855	0.308	0.295	0.824	0.841	0.315	0.299	0.811
	1	0.843	0.312	0.298	0.816	0.834	0.221	0.303	0.807

جدول ۴ – نتایج آماری داده های ورودی جهت مدل سازی و پیش بینی سیلاب با مدل DBN

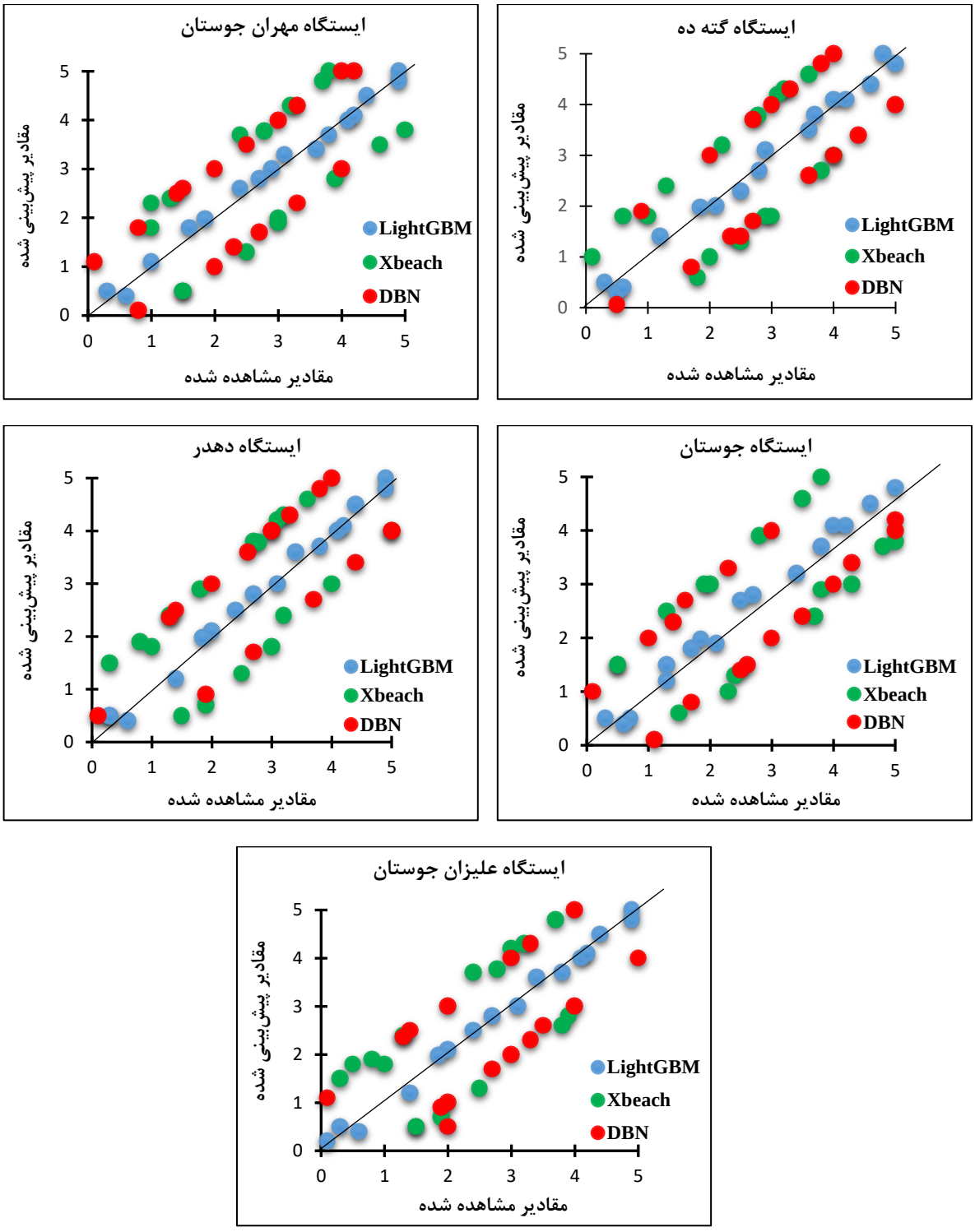
Table 4- Statistical results of input data for modeling and forecasting floods with the DBN model

ایستگاه	شماره ترکیب	مجموعه داده آموزش	مجموعه داده آزمون

R	MAE	RMSE	NS	R	MAE	RMSE	NS		
0.832	1.307	1.409	0.881	0.856	1.302	1.403	0.893	4	جوستان
0.827	1.312	1.413	0.877	0.849	1.304	1.407	0.887	3	
0.823	1.314	1,417	0.873	0.841	1.307	1.411	0.883	2	
0.819	1.418	1.419	0.869	0.835	1.311	1.413	0.877	1	
0.832	0.395	0.419	0.878	0.854	0.392	0.414	0.892	4	مهران جوستان
0.826	0.401	0.422	0.876	0.847	0.398	0.416	0.885	3	
0.822	0.406	0.425	0.872	0.838	0.402	0.419	0.882	2	
0.818	0.408	0.429	0.868	0.831	0.404	0.422	0.875	1	
0.831	0.335	0.363	0.877	0.851	0.331	0.353	0.891	4	علیزان جوستان
0.825	0.338	0.365	0.875	0.846	0.334	0.354	0.884	3	
0.821	0.341	0.367	0.871	0.835	0.338	0.357	0.881	2	
0.817	0.343	0.371	0.866	0.832	0.339	0.357	0.873	1	
0.829	0.344	0.373	0.876	0.849	0.341	0.361	0.889	4	گته ده
0.824	0.347	0.375	0.874	0.844	0.342	0.362	0.881	3	
0.819	0.351	0.378	0.869	0.833	0.344	0.364	0.879	2	
0.816	0.354	0.381	0.865	0.828	0.347	0.367	0.868	1	
0.828	0.261	0.287	0.875	0.847	0.259	0.284	0.888	4	دهدر
0.823	0.265	0.291	0.873	0.843	0.263	0.287	0.881	3	
0.818	0.271	0.293	0.868	0.832	0.264	0.289	0.877	2	
0.816	0.274	0.295	0.864	0.826	0.265	0.291	0.866	1	

در بررسی چهار ترکیب زمانی مشاهده شد که افزایش طول حافظه زمانی تا یک میزان مشخص می‌تواند دقت مدل را بهبود دهد. بررسی اثر دوره‌تناوب زمانی بر عملکرد مدل‌ها نشان داد که انتخاب پنجره زمانی ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت پیش‌بینیِ دبیِ بیشینه ماهانه سیلاب دارد. نتایج حاکی از آن است که افزودن اطلاعات تأخیری تا مقیاس فصلی موجب بهبود شاخص‌های عملکرد به‌ویژه در مدل LightGBM شده است؛ با این حال، افزایش بیش‌ازحد عمق حافظه زمانی در برخی ایستگاه‌ها ممکن است منجر به کاهش دقت مدل شود. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک دوره‌تناوب بهینه در داده‌هایِ دبیِ ماهانه است که مدل‌هایِ یادگیریِ ماشین نسبت به آن حساس هستند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه Kisi و همکاران (۲۰۱۹) هم‌راستا است که نشان دادند با لحاظ‌کردن سیگنال‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی با مقیاس زمانی مناسب می‌توان عملکرد مدل‌هایِ یادگیریِ ماشین را بهبود دهد در حالی که استفاده از تأخیرهای زمانی نامتناسب یا بیش‌ازحد ممکن است موجب افزایش نویز و کاهش کارایی مدل شود. مدل‌هایِ یادگیریِ ماشین در مسائل هیدرولوژیکی معمولاً از تعداد محدودی تاخیر مرتبط سود می‌برند و انتخاب پنجره زمانی بهینه باید بر مبنای آزمون و اعتبارسنجی زمانی صورت گیرد. نتیجه پژوهش حاضر که چهار سناریو را مورد بررسی قرار داد این امکان را داد کهLightGBM در همه سطوح حافظه عملکرد قوی و پایدار دارد در حالی که DBNو XBeach حساسیتِ بیشتری به ترکیبِ زمانی از خود نشان داده‌اند. برتری مدل LightGBM نسبت به مدل‌های DBN و XBeach را می‌توان به توانایی بالای این الگوریتم در یادگیری روابط غیرخطی و پیچیده از داده‌های سری زمانی نسبتاً محدود دبی ماهانه نسبت داد. ساختار مبتنی‌بر درخت‌های تصمیم در LightGBM امکان شناسایی الگوهای آستانه‌ای و تعامل بین مقادیر تأخیری دبی را فراهم می‌کند در حالی که این نوع روابط در مدل‌های عمیق مانند DBN نیازمند حجم داده بیشتر برای آموزش پایدار هستند. عملکرد مناسب DBN در مقایسه با مدل عددی XBeach نشان می‌دهد که مدل‌هایِ یادگیریِ عمیق قادرند بخشی از رفتار غیرخطی سیستم هیدرولوژیکی را استخراج کنند اما حساسیت این مدل‌ها به تنظیم ساختار شبکه، تعداد لایه‌ها و پارامترهای آموزشی در کنار هزینه محاسباتی بالاتر می‌تواند موجب کاهش کارایی آن‌ها در داده‌های ماهانه با طول محدود شود. از سوی دیگر، مدل XBeach که یک مدل عددی است

در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی طراحی شده و عدم برتری آن در پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های اعمال‌شده و عدم استفاده مستقیم از متغیرهای مؤثر هیدرولوژیکی باشد. با این حال، عملکرد قابل قبول این مدل نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند به‌عنوان مرجع مقایسه در کنار مدل‌های داده‌محور مفید باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت داده و تمرکز بر پیش‌بینی دبی بیشینه ماهانه، مدل LightGBM می‌تواند توازن مناسبی بین دقت پیش‌بینی، پایداری مدل و هزینه محاسباتی ایجاد کند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که مدل LightGBM با فاصله معنادار در تمامیِ پارامترهایِ ارزیابی نسبت به دو مدل XBeach و DBN عملکرد بهتری داشت؛ این یافته با مطالعه Szczepanek (۲۰۲۲) در مورد بهبود عملکرد مدل LightGBM پس از بهینه‌سازی پارامترها همخوانی دارد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های دبی روزانه در یک حوضه کوهستانی، عملکرد الگوریتم‌های XGBoost، LightGBM و CatBoost مورد مقایسه قرار گرفت. در مطالعه مذکور، با انجام فرآیند تنظیم پارامترهای کلیدی مدل‌ها و ارزیابی آن‌ها بر اساس شاخص‌های آماری مختلف، مشخص شد که LightGBM به دلیل ساختار مبتنی‌بر رشد برگ‌محور درخت‌ها و کارایی بالاتر در یادگیری روابط غیرخطی قادر است الگوهای پیچیده جریان را با دقت بیشتری بازتولید کند. علاوه بر این، مطالعه Gan و همکاران (۲۰۲۱) ضمن گزارش مجموعه‌ای از نتایج بسیار خوب برای LightGBM بیان می‌کند که این مدل حتی نسبت به مدل‌های مبتنی‌بر فرآیند فیزیکی در آن مطالعه برتری داشته است. از سوی دیگر، در مقایسه بین DBN و XBeach، نتایج نشان داد که DBN عملکردی بهتر از XBeach دارد اما این برتری در شاخص‌هایِ مورد ارزیابیِ پژوهش حاضر از لحاظ آماری به حدی نبود که بتوان آن را معنادار قلمداد کرد. این موضوع نیز با پژوهش Chen و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد که در آن DBN برای تحلیل ریسک سیلاب استفاده شده است اما تأکید شده که کاربرد عملی آن با پیچیدگی محاسباتی همراه است. مطالعه Goodarzi و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان می‌دهد که مدل‌های بیزی برای پیش‌بینی اوج سیلاب مناسب هستند اما نیاز به داده‌های کمّی دقیق، ساختار پیچیده احتمالاتی و استنتاج دارد. علاوه بر آن، مقالات مرتبط با کاربرد روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های شبکه‌های بیزی در پیش‌بینی سیلاب نیز نشان داده است که گرایش به استفاده از مدل‌های سریع، ساده و با هزینه کم‌تر رو به افزایش است. به عنوان مثال مطالعه Al-Rawas و همکاران (۲۰۲۴) گزارش می‌دهد که مطالعات بین ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ به کاربرد روش‌های یادگیریِ ماشین پرداخته‌اند و سرعت، هزینه، پیچیدگی و عملیاتی بودن، عوامل تعیین‌کننده در انتخاب مدل بوده است. بنابراین انتخاب عملی برای LightGBM به عنوان گزینه اول و XBeach به عنوان گزینه دوم از منظر کاربردی نیز توجیه‌پذیر است. در بخش حافظه زمانی نیز نتایج به‌دست آمده از جداول ۲ تا ۴ نشان داد که با افزایش تعداد فصول گذشته، دقت مدل‌ها تا حدی بهبود یافت ولی افزایش بیش از حد تأخیر زمانی ممکن بود منجر به پیچیدگی بیش‌تر، بیش‌برازش یا کاهش بازده شود. مطالعات فعلی نشان می‌دهد که در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیک، انتخاب بهینه پنجره زمانی برای مدل‌های یادگیری ماشین یکی از عوامل کلیدی است. به عنوان مثال در مطالعه Pala و همکاران (۲۰۲۵) مطرح شده است که مدل LightGBM با مجموعه داده‌های طولانی‌تر یا پنجره زمانی مناسب‌تر عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. شکل ۳ میزان انطباق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی دبی سیلاب را برای هر یک از مدل‌های مورد استفاده نشان می‌دهد.



شکل ۳ – نمودار مقایسه همبستگی مدل‌ها

Figure 3- Model correlation comparison chart

بر اساس نمودارهای همبستگی، مدل LightGBM بیش‌ترین تراکم نقاط را در اطراف خط همبستگی به خود اختصاص داده است که بیان‌گر انطباق بالا و خطای کم‌تر بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی این مدل در ایستگاه‌های مختلف در بازه ۰/۸۹۶ تا ۰/۹۱۸ قرار گرفته است که توانایی بالای مدل LightGBM را در بازنمایی الگوی تغییرات زمانی و شدت دبی سیلاب تأیید می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار مبتنی‌بر درخت‌های تصمیم تقویت‌شده در

LightGBM قادر است روابط غیرخطی پیچیده موجود در داده‌های هیدرولوژیکی را به‌خوبی استخراج نماید. مدل DBN نیز روند کلی تغییرات را به‌خوبی دنبال کرده اما پراکندگی بیشتری در نقاط نسبت به LightGBM مشاهده می‌شود. مقادیر ضریب همبستگی DBN در محدوده ۰/۸۱۶ تا ۰/۸۳۲ قرار داشته و نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول اما ضعیف‌تر نسبت به مدل LightGBM است. به‌ویژه در دبی‌های اوج، مدل تمایل به بیش‌برآورد جزئی دارد که می‌تواند ناشی از ساختار چندلایه و حساسیت به تنظیم پارامترهای یادگیری باشد. این ویژگی در مطالعات مشابهی که از DBN برای مدل‌سازی هیدرولوژیک استفاده شده نیز گزارش گردیده است (Chang *et al.*, 2023).

مدل XBeach به‌عنوان یک مدل فیزیکی فرآیندی، همبستگی نسبتاً پایینی را در مقایسه با دو مدل داده‌محور نشان داده است. به‌گونه‌ای که مقادیر ضریب همبستگی آن در بازه ۰/۸۰۷ تا ۰/۸۲۳ قرار گرفته است. هرچند XBeach در بازتولید الگوهای کلی دبی موفق عمل کرده است اما در شرایط پیچیده با ورودی‌های متغیر زمانی، دقت آن کاهش می‌یابد. این مسئله در پژوهش Roelvink و همکاران (۲۰۰۹) نیز تأیید شده که عملکرد این مدل در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر و داده‌های محدود با افت دقت همراه است. بررسی مقادیر همبستگی حاصل از این نمودارها نشان می‌دهد که LightGBM در تمامی ایستگاه‌ها مقدار همبستگی بالا را ثبت کرده است در حالی که مقادیر برای DBN و XBeach به‌ترتیب عملکرد بهتری داشته‌اند. این نتایج نشان‌گر آن است که مدل‌های داده‌محور به‌ویژه الگوریتم‌های LightGBM قادرند روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی‌های اقلیمی و پاسخ هیدرولوژیکی را بهتر شناسایی کنند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی سه مدل LightGBM، DBN و XBeach به‌منظور پیش‌بینیِ دبیِ بیشینه ماهانه در حوزه آبخیز طالقان، چهار حالت زمانی مختلف بر اساس تأخیرهای فصلی طراحی و بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های ارزیابی نشان داد که تفاوت قابل‌توجهی میان عملکرد مدل‌های داده‌محور و مدل فیزیکی وجود دارد. مدل LightGBM با بهره‌گیری از سازوکار یادگیری گرادیان تقویتی و قابلیت بالای خود در استخراج روابط غیرخطی میان داده‌های ورودی در تمامی حالات زمانی برتری معناداری نسبت به دو مدل دیگر داشت. این مدل همبستگی بالاتر و خطای کمتری را در بازتولید رفتار هیدرولوژیک حوضه نشان داد و به‌عنوان دقیق‌ترین مدل پیش‌بینی جریان انتخاب شد. افزون‌بر دقت بالا، سادگی نسبی در آموزش، زمان اجرای پایین و امکان به‌روزرسانی سریع ازجمله مزایایِ کلیدیِ مدل LightGBM در کاربردهای پیش‌بینی سیلاب محسوب می‌شوند. مدل DBN نیز با وجود توانایی در نمایش پویایی‌های زمانی و روابط علی بین متغیرها در مقایسه با LightGBM دقت پایین‌تری ارائه داد. هرچند این مدل در برخی حالات زمانی عملکردی قابل قبول داشت اما اختلاف آن با XBeach از لحاظ آماری معنادار نبود. با در نظر گرفتن هزینه‌های محاسباتی بالا، نیاز به تنظیم ساختار شبکه و دشواری در تفسیر نتایج، استفاده از مدل DBN در کاربردهای عملیاتی کوتاه‌مدت توصیه نمی‌شود مگر در شرایطی که تحلیل عدم‌قطعیت یا ترکیب چند منبع داده مدنظر باشد. مدل XBeach به‌عنوان یک مدل عددی فیزیکی، موفق شد الگوی کلی رفتار دبی را بازسازی کند اما دقت پیش‌بینی آن نسبت به دو مدل داده‌محور پایین‌تر بود. با این حال از آن‌جا که XBeach مبتنی‌بر اصول فیزیکی جریان و فرسایش است می‌تواند در مطالعاتی که هدف، تحلیل فرآیندی و مکانی پدیده‌های هیدرودینامیکی است به‌عنوان مدل پایه و مرجع مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش حاضر با توجه به هزینه پایین‌تر و سهولت اجرا، مدل XBeach در رتبه دوم پس از LightGBM قرار گرفت و مدلDBN در رتبه سوم قرار گرفت.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق بیان‌گر آن است که ترکیب داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی در قالب مدل‌های داده‌محور به‌ویژه LightGBM، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی دبی‌های ماهانه در حوزه‌های کوهستانی مانند طالقان فراهم می‌آورد. این مدل می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای سامانه‌های هشدار سریع سیلاب و مدیریت هوشمند منابع آب در مناطق با رفتار هیدرولوژیکی پیچیده به کار گرفته شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی ترکیب مدل‌های داده‌محور با مدل‌های فیزیکی مورد بررسی قرار گیرد تا ضمن افزایش دقت، قابلیت تفسیر فیزیکی نیز حفظ شود.

References

Alizadeh, Z., Yazdi, J., Kim, J. H., & Al-Shamiri, A. K. (2018). Assessment of Machine Learning Techniques for Monthly Flow Prediction. *Water*, 10(11), 1676. https://doi.org/10.3390/w10111676

Al-Rawas, G., Nikoo, M. R., Al-Wardy, M., & Etri, T. (2024). A Critical Review of Emerging Technologies for Flash Flood Prediction: Examining Artificial Intelligence, Machine Learning, Internet of Things, Cloud Computing, and Robotics Techniques. *Water*, *16*(14), 2069. https://doi.org/10.3390/w16142069

Brunner, M.I., Slater, L., M.Tallaksen, L., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water*, 8(3), 2049-1948. https://doi.org/10.1002/wat2.1520

Chang, L., Bai, Y., Xue, J., Gong, L., Zeng, F., Sun, H., Hu, Y., Huang, H., & Ma, Y. (2023). Dynamic Bayesian networks with application in environmental modeling and management: A review. *Environmental Modelling & Software*, 170, 105835, ISSN 1364-8152. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105835.

Chen, J., Zhong, P., An, R., Zhu, F., & Xu, B. (2019). Risk analysis for real-time flood control operation of a multi-reservoir system using a dynamic Bayesian network. *Environmental Modelling & Software*, 111, 409-420, ISSN 1364-8152. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.007

Ebrahimi, P., Salamti, A., Mohseni Saravi, M., Malekian, A., & Saedodin, A. (2020). Prediction of Environmental Health by Using Gene Expression and Bayesian Network Techniques in Taleghan Watershed. *Pasture and watershed management*.73(1), 1-18. (In Persian) https://doi:10.22059/jrwm.2018.250908.1221

Ebrahimi, A., Roozbahani, A., & BaniHabib, M.A. (2018). Groundwater Level Prediction Using Dynamic Bayesian Networks Based on Sensitivity Analysis (Case Study: Birjand Plain). *Iranian Water*, 12(2), 91-100. (In Persian)

Gan, M., Pan, S., Chen, Y., Cheng, C., Pan, H., & Zhu, X. (2021). Application of the Machine Learning LightGBM Model to the Prediction of the Water Levels of the Lower Columbia River. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(5), 496. https://doi.org/10.3390/jmse9050496

Gai, Y., Li, L., Li, Z., & Shi, H. (2025). The Optimization of Four Key Parameters in the XBeach Model by GLUE Method: Taking Chudao South Beach as an Example. *Journal of Marine Science and Engineering*, *13*(3), 555. https://doi.org/10.3390/jmse13030555

Goodarzi, L., E.Banihabib, M., Roozbahani, A., & Dietric, J. (2019). Bayesian network model for flood forecasting based on atmospheric ensemble forecasts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 19, 2513-2524. https://doi.org/10.5194/nhess-19-2513-2019

Ke, G., Meng, Q., Finley, Th., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, TY. (2017). LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA. https://doi.org/10.5555/3294996.3295074

Kuhaneswaran, B., Sorwar, G., Alaei, A. R., & Tong, F. (2025). Evolution of Data-Driven Flood Forecasting: Trends, Technologies, and Gaps—A Systematic Mapping Study. *Water*, *17*(15), 2281. https://doi.org/10.3390/w17152281

Kungurtsev, V., Rysavy, P., Idlahcen, F., Rytir, P., & Wodecki, A. (2024). Learning Dynamic Bayesian Networks from Data: Foundations, First Principles and Numerical Comparisons. https://10.48550/arXiv.2406.17585

Kisi, O., Choubin, B., Deo, R. C., & Yaseen, Z. M. (2019). Incorporating synoptic-scale climate signals for streamflow modelling over the Mediterranean region using machine learning models. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1240-1252. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1632460

Mahmood, MQ., Wang, X., Aziz, F., & Dogulu, N. (2025). Urban flood modelling: Challenges and opportunities - A stakeholder-informed analysis. *Environmental Modelling & Software*, 191, 106507, ISSN 1364-8152. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106507

Murphy, K., & Weiss, Y. (2013). The Factored Frontier Algorithm for Approximate Inference in DBNs. Appears in Proceedings of the Seventeenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.2296

Nayak, M., Das, S., & Senapati, M. R. (2022). Improving Flood Prediction with Deep Learning Methods. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, Series B. 103. https://doi.org/10.1007/s40031-022-00720-y

Nakhaei, M., Zanjanian, H., Nakhaei, P., Gheibi, M., Moezzi, R., Behzadian, K., & Campos, L. C. (2024). Comparative Evaluation of Deep Learning Techniques in Streamflow Monthly Prediction of the Zarrine River Basin. *Water*, 16(2), 208. https://doi.org/10.3390/w16020208

Okacha, A., Salhi, A., Bouchouou, M., & Fattasse, M. (2024). Enhancing flood forecasting accuracy in Data-Scarce regions through advanced modeling approaches. *Journal of Hydrology* ,645, Part B ,132283, ISSN 0022-1694. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132283

Pala, A., Mutlu, S., & Guven, A. (2025). Evaluation of machine learning models for streamflow projections under different greenhouse gas emission scenarios. *Engineering Research*, ISSN 2307-1877. https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.06.006

Roohi, M., Ghafouri, H. R., Ashrafi, S. M., Motagh, M., & Haghshenas Haghighi, M. (2025). A hybrid approach for enhanced flood prediction and assessment: Leveraging physical models, deep learning and satellite remote sensing. *Big Earth Data*, *9*(3), 439–472. https://doi.org/10.1080/20964471.2025.2530850

Roelvink, D., Reiners, A., Van Dongeren, a., Thiel de Veris, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.006

Roelvink, D., Reiners, A.D., Van Dongeren, AP., Van Thiel de Veries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach Model Description and Manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. Page: 3

Szczepanek, R. (2022). Daily Streamflow Forecasting in Mountainous Catchment Using XGBoost, LightGBM and CatBoost. *Hydrology*, *9*(12), 226. https://doi.org/10.3390/hydrology9120226

Yu, J., Li, Y., Huang, X., & Ye, X. (2025). Data quality and uncertainty issues in flood prediction: a systematic review. *International Journal of Digital Earth*, *18*(1), 1-30. https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2495738

Zhao, J., Wang, X., Ke, E., & Zhao, Y. (2025). Enhancing urban flood resilience: a LightGBM-NSGA2 hybrid model for impervious surface optimization. *Habitat International*, 163, 103475, ISSN: 0197-3975. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2025.103475

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 112-131 **Article Type: Review**

doi: 10.22034/iwm.2026.2049986.1201 **Online ISSN: 2783-4581**

Analysis of Factors Affecting the Adaptation of Iranian Agricultural Communities to Natural Hazards (Theoretical Foundations, Applied Dimensions and Factor Analysis)

Ardeshir Mesbah[1] , Ali Tohidloo[1*], Esmail Karamidehkordi[2] , Amin Salehpour jam[3], Tofigh Saadi[4]

1. Department of Agricultural Extension, Communication and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2. Agricultural Extension and Rural Development, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
4. Climatology Group in Environmental Planning, Secretary of the Research Committee of Alborz Province Regional Water Company, Karaj, Iran

* **Corresponding author**: tohidloo@znu.ac.ir

(Received: 07 January 2025 Revised: 26 March 2025 Accepted: 15 February 2026)

Extended Abstract

Introduction: Iran's unique spatial-geographical context renders it highly vulnerable to natural hazards, including floods and droughts. The aim of the present study is to investigate the factors affecting the adaptation of Iranian agricultural communities to natural hazards with an emphasis on floods and droughts (single-hazard studies) and studies on the combination of these hazards (combined studies) occurring in different regions of Iran.

Materials and methods: The method of this research is systematic analysis, which is a type of qualitative research method based on secondary sources and is used to examine phenomena and identify categories based on research literature. In previous studies, the concepts of "adaptation" and "adaptation capacity" have often been examined in a well-known analytical framework (concept analysis), but in this study, first the theoretical foundations related to adaptation and its capacity were studied based on a review of relevant sources and literature, and then, using conceptual methodology and systematic analysis, related research conducted in the country in the form of articles, dissertations, and theses included in the databases of Scientific Information Database (SID), Iranian Research Institute for Information Science and Technology (IranDoc), Iran's Publications Database (Magiran), Civilica and Google Scholar were analyzed using Nvivo12 software and in three stages: creating information categories (open coding), selecting one of these categories and placing it in a relationship model (axial coding), and then inferring a classification using the internal relationships of these categories (coding). "Selective" was conducted and factors affecting the adaptation of Iranian agricultural communities to natural hazards were identified.

Results and Discussion: The first studies conducted in the field of adaptation in Iran were mostly articles in 1989 in the "Iranian Journal of Agricultural Science" and mostly master's thesis in 2000 at Al-Zahra University, but adaptation studies in the field of natural hazards, especially in rural areas and agricultural communities, have a short life; so that the results obtained from these studies in Iran began in the early 1990s. Based on the inclusion and exclusion criteria, after scientific filtering, 80929 scientific documents, 51 articles and thesis were included in the review process. The highest frequency was related to the "Google Scholar" database and the lowest frequency was related to the "Magiran" database. The highest and lowest number of studies conducted were in 2011 and 2024 (7 studies in each year) and in 2015 (one study), respectively. The most of the studies data were analyzed using statistical tests. ArcGIS software was used to georeference the data and spatially display the data for zoning in the study areas. In the analysis stage and also the interpretation of the output of the documents, three stages were performed: open coding, axial coding, and selective coding in the NVivo12 software environment. The data analysis process in the open coding stage ultimately led to the extraction of 72 concepts, 31 subcategories, and 7 main categories, which include the factors of "educational-extension", "knowledge", "institutional", "technical-infrastructure", "economic", "social", and "agricultural".

Conclusion: The results indicate that statistical tests have the highest frequency and the use of analytical techniques has the lowest frequency in the field of study methods of the statistical sample of the research. Also, the most studies conducted in the field of adaptation are in the field of drought and the least studies conducted in the field of flood studies, and social factors (with a frequency of 20.5%) have the highest and educational-promotional factors (with a frequency of 4.3%) have the lowest impact on the adaptation of rural communities in Iran to natural hazards. This indicates that relevant local, provincial and national institutions can increase the level of adaptation of rural communities to natural hazards by developing infrastructure and social capital such as participation, trust, interaction, etc., and make them resilient to such hazards.

Keywords: Adaptive Capacity, Crisis Management, Farmers, Natural Disasters, Rural Areas

Citation: Mesbah, A., Tohidloo, S., Karamidehkordi, E., Salehpour jam, A. & Saadi, T. (2026). Analysis of Factors Affecting the Adaptation of Iranian Agricultural Communities to Natural Hazards (Theoretical Foundations, Applied Dimensions and Factor Analysis). *Integrated Watershed Management*, 6(3), 112-131. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2049986.1201

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۳۱-۱۱۲) نوع مقاله: مروری

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2049986.1201

واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (مبانی نظری، ابعاد کاربردی و تحلیل عوامل)

اردشیر مصباح [۱]، علی توحیدلو[۱*]، اسماعیل کرمی‌دهکردی[۲]، امین صالح‌پور جم[۳]، توفیق سعدی[۴]

۱. گروه توسعهٔ کشاورزی، گروه ترویج، ارتباطات و توسعهٔ روستایی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴. گروه اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، دبیر کمیتهٔ تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای استان البرز، کرج، ایران

*نویسنده مسئول: tohidloo@znu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶)

چکیده مبسوط

مقدمه: کشور ایران به دلیل واقع شدن در ساختارهای مکانی - فضایی ویژه، همواره بحران‌های طبیعی زیادی را متحمل شده و به‌عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین نقاط جهان در برابر مخاطرات محیطی شناخته می‌شود. هدف پژوهش حاضر، واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی با تاکید بر سیل و خشکسالی (پژوهش‌های تک مخاطره) و مطالعات در مورد ترکیبی از این مخاطرات (پژوهش‌های ترکیبی) به وقوع پیوسته در مناطق مختلف ایران است.

مواد و روش‌ها: روش این پژوهش، تحلیل نظام‌مند است که یکی از انواع روش تحقیق کیفی و مبتنی بر منابع ثانویه بوده و برای بررسی پدیده‌ها و شناسایی مقوله‌ها براساس ادبیات پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات قبلی، غالباً مفاهیم "سازگاری" و "ظرفیت سازگاری" را در یک چارچوب تحلیلی شناخته شده (تجزیه و تحلیل مفهوم) بررسی کرده‌اند، اما در این پژوهش، ابتدا مبانی نظری مرتبط با سازگاری و ظرفیت آن مبتنی بر مرور منابع و ادبیات مربوطه مورد مطالعه قرار گرفت و سپس با استفاده از روش‌شناسی مفهومی و به‌کارگیری تحلیل نظام‌مند، پژوهش‌های مرتبط انجام شده در کشور در قالب مقالات، رساله‌ها و پایان‌نامه‌های درج شده در پایگاه‌های اطلاعاتی "مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)"، "پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (IranDoc)"، "بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)"، "مرجع دانش (Civilica)" و "گوگل اسکالر (Google Scholar)" با بهره‌گیری از نرم‌افزار Nvivo12 و طی سه مرحله ایجاد طبقات اطلاعاتی (کدگذاری باز)، انتخاب یکی از این طبقات و قراردادن آن در یک مدل روابط (کدگذاری محوری) و سپس استنباط یک طبقه‌بندی با استفاده از روابط درونی این طبقات (کدگذاری انتخابی) انجام گردیده و عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی شناسایی شدند. زمین مرجع نمودن داده‌ها و نمایش فضایی جهت پهنه‌بندی در حوزه‌های مورد مطالعه نیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفت.

نتایج و بحث: اولین مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی سازگاری در ایران، به‌صورت مقاله در سال ۱۳۶۸ در "مجله علوم کشاورزی ایران" و در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نیز در سال ۱۳۷۹ در دانشگاه الزهرا صورت پذیرفته است، اما مطالعات سازگاری در زمینه‌ی مخاطرات طبیعی، به‌خصوص در مناطق روستایی و جوامع کشاورزی از عمر کوتاهی برخوردار می‌باشند؛ به‌گونه‌ای که آغاز نتایج به‌دست آمده از این مطالعات در ایران، از ابتدای دهه ۱۳۹۰ هجری شمسی می‌باشد. براساس ملاک‌های ورود و خروج، پس از پالایش علمی ۸۰۹۲۹ سند علمی، ۵۱ مقاله و پایان‌نامه وارد فرآیند بررسی گردید. بیش‌ترین فراوانی مربوط به پایگاه اطلاعاتی "گوگل‌اسکالر" و کم‌ترین فراوانی مربوط به پایگاه اطلاعاتی "مگیران" بود. بیش‌ترین و کم‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته به ترتیب در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۰ (در هر سال ۷ پژوهش) و در سال ۱۳۹۴ (یک پژوهش) بود. داده‌های اغلب پژوهش‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمون‌های آماری مورد تحلیل قرار گرفته بود. در مرحله تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر خروجی اسناد طی سه مرحله کدگذاری باز، کدگذاری محوری و کدگذاری انتخابی در محیط نرم‌افزار NVivo12 انجام شده و فرایند تحلیل داده‌ها در مرحله کدگذاری باز، درنهایت به استخراج ۷۲ مفهوم، ۳۱ خرده مقوله و ۷ مقوله اصلی منجر شد که این مقوله‌ها شامل عوامل "آموزشی – ترویجی"، "دانش"، "نهادی"، "فنی - زیرساختی"، "اقتصادی"، "اجتماعی" و "زراعی" می‌باشند.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که آزمون‌های آماری، بیشترین فراوانی و استفاده از تکنیک‌های تحلیلی، کمترین فراوانی را در زمینه روش های مطالعه نمونه آماری پژوهش به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بیشترین مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی سازگاری، در حیطه‌ی خشکسالی و کمترین مطالعات صورت گرفته در حیطه مطالعات سیل می‌باشد و عوامل اجتماعی (با ۲۰/۵ درصد فراوانی) بیشترین و عوامل آموزشی - ترویجی (با ۴/۳ درصد فراوانی) کمترین تاثیر را بر روی سازگاری جوامع روستایی ایران در برابر مخاطرات طبیعی داشته است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که نهادهای محلی، استانی و کشوری ذیربط می‌توانند با توسعه‌ی زیرساخت‌ها و سرمایه‌های اجتماعی نظیر مشارکت، اعتماد، تعامل و...، سطح سازگاری جوامع روستایی در برابر مخاطرات طبیعی را افزایش داده و باعث تاب‌آور شدن آن‌ها در برابر اینگونه مخاطرات گردند.

واژه‌های کلیدی: بحران‌های طبیعی، ظرفیت سازگاری، کشاورزان، مدیریت بحران، مناطق روستایی

استناد: مصباح، ا.، توحیدلو، ش.ع.، کرمی دهکردی، ا.، صالح پور جم، ا.، و سعدی، ت. (۱۴۰۵). واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (مبانی نظری، ابعاد کاربردی و تحلیل عوامل). *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۳۱-۱۱۲. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2049986.1201

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

بخش کشاورزی، بخشی بنیادی است که غذا، ارزش افزوده اقتصاد، اشتغال و شیوه زندگی میلیاردها نفر را تامین می‌کند. این بخش بر اثر تغییرات اقلیمی روزافزون، با چالش‌های زیادی مانند تغییر الگوی بارش فصلی، افزایش تنوع آب و هوایی در فصول مختلف و رخدادهای شدید آب و هوایی روبروست. رخدادهای شدید آب و هوایی به ویژه خشکسالی و سیل از نظر فراوانی و شدت در حال افزایش است (Parry *et al*., 2007; IPCC 2012a; 2014).

به همین جهت باید سازگاری کشاورزان با این رخدادها افزایش یافته تا آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر تأثیرات خشکسالی (از طریق کاهش تولید محصول و به‌تبع آن کاهش درآمد حاصل از فروش) و سیل (از طریق آسیب به محصولات، تجهیزات و زیرساخت‌ها) کاهش یابد (Abhas *et al*., 2012; FarzadBehtash *et al*., 2013; Rezaie., 2013).

مخاطرات طبیعی هم‌چون سیل، خشکسالی، زلزله و...، به عنوان پدیده‌های تکرارپذیر در طول دوران حیات کره زمین، همواره وجود داشته‌اند و همیشه خطری جدی برای توسعه، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و به‌خصوص مناطق روستایی آن کشورها به شمار می‌روند (Mohammadi Ostadkalaye & Khorasani, 2015).

نظریه‌پردازان معتقدند بسیاری از تمدن‌های بزرگ تاریخ ازجمله مایاها، نورس، مینوان‌ها و امپراتوری قدیمی مصری‌ها، در نهایت به وسیله دشمنان‌شان و گسترش تأثیرات سیل، خشکسالی، سونامی و مانند آن به زانو درآمده‌اند (Fagan., 2009). از دیدگاه مدرن، پیامدهای وقایع سونامی[1] دسامبر ۲۰۰۴ که به آسیا ضربه وارد کرد، غیرقابل تصور است (بیش از ۳۰۰ هزار نفر در یک لحظه با طغیان آب از بین رفتند) اما این میزان در بافت تاریخی گسترده‌تر منحصربه‌فرد یا رکوردشکن نیست، زیرا در ارتباط با بلایای طبیعی، نمونه‌های دیگری هم وجود دارد (Coppola, 2007).

کشور ایران به دلیل واقع شدن در ساختارهای مکانی-فضایی ویژه، همواره بحران‌های طبیعی زیادی را متحمل شده و به‌عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین نقاط جهان در برابر مخاطرات محیطی شناخته می‌شود (Pourtaheri *et al*., 2011). در پی تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، تغییر در الگوی بارندگی و شرایط آب و هوایی موجب بروز خشکسالی، سیل و پیرو آن‌ها خسارت‌های شدیدی در عرصه‌های منابع طبیعی شده و وقوع آن باعث ایجاد خسارات متعدد و غیرقابل بازگشت با اثرات وسیع محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی می‌شود (Collins *et al*., 2013). لذا درک ظرفیت بوم‌سازگان برای سازگاری و رویارویی با مخاطرات طبیعی، جهت مدیریت آن‌ها بسیار مهم است. با این حال، تعاریف سازگاری و ظرفیت سازگاری، اغلب نامشخص و گیج‌کننده هستند و کاربرد این مفاهیم را دشوار می‌کنند (Mesbah *et al*., 2025). در بخش نخست این مقاله، ابتدا تعاریف سازگاری و ظرفیت سازگاری مرور شده و مفهوم آن عملیاتی گردیده است.

پرداختن به سازگاری در مخاطرات طبیعی و راهبردهای مربوطه همگام با توسعه رویکرد مشارکت ذینفعان، نقشی کلیدی در مقوله سلامت و پایداری آبخیز ایفا می‌کند. در این ارتباط، ضروری است تا حذف موانع مشارکت مردمی و ارتقاء مشارکت ذینفعان نیز در محور توجه قرار گیرد (Salehpour Jam *et al*., 2020; Noor *et al*., 2022; Rabet *et al*., 2023).

همچنین "ظرفیت سازگاری" به عنوان پتانسیل نهفته یک بوم‌سازگان جهت تاب‌آوری و پاسخ به تغییر تعریف می‌شود. در این پژوهش، تعاریف متعددی برای ارزیابی ویژگی‌های تکمیلی سازگاری و ظرفیت سازگاری ارائه شده که ممکن است به شفاف‌سازی بیشتر مؤلفه‌ها و ارتباط مفهومی آن‌ها کمک کند. به دلیل عدم اطمینان

[1] Tsunami

در مورد تغییرات جهانی و تأثیر بالقوه آن بر ظرفیت بوم‌سازگان برای سازگاری با تغییرات اجتماعی و بوم‌شناختی، ارزیابی‌های بیشتری از سازگاری و ظرفیت سازگاری موردنیاز است. درک بهتر از سازگاری در نهایت می‌تواند امکان مدیریت کارآمدتر و هدفمندتر را فراهم کند (Mesbah *et al*., 2024). از این رو، این پژوهش به واکاوی عوامل موثر بر سازگاری جوامع روستایی ایران در برابر مخاطرات طبیعی با تاکید بر دو مخاطره سیل و خشکسالی (پژوهش‌های تک مخاطره) و پژوهش‌ها در زمینه ترکیبی از این مخاطرات (پژوهش‌های ترکیبی[۲]) که در مناطق مختلف ایران به وقوع پیوسته است، پرداخته و سعی دارد به ارتقای توانایی کشاورزان برای مقابله با اختلالات و بحران‌های طبیعی بپردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از روش‌شناسی مفهومی و به‌کارگیری تحلیل نظام‌مند[۳] پژوهش‌های مرتبط انجام شده است. پژوهش‌های قبلی، غالباً مفهوم سازگاری را در یک چارچوب تحلیلی شناخته شده (تجزیه و تحلیل مفهوم) بررسی کرده‌اند. تحلیل مفهومی، روشی برای بازنمایی دانش مفهومی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است که به‌طور معمول برای روشن کردن معانی و گسترش تعاریف عملیاتی، از طریق در نظر گرفتن شواهد به کار می‌رود. بکارگیری این چارچوب روش‌شناختی شناخته شده، رویکرد عینی‌تری را برای شفاف‌سازی مفاهیم، ممکن می‌سازد (Willig & Rogers, 2017). تحلیل نظام‌مند یکی از انواع روش تحقیق کیفی و مبتنی بر منابع ثانویه می‌باشد که برای بررسی پدیده‌ها و شناسایی مقوله‌ها بر اساس ادبیات پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با استفاده از رویکردهای مبتنی بر تکرار به گردآوری و تحلیل داده‌ها می‌پردازد. منظور از منابع ثانویه همان کتاب‌ها، مقاله‌ها یا آمار و ارقام پیشین است (Boland *et al*., 2017; Silva, 2015).

جدول ۱- فراوانی انواع اسناد علمی مرتبط با مفهوم سازگاری در مخاطرات طبیعی کشور در انواع پایگاه‌های اطلاعاتی

Table 1- Frequency of types of scientific documents related to the adaptation concept about country's natural hazards in various databases

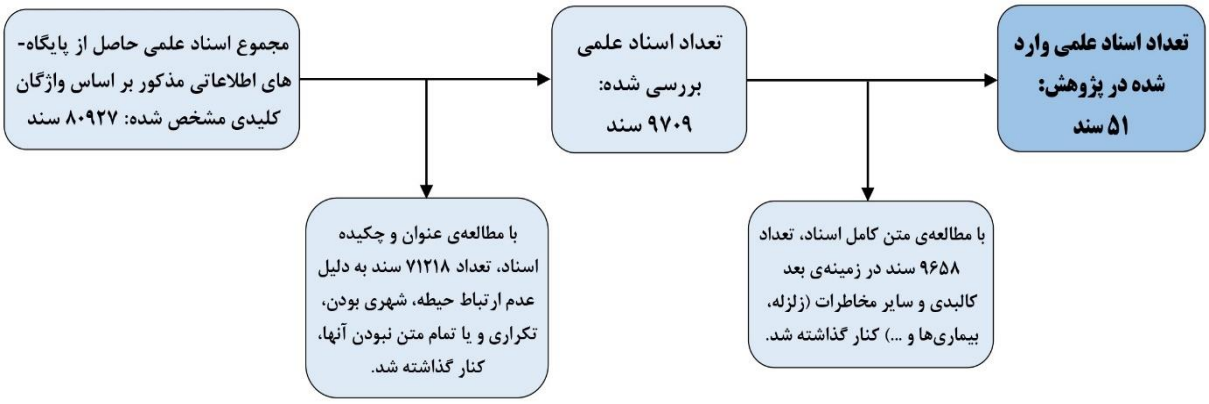
پایگاه اطلاعاتی	فراوانی پژوهش‌ها	درصد فراوانی پژوهش‌ها
گوگل‌اسکالر	43392	53.6
سید	25002	30.9
سیویلیکا	5309	6.6
ایرانداک	4465	5.5
مگیران	2759	3.4
مجموع	**80927**	**100**

در این پژوهش، ابتدا مبانی نظری مرتبط با سازگاری و ظرفیت آن مبتنی بر مرور منابع و ادبیات مربوطه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس روند پژوهش با جست‌وجوی اینترنتی واژگان "سازگاری مخاطرات طبیعی"، "سازگاری سیلاب" و "سازگاری خشکسالی" مابین عنوان پژوهش‌های منتشر شده در یازه زمانی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ در انواع پایگاه‌های اطلاعاتی شامل "مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی[۴]"، "پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک)[۵]"، "بانک اطلاعات نشریات کشور (مگیران)[۶]"، "مرجع دانش (سیویلیکا)[۷]" و "گوگل اسکالر[۸]" آغاز گردید. در مرحله اول جست‌وجو، تعداد ۸۰۹۲۹ سند علمی به دست آمد که توزیع فراوانی آن‌ها به صورت جدول ۱ قابل مشاهده است که بیش‌ترین فراوانی مربوط به پایگاه اطلاعاتی "گوگل اسکالر" با تعداد ۴۳۳۹۲ سند علمی و کم‌ترین

[۲] ترکیبی از اکثر مخاطرات طبیعی به وقوع پیوسته در منطقه
[3] Systematic Review
[4] www.sid.ir
[5] www.irandoc.ac.ir/article & ganj.irandoc.ac.ir
[6] www.magiran.com
[7] www.civilica.com
[8] scholar.google.com

فراوانی مربوط به پایگاه اطلاعاتی "مگیران" با تعداد ۲۷۵۹ سند علمی بود.

در مرحله اول جست‌وجو، تعداد ۸۰۹۲۷ سند علمی به دست آمد که با مطالعه‌ی عنوان و چکیده اسناد، تعداد ۷۱۲۱۸ سند به دلیل عدم ارتباط حیطه (مطالعات رشته‌های پزشکی، روانشناسی و غیره)، شهری یا شهری - روستایی بودن مطالعات، تکراری بودن و یا در دسترس نبودن متن کامل آن‌ها، کنار گذاشته شد و تعداد ۹۷۰۹ سند علمی در ارتباط با مفهوم سازگاری در برابر مخاطرات طبیعی (سیل، خشکسالی و مطالعات ترکیبی) باقی ماند (شکل ۲). سپس در مرحله آخر، متن اصلی انواع اسناد علمی مورد بررسی قرار گرفت که با مطالعه متن کامل اسناد، تعداد ۹۶۵۸ مقاله به دلیل کالبدی بودن حیطه تحقیقاتی اسناد و یا اینکه در زمینه سایر مخاطرات (زلزله، بیماری‌ها و...) بود، از بررسی کنار گذاشته شد و تعداد ۵۱ مقاله و پایان‌نامه وارد فرآیند بررسی گردید که روند این تلخیص، در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- نمودار جریانی تلخیص اسناد علمی

Figure 1 - Flowchart of Summarizing Scientific Documents

اگرچه فرآیند تحلیل اطلاعات در پژوهش‌های کیفی با مدیریت ذهنی انسانی سروکار دارد و نرم‌افزار نمی‌تواند جایگزین آن شود، اما زمانی که حجم اطلاعات زیاد باشد، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای کیفی توصیه می‌شود (Zolfaqarian & Latifi, 2011). در همین راستا در پژوهش حاضر برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار NVivo12 استفاده شد. در مرحله اول، نتایج هریک از اسناد به صورت فایل جداگانه‌ای در نرم‌افزار MS–Word پیاده‌سازی گردیده و پس از بررسی خطبه‌خط متن نتایج، خروجی به‌دست آمده از هر سند شناسایی و مشخص شدند. تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر خروجی اسناد طی سه مرحله ایجاد طبقات اطلاعاتی (کدگذاری باز)، انتخاب یکی از این طبقات و قراردادن آن در یک مدل روابط (کدگذاری محوری) و سپس استنباط یک طبقه‌بندی با استفاده از روابط درونی این طبقات (کدگذاری انتخابی) در محیط نرم‌افزار NVivo12 انجام شد.

کدگذاری باز

فرایند تحلیل داده‌ها در مرحله کدگذاری باز، درنهایت به استخراج ۷۲ مفهوم، ۳۱ خرده مقوله و ۷ مقوله اصلی منجر شد.

کدگذاری محوری

پس از شناسایی مفاهیم، خرده مقوله‌ها و مقوله‌های اصلی در مرحله کدگذاری باز، زمینه برای شکل‌گیری مفهوم اصلی از طریق کدگذاری محوری فراهم شد. در پژوهش حاضر عوامل هفت‌گانه "آموزشی - ترویجی"، "دانش"، "نهادی"، "فنی - زیرساختی"، "اقتصادی"، "اجتماعی" و "زراعی" به عنوان مقوله‌های اصلی شناسایی شدند که نقش اساسی را در سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی ایفا می‌کنند.

نتایج و بحث

۱- مبانی نظری

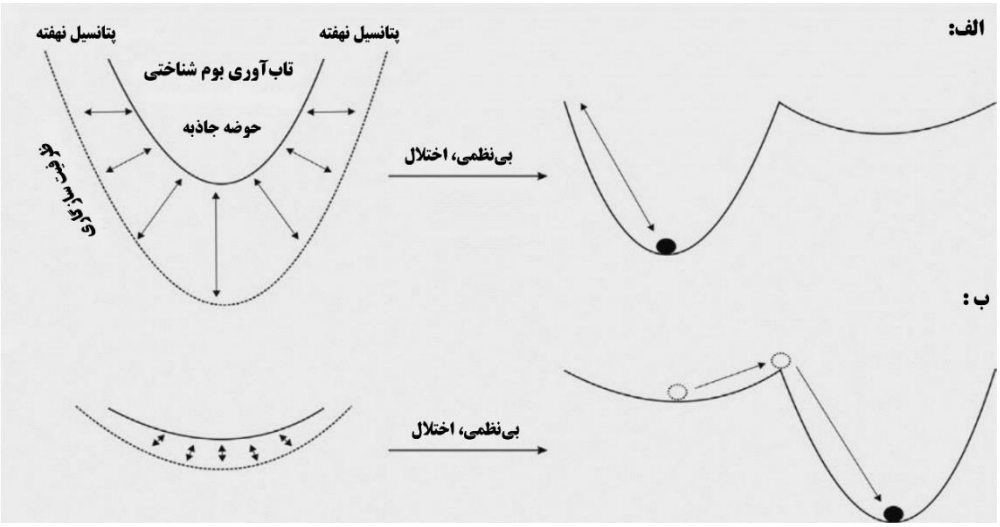
۱-۱- واژه‌کاوی، تبارشناسی سازگاری و ظرفیت سازگاری

با تلاش‌ها و پژوهش‌های متعدد صورت گرفته، مفهوم "ظرفیت سازگاری[9]" به سرعت در علوم اجتماعی، انسانی و تحقیقات اجتماعی – بوم‌شناختی در زمینه‌های فرارشته‌ای مطرح و پذیرفته شده است (Gunderson, 2000; Folke *et al*., 2003).

ظرفیت سازگاری با نظریات تاب‌آوری مرتبط است (Gunderson & Holling, 2002; Holling, 1973). مفهوم "ظرفیت سازگاری"، به موازات توسعه فرارشته‌ای نظریات تاب‌آوری، به تنوع معانی و تعاریف سامانه‌های در حال تغییر کمک کرده است (Gallopín, 2006). سازگاری و ظرفیت سازگاری عمدتاً به صورت کیفی در تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیری، مدیریت ریسک و مخاطرات در علوم اجتماعی استفاده شده است و در زمینه‌ها و علوم مختلف، معانی متفاوتی دارد (Adger, 2006).

گاهی اوقات در علوم بوم‌شناختی، واژگانی مانند منطبق[10]، سازگار[11]، سازواری (قابلیت توافق و سازش)[12] و ظرفیت سازگاری، که اصطلاحاتی با معانی مختلف هستند، به جای یکدیگر استفاده می‌شوند (Brand & Jaks, 2007; Angeler & Allen, 2016) کاربرد ناصحیح از این واژگان و اصطلاحات می‌تواند تأثیرات منفی قابل توجهی داشته باشد، زیرا سازگاری و ظرفیت سازگاری، جهت کمک به هدایت واکنش‌ها به رخدادها و وقایع شدید استفاده می‌شود. علاوه بر آن، مدیریت صحیح تنش‌ها و مخاطرات طبیعی، به درک جامع و کامل این مفاهیم و تمایزات آن‌ها بستگی دارد (Gallopı´n, 2006; Smit & Wandel, 2006). در این بخش تعریف واضح مفاهیم مرتبط با سازگاری در بوم‌سازگان، با هدف تمایز آن از مفاهیم مشابه، به‌ویژه تاب‌آوری و پایداری بوم‌شناختی بررسی می‌شود:

ظرفیت سازگاری: خاصیت نهفته یک سیستم بوم‌شناختی (یا هر سیستم پیچیده دیگر) برای پاسخ به مخاطرات و آشفتگی‌ها، به نحوی که سیستم را در حوضه جذب فعلی خود، با تغییر عمق و یا عرض آن حوضه حفظ کرده و در برابر آن مخاطره سازگار گردد (شکل ۲).



شکل ۲- شماتیک‌هایی که ظرفیت سازگاری بالا (الف) و پایین (ب) را نشان می‌دهند.
Figure 2- Schematics showing high (a) and low (b) adaptive capacity

[9] Adaptive Capacity
[10] Adaptation
[11] Adaptedness
[12] Adaptability

در شکل ۲، ظرفیت سازگاری به عنوان یک پتانسیل نهفته با خطوط نقطه چین نشان داده شده است. پس از ایجاد مخاطره و آشفتگی، تاب‌آوری محیط‌زیستی (طول فلش‌ها) را تحریک می‌کند و حوضه جاذبه را شکل می‌دهد (نقشه‌های سمت چپ). نقشه‌های سمت راست نشان می‌دهد که چگونه ظرفیت سازگاری بالا و پایین، بر توانایی یک سیستم برای ماندن در ساختار فعلی خود (الف) یا تبدیل به یک ساختار جدید (ب) پس از یک اختلال تأثیر می‌گذارد (Angeler & Allen, 2016; Donohue *et al*., 2016).

تاب‌آوری چند وجهی[۱۳]: درجه‌ای از تحمل که شامل یک سامانه با فراوانی و تنوع کارکردی بالا در داخل و سراسر مقیاس‌های آن سامانه است (Adger, 2006; Gallopín, 2006).

انطباق[۱۴]: تغییراتی در ساختار یا عملکرد یک سامانه که سبب پایداری و بقای مناسب‌تر آن می‌شود (Smit & Vendel., 2006).

حافظه بوم‌شناختی: بازنمایی مجموعه‌ای از ویژگی‌های کارکردی و ساختاری در یک بوم‌سازه که توسط تاریخچه مخاطرات یا آشفتگی‌های آن سامانه شکل گرفته است (Adger, 2006; Horner-Dixon, 1991).

سازواری (قابلیت توافق و سازش): توانایی سازگاری برای زندگی و بقا تحت طیف خاصی از شرایط محیطی (Gallopín, 2006).

پایداری: مشخصه‌ی سامانه‌ای است که به موجب آن، ویژگی‌های سامانه پس از تقابل با مخاطره یا آشفتگی، بدون تغییر باقی بمانند. ظرفیت سازگاری می‌تواند ثبات را افزایش دهد، اما اجزای سیستم می‌توانند نوسان داشته باشند (بنابراین ناپایدار هستند) در حالی که همچنان در محدوده مقادیری باقی می‌مانند که حالت اولیه خود را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های پایداری بوم‌شناختی که بر واکنش در برابر آشتفگی‌ها تأثیر می‌گذارند، تنوع، مقاومت، تاب‌آوری مهندسی و ماندگاری هستند (Adger, 2006; Gallopín, 2006; Donohue *et al*., 2016).

سازگار: دارای ویژگی‌های انطباقی (ساختاری، کارکردی و رفتاری)، که برای پایداری و بقای یک سامانه در یک محیط و یا شرایط خاص، ضروری است (Gillespie *et al*., 2007; McMichael *et al*., 2008).

ماندگاری: مدت زمان ثبات یک سیستم، قبل از فروپاشی (به صورت محلی یا جهانی) (Gillespie et al., 2007 Donohue et al., 2016).

تاب‌آوری بوم‌شناختی[۱۵]: ظرفیت یک بوم‌سازگان برای جذب اختلالات یا نوسان‌های مکرر و انطباق با تغییرات بدون تغییر اساسی به حالت پایدار جایگزین (Gallopín, 2006; Donohue *et al*., 2016).

مقاومت[۱۶]: سطحی که یک جامعه، مخاطره یا آشفتگی را تحمل می‌کند (Smit & Vendel., 2006).

تاب‌آوری مهندسی[۱۷]: زمان بازگشت به حالت تعادل پس از ایجاد آشفتگی (Adger, 2006).

تغییرپذیری[۱۸]: اختلاف تراکم جمعیت در طول زمان (Donohue *et al*., 2016).

ساختار جایگزین[۱۹]: یک پیکربندی جایگزین بالقوه از نظر ترکیب ساختاری و عملکردی، فرآیندها و بازخوردها (Windle *et al*., 2010).

حوزه پایداری[۲۰]: ناحیه‌ای که در آن سامانه تمایل دارد به حالت خود باقی بماند و دارای پیکربندی قابل تعریف از ترکیب و فرآیندهای یک سامانه است (Adger, 2006; Donohue *et al*., 2016).

افزونگی کارکردی[۲۱]: وجود بیش از یک فرآیند که عملکرد بوم‌شناختی یکسانی را ارائه می‌دهد و با ایجاد میانجی‌گری، به ظرفیت سازگاری در بوم‌سازگان کمک می‌کند (Smit & Vendel., 2006; Windle *et al*., 2010).

[13] Multifaceted Resilience
[14] Compliance
[15] Ecological Resilience
[16] Resistance
[17] Engineering Resilience
[18] Variability
[19] Alternative State / Regime
[20] Stability Domain
[21] Functional Redundancy

تنوع پاسخ[۲۲]: تنوع در بین افراد یا گونه‌ها در محدوده الگوهای پاسخ به آشفتگی‌ها و مخاطرات (Donohue *et al*., 2016).

تغییر ساختار[۲۳]: تغییر مداوم در ساختار، عملکرد و بازخوردهای یک اکوسیستم (Angeler & Allen, 2016; Horner-Dixon, 1991; McMichael *et al*., 2008).

مرور کلی تعاریف و کاربردهای سازگاری تاکنون، برخی از تفاوت‌ها را نشان می‌دهد، اما شباهت‌های زیادی نیز در نحوه تعریف آن در طیف وسیعی از حوزه‌ها را نشان می‌دهد که پیچیدگی زیربنای این مفهوم را تأیید می‌کنند. تمام کاربردهای شناسایی شده از این مفهوم، برای مراحل بعدی تجزیه و تحلیل، کاربرد خواهند داشت. نحوه تعریف سازگاری نشان می‌دهد که چگونه می‌توان آن را اندازه‌گیری کرد و بنابراین ارزیابی با جزئیات تعاریف مرتبط است (Garmezy., 1985; Werner & Smith., 1992; Werner., 1995; Richardson., 2002; Olsson *et al*., 2003; Kitano & Lewis., 2005; Punamäki *et al*., 2006; Gillespie *et al*., 2007; Ryan *et al*., 2007; Windle *et al*., 2010).

۱-۲- واژه‌کاوی و تبارشناسی مخاطرات محیطی

واژه "مخاطره" که در زبان انگلیسی به Hazard، در عربی به "اخطاره" ترجمه می‌شود، از واژه فرانسوی باستان Hasard گرفته شده است. این واژه در سده دوازدهم میلادی در فرانسه به نوعی بازی اطلاق می‌شد که با "تاس" انجام می‌گرفت (Moghimi., 2014; Heydarifar & Rezaei., 2017). همچنین واژه‌هایی نظیر Risk، Hazard، Danger و Threats نیز وجود دارند که به معنای خطر، مخاطره و یا تهدید می‌باشند. در مطالعات موجود در حیطه مخاطرات، از واژه "ریسک" اغلب به عنوان احتمال خطر و با امکان وقوع یک حادثه بحث می‌شود و واژه Threats نیز به معنای تهدید است که بیش‌تر جنبه انسانی آن مدنظر قرار می‌گیرد (Mesbah *et al*., 2022).

به طور کلی، مخاطرات به حوادثی اطلاق می‌شوند که ضمن دگرگون ساختن حیات اجتماعی و اقتصادی، به خسارات بزرگ مادی و قربانی و زخمی شدن انسان‌ها و نیز توقف فعالیت‌های انسانی منجر می‌شوند. مخاطره در معنای وسیع عبارت است از "حوادث طبیعی یا حوادث فناورانه با منشا انسانی که خسارات فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی را به انسان‌ها وارد می‌کند" (Naderi *et al*., 2022). حوادث مزبور، مختل‌کننده زندگی عادی و فعالیت‌های انسانی است. انسان‌ها در جهت تأمین نیازهای خود، تغییرات بزرگی را بر کره زمین تحمیل می‌کنند که این تغییرات موجبات برهم خوردن نظام طبیعی و در نهایت مخاطرات انسانی می‌شود (Uzi., 2011; Smith., 2013).

اصطلاح "مخاطرات طبیعی" غالباً به رویدادهای طبیعی یا ژئوفیزیکی اطلاق می‌شود؛ زیرا این واژه‌ها با ماهیت آن‌ها سنخیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین مخاطرات طبیعی عبارت است از وقوع ناگهانی و یا نامحسوس پدیده‌هایی که منشاء طبیعی داشته و جزء خصوصیات ذاتی کره زمین بوده و به دلیل نحوه عملکرد در قلمرو سکونتگاه‌های انسان و تاسیسات وی، موجب کشتار، تخریب و خسارات مستقیم و غیرمستقیم در ابعاد مختلف می‌شوند (MododiArkhodi *et al*., 2020; Masten *et al*., 2006). تاکنون حدود ۴۳ خطر طبیعی در سطح زمین شناسایی شده است که به‌طور انفرادی یا در ترکیب با یکدیگر، جان و مال افراد و برنامه‌های مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی کشورها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Ownegh, 2002). در جدول ۲، این مخاطرات معرفی و طبقه‌بندی شده‌اند.

[22] Response Diversity

[23] Regime Shift

جدول ۲- طبقه‌بندی مخاطرات طبیعی (EM-DAT, 2024)

Table 2- Classification of Natural Hazards (EM-DAT, 2024)

گروه بلایا	نوع اصلی فاجعه	نوع فرعی فاجعه	گروه بلایا	نوع اصلی فاجعه	نوع فرعی فاجعه
ژئوفیزیک	زمین لرزه	رانش زمین سونامی	بیولوژیکی	هجوم حشرات	ملخ شته
	حرکت توده‌ای (خشک)	سقوط سنگ رانش زمین		تصادف حیوانات	-
	فعالیت آتشفشانی	ریزش خاکستر جریان گدازه پرتاب گدازه جریان پیروکلاستیک		اپیدمی	بیماری ویروسی بیماری باکتریایی بیماری انگلی بیماری قارچی بیماری پریون
هواشناسی	مه	-	هیدرولوژیکی	رانش زمین	بهمن[۲۴]
	دمای شدید	موج سرما موج گرما شرایط سخت زمستانی		فعالیت موج	موج سرکش امواج کاسه ماهی
	طوفان	طوفان فرا گرمسیری طوفان استوایی طوفان همرفتی[۲۵]		سیل	سیل ساحلی سیل رودخانه سیل ناگهانی سیل مخلوط یخ
اقلیم‌شناسی	خشکسالی	-	فرازمینی	تاثیرات	انفجار هوا
	طغیان دریاچه یخبندان	-		آب و هوای فضا	ذرات پر انرژی طوفان ژئومغناطیسی امواج شوک‌دهنده
	آتش‌سوزی	آتش‌سوزی جنگل آتش‌سوزی زمین[۲۶]			

همواره وقوع حوادث طبیعی مانند سیلاب، خشکسالی در عرصه‌های جغرافیایی به ویژه در مناطق روستایی تاثیرات مخربی بر جای می‌گذارد. براساس رتبه‌بندی جهانی، ایران در مخاطره خشکسالی در دسته A (پرریسک) و در مخاطره سیل، در رتبه ۳۵ام قرار گرفته است (EM-DATE, 2024).

حوادث طبیعی اغلب با تخریب منابع اقتصادی و امکانات رفاهی و زیستی، سلامت ساکنان را به خطر می‌اندازد و همیشه خطر جدی برای توسعه به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به شمار می‌روند Barghi *et al*., 2017; Shayan *et al*., 2017). لذا توجه به نواحی روستایی و جوامع کشاورزی که ضعف در امکانات و سطح اجتماعی - اقتصادی، آن‌ها را در برابر بلایا آسیب‌پذیر ساخته، اهمیت بسیاری دارد Mesbah *et al*., 2011; Normandin *et al*., 2018).

- رویکردهای مدیریت مخاطرات

به منظور پیش‌گیری از وقوع مخاطرات طبیعی، اولویت‌بندی و شناسایی درست هریک از عوامل مؤثر و چگونگی مدیریت آن‌ها، امری الزامی است. امروزه، پیش‌بینی و انجام اقدامات سازگارانه در جهت مدیریت این مخاطرات بیش از هر زمانی، امری حیاتی است. در این ارتباط، مرور منابع نشان‌دهنده دو رویکرد رایج در زمینه مدیریت مخاطرات طبیعی است (Cutter *et al*., 2000، Adger *et al*., 2006، McEntire *et al*., 2010). در این مورد، انواع اقدامات مبتنی بر حیطه‌های فرعی ساختاری (بنیادی)، نهادی

[۲۴] برف، آوار، گل و لای، ریزش سنگ

[۲۵] طوفان خطی، تگرگ، رعد و برق / طوفان تندری، باران، گردباد، طوفان شن / گرد و غبار، کولاک زمستانی، طوفان امواج، باد، طوفان شدید

[۲۶] علف هرز، بوته، مرتع

مصباح و همکاران

(تاب‌آوری)، علوم فیزیکی و مهندسی قابل تشخیص است (جدول ۳).

جدول ۳- رویکردهای شناخته شده و اقدامات رایج در زمینه مدیریت مخاطرات طبیعی (Cutter *et al*., 2000; Adger *et al*., 2006; McEntire *et al*., 2010)

Table 3 - Known Approaches and Common Actions in the Field of Natural Hazard Management (Cutter *et al*., 2000; Adger *et al*., 2006; McEntire *et al*., 2010)

رویکرد	حیطه یا زمینه	هدف	ابعاد مورد توجه	روش شناسی	مدل برنامه‌ریزی	راه‌حل عمده	محوریت	اقدام
رویکرد توسعه‌ای یا جامعه محور	ساختاری (بنیادی)	آسیب‌پذیری؛ افزایش ظرفیت و توانایی	اجتماعی- اقتصادی و جمعیتی	تحلیل شبکه‌های اجتماعی و کیفی	حمایت و جلب مشارکت	تغییر و ارتقای شرایط و ساختارهای اجتماعی	کاهش آسیب‌پذیری/ ارتقای ظرفیت با در نظر گرفتن نژاد، قومیت، جنسیت، سن و فقر	کاهش فقر و نابرابری و افزایش دسترسی به منابع و امکانات
	نهادی (تاب‌آوری)	پایداری و برگشت‌پذیری سیستم	چندبعدی، یکپارچه	کمی و کیفی	اجتماع محور، مشارکتی	افزایش قابلیت انطباق، پایداری و برگشت‌پذیری	تاب‌آوری (پیشگیری، آمادگی، واکنش، رهبری، بازیابی و بهبود)	ترکیبی و همه‌جانبه و مبتنی بر پایداری و انطباق
رویکرد سنتی یا پشتیبانی	علوم فیزیکی	کاهش خطر و زیان‌های فیزیکی از طریق در معرض قرارگیری	فیزیکی و محیطی	فن‌گرا و کمی	مدل فرماندهی و کنترل	دانش فنی، اصلاح رفتار	ممانعت از خطر/ واکنش به بحران و برنامه‌ریزی کاربری زمین و الگوهای دقیق سکونتگاه‌ها	ایجاد سیستم‌های هشدار، حفاظت محیط‌زیست، جابجایی کامل جوامع آسیب‌پذیر، واکنش فوری، امداد و نجات
	مهندسی	خطر؛ افزایش مقاومت	محیط ساخته شده	منطقی و خردگرا	مدل فرماندهی و کنترل مرکزی	دانش فنی، شیوه‌های ساخت و ساز	ممانعت از خطر/ افزایش مقاومت	معماری ساختمان، مصالح ساختمانی و طراحی دقیق زیرساخت‌های حیاتی

سنجش میزان سازگاری در برابر حوادث طبیعی جهت کاهش اثرات آن، از اهمیت فراوانی برخوردار است. اتخاذ این رویکردها جهت مقابله با خطرات احتمالی و تقویت مردم برای مقابله با آن است؛ در واقع مفهوم واژه سازگاری، بیان‌گر قدرت هماهنگی آن با تمام مراحل حادثه و مدیریت آن است (Davis & OstvarIzadkhah., 2006).

۲- ابعاد سازگاری در برابر مخاطرات محیطی

براساس یافته‌های پژوهش و پس از تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر خروجی نرم‌افزار Nvivo12، نتایج اکثر پژوهش‌ها در ۷ بعد آموزشی - ترویجی، دانش، نهادی، فنی - زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و زراعی قابل طبقه‌بندی می‌باشند. شایان ذکر است که اولین مطالعه‌ی صورت گرفته در زمینه‌ی سازگاری در ایران، در قالب مقاله نیز در سال ۱۳۶۸ توسط عبدالمجید رضائی و ک.ج فرای[27] تحت عنوان "مطالعه سازگاری ایزولاین‌های یولاف" در "مجله علوم کشاورزی ایران" و در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در سال ۱۳۷۹ در دانشگاه الزهرا با عنوان "بررسی رابطه‌ی نقش جنسیتی با سازگاری زناشویی (دانشجویان متاهل تهرانی)" توسط حمیرا علی‌محمدی صورت پذیرفته است، اما همان‌گونه که مطرح گردید، مطالعات سازگاری در زمینه مخاطرات طبیعی به‌خصوص در مناطق روستایی از عمر کوتاهی برخوردار می‌باشند؛ به‌گونه‌ای که شروع این مطالعات در ایران، از ابتدای دهه ۱۳۹۰ هجری شمسی و از سال ۱۳۹۳ بوده است که نتایج بررسی این مطالعات به صورت خلاصه در قالب جدول ۴ ارائه گردیده است.

[27] Farai, K.J

جدول ۴- خلاصه‌ای از نتایج مطالعات انجام گرفته در زمینه سازگاری جوامع کشاورزی در مناطق روستایی ایران

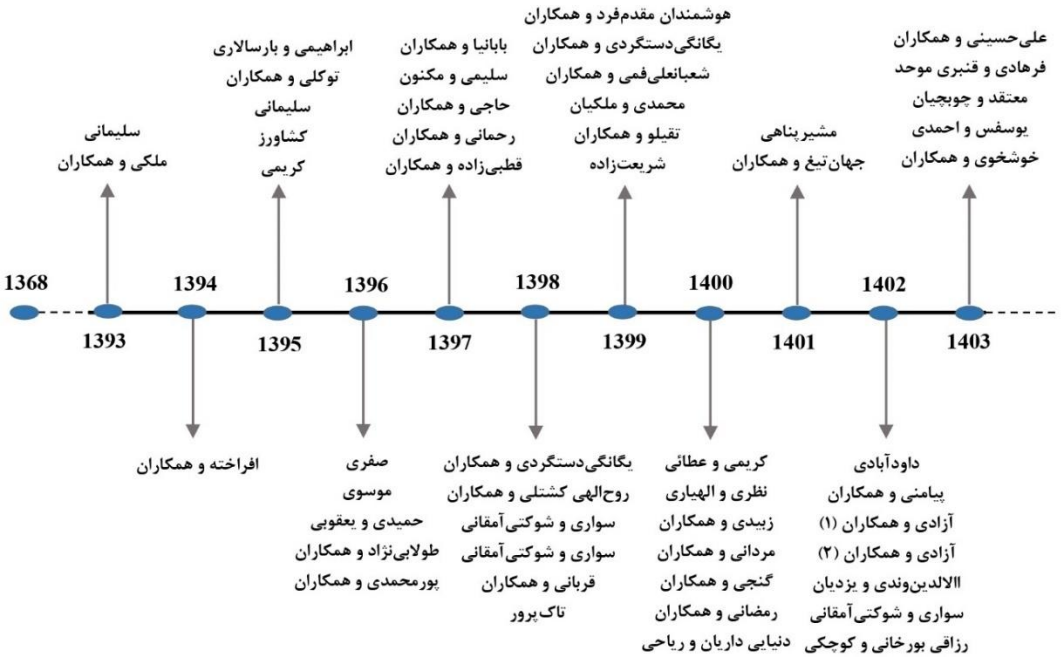
Table 4 - Summary of Studies on the Adaptation of Agricultural Communities in Rural Areas of Iran

پژوهشگران	حیطه	منطقه مورد مطالعه	شیوه مطالعه	عوامل موثر بر سازگاری						
				آموزشی- ترویجی	دانش	نهادی	فنی – زیرساختی	اقتصادی	اجتماعی	زراعی
AliHosseini et al (2024)	خشکسالی	خراسان‌رضوی	آزمون‌های آماری			✓	✓	✓	✓	✓
Farhadi & GhanbariMovahed (2024)	سیل	خرم‌آباد	مدل‌سازی معادلات ساختاری		✓					
Motaghed & Choubchian (2023)	خشکسالی	همدان	تحلیل مولفه اصلی			✓	✓	✓	✓	✓
Yousefi & Ahmadi (2023)	خشکسالی	اصفهان	مدل تحلیل شبکه‌های اجتماعی						✓	✓
Khoshkhoy et al (2023)	ترکیبی[۲۸]	ایران	مطالعات کتابخانه‌ای							✓
Azadi et al (1) (2023)	خشکسالی	کرمانشاه	آزمون‌های آماری با نرم‌افزارهای SPSS و AMOS		✓				✓	
Azadi et al (2) (2023)	خشکسالی	کرمانشاه	مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) با نرم‌افزار PLS		✓				✓	
Al-EddinVandi & Yazdian (2022)	خشکسالی	اصفهان	آزمون‌های آماری و تحلیل عاملی اکتشافی با نرم‌افزار SPSS		✓		✓	✓	✓	✓
Payamni et al (2022)	خشکسالی	خرم‌آباد	مدل SOWT و روش دلفی			✓	✓			✓
DavoodAbadi (2022)	خشکسالی	کرمان	بهره‌گیری از شاخص SPI						✓	
RazzaghiBorkhani & Kouchaki (2022)	خشکسالی	ایران	مرور ادبیات و تحلیل محتوا		✓					
Savari & ShokatiAmqani (2022)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS		✓					
Moshirpanahi (2022)	خشکسالی	ایران	آزمون‌های آماری		✓		✓			
Jahantigh (2021)	ترکیبی	خرم‌آباد	آزمون‌های آماری			✓	✓	✓	✓	
DonyayiDarian & Riahi (2021)	خشکسالی	آذربایجان‌شرقی	تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP				✓			✓
Ramezani et al (2021)	خشکسالی	قم	مدلسازی معادلات ساختاری				✓			
Karimi & Ataei (2021)	خشکسالی	سیستان و بلوچستان	آزمون‌های آماری و تحلیل عاملی با نرم‌افزارهای SPSS و AMOS				✓			
Ganji et al (2021)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS				✓		✓	
Mardani et al (2020)	خشکسالی	اصفهان	مطالعات کتابخانه‌ای و تطبیقی			✓	✓		✓	✓
Nazari & Allahiari (2020)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری					✓		✓
Zobeidi et al (2020)	خشکسالی	خوزستان	نظریه بنیانی					✓	✓	✓
HooshmandanMoghadamfard et al (2020)	ترکیبی	زنجان	آزمون‌های آماری	✓	✓		✓		✓	
Taghiloo et al (2020)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	آزمون‌های آماری		✓					
Shariatzadeh (2020)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS			✓	✓		✓	
Shabanali Femi et al (2020)	خشکسالی	اصفهان	مدل SOWT					✓		✓
Mohammadi & Malekian (2020)	ترکیبی	کرمانشاه	آزمون‌های آماری		✓	✓	✓	✓	✓	
YegangiDastagerdi et al (2020)	خشکسالی	چهارمحال و بختیاری	آزمون‌های آماری		✓				✓	
TakParvar (2019)	ترکیبی	فارس	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS					✓		✓
RoohAllahi Kashtali et al (2019)	خشکسالی	البرز	آزمون‌های آماری			✓	✓	✓	✓	
Savari & ShoktiAmghani (2019)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	تحلیل مکانی با نرم‌افزار GIS، تحلیل سلسله مراتبی فازی و آزمون‌های آماری	✓			✓	✓	✓	✓
Ghorbani et al (2019)	ترکیبی	خراسان‌رضوی	آزمون‌های آماری				✓	✓	✓	✓
Savari & ShoktiAmghani (2019)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS	✓			✓	✓	✓	
YegangiDastagerdi et al (2019)	خشکسالی	چهارمحال و بختیاری	آزمون‌های آماری			✓	✓			
Haji et al (2018)	خشکسالی	ایران	مطالعات کتابخانه‌ای	✓						
Rahmani et al (2018)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS		✓		✓	✓	✓	
Salimi & Maknun (2018)	خشکسالی	آذربایجان‌غربی	مدل چرخ ظرفیت‌سازگاری		✓	✓	✓			
Babania et al (2018)	ترکیبی	آذربایجان‌غربی	روش تصمیم‌گیری استوار (SWAT)			✓	✓			✓
Ghotbizadeh et al (2018)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری و تحلیل عاملی			✓				
Tulabinezhad et al (2017)	ترکیبی	خوزستان	آزمون‌های آماری		✓			✓		

[۲۸] ترکیبی از اکثر مخاطرات طبیعی به وقوع پیوسته در منطقه

Mousavi (2017)	ترکیبی	خراسان‌رضوی	تحلیل شبکه اجتماعی		✓				✓
Pourmohammadi et al (2017)	سیل	همدان	مدل LARS-WG و تابع توزیع بتا				✓		
Hamidi & Yaqoubi (2017)	خشکسالی	زنجان	آزمون‌های آماری					✓	✓
Safari (2017)	خشکسالی	زنجان	آزمون‌های آماری	✓	✓			✓	✓	✓
Ebrahimi & Barsalari (2016)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS	✓		✓		✓		✓
Tavakoli et al (2016)	خشکسالی	کرمانشاه	آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS		✓					✓
Soleimani (2016)	خشکسالی	کرمانشاه	تحلیل مکانی و آزمون‌های آماری با نرم‌افزار GIS و SPSS			✓		✓	✓	
Karimi (2016)	ترکیبی	ایران	مطالعات کتابخانه‌ای			✓	✓		✓	✓
Keshavarz (2016)	خشکسالی	فارس	آزمون‌های آماری با نرم‌افزارهای SPSS و EXCEL			✓	✓	✓	✓	✓
Afrakhte et al (2015)	خشکسالی	کرمانشاه	تلفیقی (PRA و تئوری بنیانی)			✓	✓	✓	✓	
Soleimani (2014)	خشکسالی	ایران	مطالعات کتابخانه‌ای		✓		✓		✓	
Maleki et al (2014)	خشکسالی	کرمانشاه	آزمون‌های آماری		✓		✓	✓	✓	

براساس یافته‌های جدول فوق، به دلیل جدید بودن مبحث سازگاری در کشور ایران، اکثر مطالعات در بازه زمانی ده ساله اخیر، بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ صورت پذیرفته است که نتایج به‌دست آمده بیان‌گر آن بود که کثرت پژوهش‌های صورت گرفته به‌ترتیب در سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۰ (در هر سال ۷ پژوهش)، سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۳۹۸ (در هر سال ۶ پژوهش)، سال‌های ۱۴۰۳، ۱۳۹۷، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۵ (در هر سال ۵ پژوهش)، سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۳۹۳ (در هر سال ۲ پژوهش) و سال ۱۳۹۴ (یک پژوهش) می‌باشد که در شکل ۳ (خط روند[۲۹]) قابل مشاهده است.



شکل ۳- خط زمانی انواع اسناد علمی مرتبط با سازگاری جوامع روستایی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (خشکسالی، سیل و پژوهش‌های ترکیبی)

Figure 3- Timeline of types of scientific documents related to the adaptation of Iranian rural communities to natural hazards (drought, flood, and combined research)

[29] Time Line

بررسی جغرافیایی مطالعات صورت گرفته نشان داد که در حوزه منطقه جغرافیایی، بیشترین مطالعات (با فراوانی ۴۵ درصد) در غرب ایران و در حوزه استانی، بیشترین مطالعات در استان‌های کرمانشاه و فارس (هرکدام با فراوانی ۱۳/۷ درصد) صورت گرفته است (جدول ۵ و شکل ۴).

جدول ۵- تقسیم‌بندی جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در زمینه سازگاری جوامع کشاورزی در مناطق روستایی ایران
Table 5- Regional division of study areas in the adaptation of Iran's rural agricultural communities

استان مورد مطالعه	فراوانی	درصد فراوانی	منطقه جغرافیایی	فراوانی	درصد فراوانی
کرمانشاه	۷	۱۳/۷	غرب ایران	۲۳	۴۵
آذربایجان غربی	۶	۱۱/۷			
لرستان	۳	۵/۹			
زنجان	۳	۵/۹			
آذربایجان شرقی	۲	۳/۹			
همدان	۲	۳/۹			
فارس	۷	۱۳/۷	جنوب ایران	۱۰	۱۹/۶
خوزستان	۲	۳/۹			
کرمان	۱	۲			
اصفهان	۴	۷/۹	مرکز ایران	۸	۱۵/۸
چهارمحال و بختیاری	۲	۳/۹			
قم	۱	۲			
البرز	۱	۲			
خراسان رضوی	۳	۵/۹	شرق ایران	۴	۷/۹
سیستان و بلوچستان	۱	۲			
مطالعات کلی در سطح کشور	۶	۱۱/۷	فلات ایران	۶	۱۱/۷
مجموع	**۵۱**	**۱۰۰**	**مجموع**	**۵۱**	**۱۰۰**



شکل ۴- پراکنش جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در زمینه سازگاری جوامع کشاورزی در مناطق روستایی ایران
Figure 4- Geographical distribution of study areas in agricultural adaptation in rural Iran

در شکل ۴، منظور از طبقه کلی، پژوهش‌های صورت گرفته با نمونه آماری کل کشور ایران می‌باشد و استان‌هایی که در این طبقه قرار گرفته‌اند، صرفا از این نوع پژوهش‌ها را شامل می‌شوند و پژوهش‌های موردی در آن‌ها صورت نگرفته است.

این نتایج بیانگر آن است که مطالعات در زمینه سازگاری جوامع کشاورزی در کشور ایران از توزیع همگنی برخوردار نبوده و برخلاف مناطق غربی و جنوبی کشور، در مناطق شمالی و شرقی ایران مطالعات اندکی صورت گرفته و یا اصلا مطالعه‌ای صورت نگرفته است که دلیل آن می‌تواند مواجهه بیشتر این مناطق با این قبل مخاطرات طبیعی نیز باشد. لذا توصیه می‌گردد تا با شناسایی مخاطرات محیطی به وقوع پیوسته در مناطق شمالی و شرقی ایران، اقدام به مطالعاتی در زمینه سازگاری با این مخاطرات صورت پذیرد.

داده‌های اغلب پژوهش‌های مورد مطالعه، در مرحله نخست، با استفاده از آزمون‌های آماری پارامتریک و ناپارامتریک به وسیله نرم‌افزارهای آماری مانند EXCEL و SPSS مورد بررسی قرار گرفتند و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای PLS و AMOS و شیوه‌های رتبه‌بندی مربوط به روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه مانند روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در هر دو حوزه فازی و غیرفازی مورد تحلیل قرار گرفته و درنهایت برای زمین‌مرجع نمودن داده‌ها و نمایش فضایی جهت پهنه‌بندی در حوزه‌های مورد مطالعه از نرم‌افزارهای مرسوم سامانه اطلاعات جغرافیایی مانند ArcGIS نیز استفاده گردید.

نتایج پژوهش نشان داد آزمون‌های آماری، بیش‌ترین فراوانی (۵۰ درصد) و استفاده از تکنیک‌های تحلیلی (SPI[۳۰] و غیره)، کم‌ترین فراوانی (۱/۸ درصد) را در زمینه روش‌های مطالعه نمونه آماری پژوهش به خود اختصاص داده‌اند. این نتایج به تفضیل در جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۶- روش مطالعه پژوهش‌های جامعه آماری

Table 6- Research methodology for the statistical population

روش مطالعه	فراوانی	درصد فراوانی
آزمون‌های آماری	۲۹	۵۰
روش‌های کیفی (نظریه بنیادی، تحلیل اسناد، مطالعات کتابخانه‌ای و غیره)	۹	۱۵/۵
تحلیل عاملی و مدل ساختاری	۸	۱۳/۸
استفاده از مدل‌های تحلیلی (SWOT، SWAT، LARS-WG و چرخ ظرفیت سازگاری)	۵	۸/۷
سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)	۲	۳/۴
روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP و فازی	۲	۳/۴
تحلیل شبکه‌های اجتماعی	۲	۳/۴
استفاده از سایر تکنیک‌های تحلیلی (شاخص SPI)	۱	۱/۸
مجموع	**۵۸**	**۱۰۰**

نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که بیش‌ترین مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی سازگاری، در حیطه‌ی خشکسالی با ۳۶/۸ درصد فراوانی و کم‌ترین مطالعات در حیطه سیل با ۳/۹ درصد فراوانی است که نتایج فوق به صورت تفصیلی در شکل ۵ به نمایش درآمده است.



شکل ۵- درصد فراوانی حیطه پژوهش‌های مورد مطالعه

Figure 5- Percentage of frequency of the research area under study

[۳۰] شاخص SPI با مقایسه کل بارندگی تجمعی برای ایستگاه یا ناحیه‌ای خاص در یک فاصله زمانی مشخص (بعنوان مثال سه یا شش ماه گذشته) با میانگین درازمدت بارندگی برای همان فاصله زمانی، در طول دوره آماری بدست می آید.

همچنین نتایج نشان داد که عوامل اجتماعی (۲۰/۵ درصد فراوانی)، بیش‌ترین و عوامل آموزشی - ترویجی (۴/۳ درصد فراوانی)، کمترین فراوانی را در بین عوامل موثر بر سازگاری جوامع روستایی ایران در برابر مخاطرات داشته است این نتایج در زمینه‌ی پژوهش‌های بین‌المللی نیز با نتایج بسیاری از محققین (Angeler & Allen, 2016; Donohue et al., 2016; Liao et al, 2019; Vallury et al, 2020) همسو می‌باشد. نتایج تفصیلی عوامل موثر بر سازگاری، در جدول ۸ به نمایش درآمده است.

جدول ۸- شاخص‌های مورد مطالعه در جامعه آماری

Table 8- Indicators studied in the statistical population

شاخص	فراوانی	درصد فراوانی
اجتماعی	۲۹	۲۰/۵
فنی - زیرساختی	۲۸	۱۹/۹
اقتصادی	۲۲	۱۵/۶
زراعی	۲۰	۱۴/۲
دانش	۱۹	۱۳/۵
نهادی	۱۷	۱۲
ترویجی - آموزشی	۶	۴/۳
مجموع	**۱۴۱**	**۱۰۰**

در نهایت و در یک جمع‌بندی نهایی، اقدام به مطالعه‌ای تلفیقی بین حیطه‌های پژوهش (سیل، خشکسالی و همچنین پژوهش‌های ترکیبی) و ابعاد هفت‌گانه موثر بر سازگاری (آموزشی - ترویجی، دانش، نهادی، فنی - زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و زراعی) گردید که نتایج به‌دست آمده به طور تفضیلی در جدول ۹ و شکل ۹ قابل مشاهده است.

در هریک از سه بخش مورد بررسی (دو مخاطره و یک بخش مطالعات ترکیبی)، نتایج کلی حاکی از آن است که:

سیل: در پژوهش‌های مربوطه، عوامل دانش و فنی - زیرساختی، هرکدام با ۵۰ درصد فراوانی، عوامل موثر بر سازگاری جوامع روستایی در برابر مخاطرات طبیعی را تشکیل می‌دادند. این نتایج در سطح بین‌المللی، با نتایج پژوهش‌های Donohue *et al* (2016) و Gallopín (2006) که این دو حیطه را در پژوهش‌های سازگاری حیطه سیل از سایر حیطه‌ها حائز اهمیت بیش‌تری می‌دانند، همسو می‌باشد.

جدول ۹- اهمیت عوامل موثر بر سازگاری در برابر مخاطرات براساس عوامل هفت‌گانه

Table 9 - Importance of seven key factors affecting hazard adaptation

حیطه پژوهش / عوامل سازگاری	سیل		خشکسالی		ترکیبی	
	فراوانی	درصد فراوانی	فراوانی	درصد فراوانی	فراوانی	درصد فراوانی
آموزشی - ترویجی	۰	۰	۵	۴/۶	۱	۳/۲
دانش	۱	۵۰	۱۴	۱۳	۴	۱۲/۹
نهادی	۰	۰	۱۳	۱۲	۴	۱۲/۹
فنی - زیرساختی	۱	۵۰	۲۱	۱۹/۵	۶	۱۹/۴
اقتصادی	۰	۰	۱۷	۱۵/۷	۵	۱۶/۱
اجتماعی	۰	۰	۲۳	۲۱/۳	۶	۱۹/۴
زراعی	۰	۰	۱۵	۱۳/۹	۵	۱۶/۱
مجموع	**۲**	**۱۰۰**	**۱۰۸**	**۱۰۰**	**۳۱**	**۱۰۰**

خشکسالی: بعد اجتماعی با ۲۱/۳ درصد فراوانی و بعد آموزشی - ترویجی با ۴/۶ درصد فراوانی، به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین توجه در پژوهش‌های صورت گرفته در این حیطه برخوردار بودند. این نتایج در سطح بین‌المللی با نتایج پژوهش‌های Windle *et al*., 2010 و Eswaran *et al*., 2019 که عوامل اجتماعی را در پژوهش‌های سازگاری در حیطه خشکسالی از سایر عوامل حائز اهمیت بیش‌تری می‌دانند، همسو می‌باشد.

پژوهش‌های ترکیبی: در این حیطه نیز عوامل فنی - زیرساختی و اجتماعی، هرکدام با ۱۹/۴ درصد فراوانی، بیش‌ترین و بعد آموزشی - ترویجی با ۳/۲ درصد فراوانی کم‌ترین توجه را به خود اختصاص داده‌اند. این

نتایج در سطح بین‌المللی با نتایج پژوهش‌های Angeler & Allen (2016) و Vallury *et al* (2022) که عوامل فنی - زیرساختی و اجتماعی را در پژوهش‌های سازگاری از سایر عوامل حائز اهمیت بیش‌تری می‌دانند، همسو می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

هدف پژوهش حاضر، واکاوی جامع و نظامند در رابطه با عوامل موثر بر سازگاری جوامع کشاورزی ایران در برابر مخاطرات طبیعی (سیل، خشکسالی و ترکیبی) بود. آن‌چه مشخص گردید این بود که مفهوم سازگاری و ظرفیت‌سازگاری بسیار متغیر بود و این مفهوم به عنوان پتانسیل نهفته یک اکوسیستم جهت تاب‌آوری و پاسخ به تغییر تعریف می‌شود. رویکرد توسعه‌ای و رویکرد سنتی، دو رویکرد اصلی مدیریت مخاطرات شناسایی شدند که هرکدام اقدامات مدیریتی منحصر به خود را دارند، به طوری‌که در رویکرد نخست اقدامات پایدار با ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی جهت حفظ پایداری سامانه در زمینه مدیریت مخاطرات مدنظر است، اما در رویکرد دوم یعنی سنتی بیشتر اقدامات پیشگیرانه و محافظتی اعمال می‌گردد که این دو رویکرد را می‌توان هم به صورت توامان به‌کار برد و هم با توجه به شرایط، یکی از آن‌ها را به کار گرفت. در نهایت نتایج حاصل بیان‌گر آن بود که عوامل اجتماعی، فنی - زیرساختی، اقتصادی، زراعی، دانش، نهادی و آموزشی - ترویجی، به‌ترتیب مهمترین عوامل موثر بر سازگاری جوامع روستایی ایران در برابر مخاطرات طبیعی هستند. در نهایت یافته‌های مطالعات مدنظر در ابعاد هفت‌گانه‌ی آموزشی - ترویجی، دانش، نهادی، فنی - زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و زراعی طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل بیان‌گر آن بود که؛

۱ - در حیطه سیل با توجه به اهمیت عوامل دانش و فنی - زیرساختی، پیشنهاد می‌گردد تا مدیران و سیاست‌گذاران بخش اجرائی، با فراهم‌سازی زیرساخت‌های فنی و دانشی، گام در مسیر نیل به افزایش سازگاری جوامع روستایی و کشاورزی در برابر مخاطرات طبیعی بردارند.

۲- در حیطه خشکسالی با توجه به اهمیت عوامل اجتماعی، پیشنهاد می‌گردد تا مولفه‌های این عوامل به صورت دقیق و موشکافانه‌تر مورد کنکاش قرار گیرند و نقش نهادهای محلی، استانی و کشوری ذیربط که با توسعه‌ی زیرساخت‌ها و سرمایه‌های اجتماعی نظیر مشارکت، اعتماد، تعامل و غیره، می‌توانند سطح سازگاری جوامع روستایی را در برابر مخاطرات طبیعی افزایش داده و باعث تاب‌آور شدن آن‌ها در برابر اینگونه مخاطرات گردند، تبیین گردد و همچنین مدیران و سیاست‌گذاران جوامع روستایی و کشاورزی، توجه ویژه‌ای بر بهبود وضعیت معیشت این جوامع، خصوصاً در سال‌های وقوع خشکسالی در جهت افزایش ظرفیت سازگاری آن‌ها با این مخاطره داشته باشند.

۳- در حیطه پژوهش‌های ترکیبی نیز اهمیت عوامل فنی - زیرساختی و اجتماعی، حاکی از آن است که این عوامل در تمامی مخاطرات طبیعی، به دلیل تاثیرات اولیه این مخاطرات بر روی زیرساخت‌ها و تاسیسات غالباً ناپایدار جامعه روستایی و بهره‌برداران منابع طبیعی و همچنین به عنوان محکی جدی برای عوامل اجتماعی این جوامع، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌گردد تا دستگاه‌های مدیریتی چه در زمینه سیاست‌گذاری و چه در زمینه اجرائی، توجه خاصی به ارتقا و پایدارسازی این زیرساخت‌ها در جهت افزایش سطح پایداری جوامع روستایی و کشاورزی کشور داشته باشند.

براساس این نتایج پیشنهاد می‌گردد تا نهادهای محلی، استانی و کشوری ذیربط، با توسعه‌ی زیرساخت‌ها و سرمایه‌های اجتماعی نظیر مشارکت، اعتماد، تعامل و غیره، سطح سازگاری جوامع روستایی را در برابر مخاطرات طبیعی افزایش داده و باعث تاب‌آور شدن آن‌ها در برابر اینگونه مخاطرات گردند.

در نهایت و جهت انجام پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌گردد تا پژوهشگران این عرصه:

۱- به بررسی کارایی هریک از روش‌های سنجش سازگاری و ظرفیت آن و مقایسه آن با سایر روش‌ها بپردازند و

۲- به معیارهای مهم مورد بررسی در هر بعد پرداخته شود. بدین منظور که هر بعد دارای معیارهایی است که توصیف کننده هر بعد است؛ بنابراین بررسی اینکه در هر مخاطره به عنوان مثال در سازگاری در مقابل مخاطره سیل، بررسی چه معیارهایی از بعد اجتماعی می‌تواند کمک کننده باشد و باعث ایجاد تفاوت معنادار در نتایج حاصل از بررسی سازگاری خواهد شد، مورد بررسی قرار گیرد یا در سازگاری خشکسالی، پرداختن به کدام معیارهای بعد اقتصادی بهتر می‌تواند در ارتقای سازگاری در صورت بروز این بحران کمک کند.

۳- به بررسی و مطالعه عوامل موثر بر افزایش سازگاری جوامع روستایی در سایر کشورهای جهان پرداخته و ضمن اکتشاف مهمترین عوامل، آن‌ها را با عوامل موثر بر افزایش سازگاری جوامع روستایی در ایران مقایسه کنند.

سپاسگزاری

این پژوهش برگرفته از بخشی از نتایج رساله دکتری با عنوان "تحلیل آسیب‌پذیری کشاورزان در برابر بحران سیلاب و ارتباط آن با اقدامات تاب‌آورانه برای مدیریت این بحران در استان البرز" مصوب در دانشگاه زنجان و طرح پژوهشی با همین عنوان، مصوب در شرکت سهامی آب منطقه‌ای البرز می‌باشد که از شرکت سهامی آب منطقه‌ای البرز، دانشگاه زنجان و همچنین هیأت علمی و کارکنان پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که ما را در روند نگارش این پژوهش یاری نمودند، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

References

Abhas, K., Bloch, B., & Lamond., C. (2012). *Cities & Flooding, A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. Washington D.C: The World Bank.

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

Adopted, I.P.C.C. (2014). C*limate change 2014 synthesis report*. IPCC: Geneva, Szwitzerland, 1059-1072.

AliMohammadi, H. (1983). *Investigating the relationship between gender role and marital adjustment among married students in Tehran*. Master's thesis. Al-Zahra University, Faculty of Educational Sciences and Psychology.

Angeler, D.G., Fried-Petersen, H.B., Allen, C.R., Garmestani, A., Twidwell, D., Chuang, W.C., Donovan, V., Eason, T., Roberts, C., Sundstrom, Sh., & Wonkka, C. L. (2019). Adaptive capacity in ecosystems. In Advances in ecological research. *Academic Press*, 60, 1-24. https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2019.02.001

Barghi, H., Hashemi, S., & Jafari, N. (2017). The Measurement of Environmental Resilience of Villages against Earthquake Hazard (Case Study: Mojezat Dehestan in Zanjan County). *Journal of Research and Rural Planning*, 6(1), 81-97 https://doi.org/10.22067/jrrp.v6i1.53038 (In Persian)

Boland, A., Dickson, R., & Cherry, G. (2017). *Doing a systematic review: A student's guide*. Sage Publications.

Brand, F.S., & Jax, L., (2007). Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecology and society*, 12 (1), 23.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., & Shongwe, M. (2013). *Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Coppola, D. (2007). *Introduction to international disaster management*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Cutter, S.L., Mitchell, J.T., & Scott, M.S., (2000). Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina. Ann*als of the association of American*

Geographers, 90(4), 713-737. https://doi.org/10.1111/0004-5608.00219

Davis, I., & OstvarIzadkhah, Y. (2006). Building resilient urban communities. *Open House International*, 31(1), 11-21. https://doi.org/10.1108/OHI-01-2006-B0002

Donohue, I., Hillebrand, H., Montoya, J.M., Petchey, O.L., Pimm, S.L., Fowler, M.S., Healy, K., Jackson, A.L., Lurgi, M., McClean, D., O'Connor, N.E., O'Gorman, E.J., & Yang, Q. (2016). Navigating the complexity of ecological stability. *Ecology Letters*, 19, 1172-1185. https://doi.org/10.1111/ele.12648

EM-DAT. (2024). *The International Disaster Database*.

Fagan, B. (2009). *Floods, famines, and emperors: El Niño and the fate of civilizations*. Basic Books.

FarzadBehtash, M.R., Keynejhad, M.A., PirBabaei, M.T and Asgary, A. (2013). Evaluation and analysis of dimensions and components of Tabriz metropolis resiliency. *Fine Arts of Architecture and Urban Planning*, 18(3), 33-42 (I Persian)

Folke, C., Colding, J., & Berkes, F. (2003). *Building resilience and adaptive capacity in social-ecological systems. Navigating Social-Ecological Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 352-387.

Gallopín, 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

Garmezy, N. (1985). Competence and adaptation in adult schizophrenic patients and children at risk. Research in the Schizophrenic Disorders: The Stanley R. *Dean Award Lectures*, (2), 69-112. https://doi.org/10.1007/978-94-011-6338-5_3

Gillespie, B.M., Chaboyer, W., & Wallis, M. (2007). Development of a theoretically derived model of resilience through concept analysis. *Contemporary Nurse*, 25(1-2), pp.124-135. https://doi.org/10.5172/conu.2007.25.1-2.124

Gunderson, L.H., & Holling, C.S. (2002). *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island press.

Heydarifar, M., & Rezaei, N. (2017). The Needing to Attend Environmental Hazards from the View of National Security (Emphasizing the Environmental Security). *Environmental Law*, 2(1), 38-49 (In Persian).

Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23. https://doi.org/10.1017/9781009177856.038

Horner-Dixon, T.F. (1991). On the threshold: environmental changes as causes of acute conflict. *International Security*, 16, 76-116. https://doi.org/10.2307/2539061

Kitano, M.K., & Lewis, R.B. (2005). Resilience and Coping: Implications for Gifted Children and Youth At Risk. *Roeper Review: A Journal on Gifted Education*, 27(4), 200–205. https://doi.org/10.1080/02783190509554319.

Liao, C., Luo, Y., Tang, X., Ma, Z., & Li, B. (2019). Effects of human population density on the pattern of terrestrial nature reserves in China. *Global Ecology and Conservation*, 20, 1-12 https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00762

Masten, A. S., Obradović, J., & Burt, K. B. (2006). *Resilience in Emerging Adulthood: Developmental Perspectives on Continuity and Transformation*. In J. J. Arnett & J. L. Tanner (Eds.), Emerging adults in America: Coming of age in the 21st century (pp. 173–190). American Psychological Association. https://doi.org/10.1037/11381-007

McEntire, D., Crocker, C.G., & Peters, E. (2010). Addressing vulnerability through an integrated approach. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1(1), 50-64. https://doi.org/10.1108/17595901011026472

Mesbah, A., Karamidehkordi, E., Tohidloo, A., Salehpour Jam, A., & Saadi, T. (2025). Application of the Flood Crisis Management Framework in the Alborz Province with Emphasis on Identification, Classification, and Prioritization of Solutions. *Watershed Management Research*, 38(2), 139-160. https://doi:10.22092/wmrj.2025.367812.1605 (In Persian)

Mesbah, A., Karamidehkordi, E., Tohidloo, S., Salehpour Jam, A., & Saadi, T. (2024). A review of resilience in the studies of natural hazards in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 16(3), 354-377. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.362235.2019 (In Persian)

Mesbah, A., OmidiNajafabadi, M., & Kianirad, A. (2018). Feasibility Study of Application of Rural MicroInsurance in Rural Area of Iran. *Village and Development*, 21(1), 91-113. https://doi.org/10.30490/rvt.2018.66197

Mesbah, A., OmidiNajafabadi, M., & Kianirad, A. (2022). SWOT Analysis of Agricultural MicroInsurance Development in Rural Areas of Iran. *Journal of Agricultural Economics Researches*, 14(2). https://doi.org/10.30495/jae.2022.15437.1773

MododiArkhodi, M., Boroumand, R., & Akbari, E. (2020). Explaining the resilience of rural areas against natural hazards with emphasis on flood. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 151-172. https://doi.org/10.22111/jneh.2019.30067.1525 (In Persian)

Moghimi, E., SalehipourMilani, A., Shakeri, M., & Moghimi, M. (2014). Application of ComMIT Software in Tsunami Hazard Zoning in the coast of Jask. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazarts*, 1(2), 1-13.

Mohammadi Ostadkelayeh, A., & Khorasani, M.A. (2015). Study of relation between resettlement and Social capital in rural area (Case study resettlement in flooded villages in Golestan provience). *Spatial Planning*, 5(3), 85-104. (In Persian)

Naderi, L., Karamidehkordi, E., Badsar, M., & Moghadas, M. (2022). Analyzing the impact of human and environmental factors on stakeholders' conflict in the Zayandehrood Basin. *J. of Rural Research*, *13*(1), 68-85. https://doi.org/10.22059/jrur.2022.332129.1689 (In Persian)

Noor, H., Salehpour Jam, A., & Rajai, S.H., (2022). Comparison of effective factors on preventing participation of rural societies in watershed management plans based on local people and experts viewpoints. *Watershed Engineering and Management*, 12(1), 400-411.https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.127630.1713 (In Persian)

Normandin, J.M., Therrien, M.C., & Tanguay, G.A. (2011). *City strength in times of turbulence: strategic resilience indicators*. Urban Affairs Association41st Conference, New Orleans, USA (In Persian)

Olsson, C. A., Bond, L., Burns, J. M., VellaBrodrick, D. A., & Sawyer, S. M. (2003). Adolescent resilience: A concept analysis. *Journal of adolescence*, 26(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/S0140-1971(02)00118-5

Ownegh, M. (2002). *Landslide hazard and risk assessment in the southern Sunbirds of Newcastle*. Sabbatical research. University of Newcastle, Australia, 2, p.85.

Parry, M.L. (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability*. Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge University Press.

PourTaheri, M., RoknedinEftekhary, A.R., & Hoseini, N.A. (2011). Role of cultural heritage in quality of life for rural residents Case: The central part of city Lamerd. *Geographic Space*, 11(33), 83 – 109 (In Persian)

Punamäki, R.L., Repokari, L., Vilska, S., Poikkeus, P., Tiitinen, A., Sinkkonen, J., & Tulppala, M. (2006). Maternal mental health and medical predictors of infant developmental and health problems from pregnancy to one year: does former infertility matter? *Infant Behavior and Development*, 29(2), 230-242. https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2005.12.001

Rabet, A., Rostamizad, G., & Salehpour Jam, A., (2023). Investigating the obstacles to the participation of local communities in the process of implementing watershed and natural resources projects, Arpachai Watershed, Zanjan Province. *Watershed Engineering and Management*, 15(4), 622-638. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.359776.1988 (In Persian)

Rezaei, A., & Farai, K.J. (1989). Study of the compatibility of oat isolines (Avena sativa L.). *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 3 & 4. (In Persian)

Rezaei, M., Bastaminia, A., & Fakhraipour, O. (2014). *Examining dimensions, approaches and concepts of resilience in urban societies with an emphasis on natural disasters*. International Research Conference in

Science and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia.

Richardson, G.E. (2002). The metatheory of resilience and resiliency. *Journal of clinical psychology*, 58(3), 307-321. https://doi.org/10.1002/jclp.10020

Ryan, J.P., Herz, D., Hernandez, P.M., & Marshall, J.M. (2007). Maltreatment and delinquency: Investigating child welfare bias in juvenile justice processing. *Children and Youth Services Review*, 29(8), 1035-1050. https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2007.04.002

Salehpour Jam, A., Rasooli, F., Sarreshtehdari, A., Mosaffaie, J., & Kianian, M.K. (2020). Prioritization of preventing social indices affecting on peoples' participation in natural resources plans using AHP method and nonparametric tests. *Watershed Engineering and Management*, 12(1), 330-339. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.121767.1480 (In Persian)

Shayan, M., Paydar, A and Bazvand, S. (2017). Impact analysis of upgrading the indicators of resilience over sustainability of rural settlements against floods (item: rural areas of Zarrindasht county). *Environmental Management Hazard*s, 4(2), 103-121. https://doi.org/10.22059/jhsci.2017.241742.277 (In Persian)

Silva, M. (2015). A systematic review of Foresight in Project Management literature. *Procedia Computer Science*, 64, 792-799. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.630

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

Smith, K. (2013). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. Routledge.

Uzi, R. (2011). *Geography of Risks*. Translated by Mohammad Zahiri. Tabriz: Tabriz University. (In Persian)

Vallury, S., Smith, A. P., Chaffin, B. C., Nesbitt, H. K., Lohani, S., Gulab, S., ... & Allen, C. R. (2022). Adaptive capacity beyond the household: a systematic review of empirical social-ecological research. *Environmental research letters*, 17(6), 063001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac68fb

Werner, E.E., & Smith, R.S. (1992). *Overcoming the odds: High risk children from birth to adulthood*. Cornell University Press.

Werner, E.E. (1995). Resilience in development. *Current directions in psychological science*, 4(3), 81-84. https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10772327

Willig, C., & Rogers, W. (2017). *The SAGE Handbook of qualitative research in psychology*. SAGE Publications Ltd, https://doi.org/10.4135/9781526405555.

Willig, C., Stainton-Rogers, W., Smith, J., & Eatough, V. (2010). Interpretative phenomenological analysis. *The SAGE Handbook of Qualitative Research in Psychology*, 165-179.

Windle, G., Woods, R.T., & Markland, D.A. (2010). Living with ill-health in older age: The role of a resilient personality. *Journal of Happiness Studies*, 11, 763-777. https://doi.org/10.1007/s10902-009-9172-3

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 132-148 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2026.2076790.1252 **Online ISSN: 2783-4581**

Climatology of the Major Drainage Basins of Iran

Sayyed Mohammad Hosseini*

Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Sayyed Jamaleddin Asadabadi University, Asadabad, Iran

* **Corresponding Author**: h.climate@sjau.ac.ir

(Received: 09 November 2025 Revised: 24 December 2025 Accepted: 24 May 2026)

Extended Abstract

Introduction: Today, climate change has widespread impacts on human life and its natural environment, to the point that some researchers consider this phenomenon one of the most important global threats of the 21st century. By affecting factors such as temperature, evapotranspiration, and precipitation, climate change has accelerated the severity of droughts and imposed sudden stresses on most human, animal, and plant ecosystems. This ultimately leads to a shortage of water resources; the drying up of lakes, rivers and wetlands, a decrease in groundwater levels, land subsidence, a decline in water quality, soil erosion, desertification; and an increase in dust storms in the country. Therefore, the main goal of this research is to study climate behavior in the drainage basins of Iran to reveal the trends of climate elements and analyze environmental crises caused by climate change.

Materials and Methods: In the present study, daily precipitation, temperature, and humidity data from synoptic and climatological stations with at least 50 years of statistical data were used to analyze the climate of 6 major Iranian drainage basin (level 1 basins) in the last half century. The data, covering the period from 1975 to the end of 2024, were obtained from the National Center for Climate and Drought Crisis Management. Following statistical analysis, temporal and spatial analyses were conducted. Graphic diagrams of temperature, precipitation, and evapotranspiration were generated, and drought maps were extracted based on the Standardized Precipitation Index (SPI) separately for all major drainage basins of the country.

Results and Discussion: The results showed that the dominant climate pattern in Iran over the last 50 years has been an increasing trend in temperature and evapotranspiration, along with a decreasing trend in precipitation in many regions. Over the last half century, the annual temperature trend in the country has increased by about 0.41 °C per decade, which is higher than the global average. Furthermore, the trend of potential evapotranspiration in Iran indicates that this parameter has been increasing at a rate of 13.5 mm per year. Precipitation has also changed significantly and has become anomalous. This change is clearly evident both on a decadal scale and in annual time series, with the rainfall trend decreasing by 1.1 mm per year. The climatic analysis of Iran's drainage basins over the last half century revealed that the Caspian Sea watershed has been experiencing severe drought, with 37% of the basin area affected. In the Persian Gulf and Oman Sea basins, severe droughts have affected more than 50% of the basin area. In the Lake Urmia basin, a mountainous hub in the northwest, the share of severe drought is 47%. In the Central Plateau watershed, the largest in Iran, the share of wet years is near zero, while droughts cover close to 80% of the basin area. In the border watershed of eastern Iran, droughts cover 60% of the basin area. In the Qaraqom (Sarkhs) watershed, very severe droughts account for 44% of the area. It appears that drought in Iran is not limited to the inland and low-rainfall regions; the possibility of this phenomenon occurring in any climate (even the high-rainfall Caspian regions) exists. In the last half century, drought in Iran has both intensified and spread, penetrating even the northern, northwestern, and western halves of the country. Meanwhile, wet years are increasingly concentrated, following a phenomenon of climatic nesting. This situation confirms the role of increasing global warming and climate change.

Conclusion: Iran's specific geographical location—being situated in a hot and dry region of the planet, adjacent to the Lut Desert and central deserts, and distant from moisture-rich sources—has caused the amount of precipitation in Iran to be much lower than the global average. Today, increasing global warming and climate change have exacerbated the arid and drought conditions in the country. Therefore, increasing temperatures on one hand and decreasing precipitation on the other can lead to a reduction in surface water storage, a decrease in soil moisture retention, an increase in evaporation, and ultimately a water shortage and drought crisis. In addition, the distance from moisture sources, the proximity to internal deserts, and the location in the rain shadow of the Zagros and Alborz mountain ranges have caused Iran's drainage basins to suffer from severe drought and water crises.

Keywords: Iran, Climate Change, Wetness, Drought, Drainage Basin.

Citation: Hosseini, S. M. (2026). Climatology of the Major Drainage Basins of Iran. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 132-148. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2076790.1252

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۴۸-۱۳۲) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2076790.1252

اقلیم‌شناسی حوزه‌های آبریز اصلی ایران

سید محمد حسینی*

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران

* **نویسنده مسئول:** h.climate@sjau.ac.ir

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۸/۱۸ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۹/۰۳ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۰۳)

چکیده مبسوط

مقدمه: امروزه تغییر اقلیم، تأثیرات گسترده‌ای بر زندگی بشر و محیط‌زیست طبیعی او دارد تا جایی که برخی محققان این پدیده را یکی از مهمترین تهدیدات جهانی قرن بیست و یک قلمداد می‌کنند. تغییرات اقلیمی با تأثیرگذاری بر عواملی مانند دما، تبخیروتعرق و بارش، شدت خشکسالی‌ها را تسریع کرده و تنش‌های ناگهانی بر اغلب زیست‌بوم‌های انسانی، جانوری و گیاهی وارد کرده است که در نهایت منجر به کمبود منابع آبی، خشک‌شدن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب، فرسایش خاک، بیابان‌زایی و افزایش توفان‌های گردوغبار در کشور می‌شود. لذا هدف اصلی این پژوهش، رفتارشناسی اقلیم در حوزه‌های آبریز ایران جهت آشکارسازی روند عناصر اقلیمی و تحلیل بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی است.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر جهت تحلیل اقلیمی ۶ حوزه آبریز اصلی ایران در نیم قرن اخیر، از داده‌های روزانه بارش، دما و رطوبت در ۲۳۰ ایستگاه‌های همدید و باران‌سنجی با دست کم ۵۰ سال آماری استفاده شده است. این داده‌ها در مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی کشور از سال ۱۳۵۴ تا ۱۴۰۳ خورشیدی در دسترس است. پس از آنالیز آماری داده‌ها، تحلیل زمانی و مکانی و نمودارهای گرافیکی دما، بارش، تبخیروتعرق با آزمون روند من-کندال و نقشه‌های خشکسالی بر اساس شاخص بارش استاندارد به تفکیک برای کل حوزه‌های آبریز اصلی کشور استخراج شد.

نتایج و بحث: نتایج این پژوهش نشان داد که طبق الگوی غالب اقلیمی در ایران طی ۵۰ سال اخیر؛ روند افزایشی دما، افزایش تبخیروتعرق به‌همراه روند کاهشی بارش در بسیاری از مناطق کشور معنی‌دار بوده است. به طوری که در نیم قرن اخیر، روند دمای سالانه در کشور نسبت به میانگین جهانی، افزایش بیشتری داشته و ۰/۴۱ درجه در هر دهه صعود کرده است. همچنین روند تغییرات تبخیروتعرق بالقوه در ایران نیز حاکی از این است که این عنصر اقلیمی با نرخ ۵/۱۳ میلی‌متر در سال روندی افزایشی داشته است. بارش در ایران نیز تغییر چشمگیری داشته و ناهنجار شده است. این تغییر هم در مقیاس دهه‌ای و هم در سری‌های زمانی سالانه کاملاً مشهود است. به طوری که روند بارش در کشور به میزان ۱/۱ میلی‌متر در سال کاهشی بوده است. همچنین تحلیل اقلیمی حوزه‌های آبریز ایران در نیم قرن اخیر نشان داد که حوزه آبریز دریای مازندران دچار خشکسالی شدید شده است به طوری که ۳۷ درصد از وسعت حوضه درگیر خشکسالی شدید است. در حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان، خشکسالی‌های بسیار شدید بیش از ۵۰ درصد مساحت حوضه را از آن خود کرده است. در حوزه آبریز دریاچه ارومیه به عنوان گره‌گاه کوهستانی شمال‌غرب کشور، سهم خشکسالی شدید ۴۷ درصد است. در حوزه آبریز فلات مرکزی به عنوان بزرگترین حوزه آبریز ایران، سهم ترسالی‌ها نزدیک به صفر و سهم خشکسالی‌ها نزدیک ۸۰ درصد از مساحت حوضه می‌باشد. در حوزه آبریز مرزی شرق ایران، خشکسالی‌ها، ۶۰ درصد از وسعت حوضه را شامل می‌شوند. در حوزه آبریز قره‌قوم (سرخس) نیز، خشکسالی‌های بسیار شدید، سهم ۴۴ درصدی را به خود اختصاص داده است. به نظر می‌رسد خشکسالی در ایران فقط مربوط به مناطق داخلی و کم‌بارش کشور نیست و احتمال رخداد این پدیده در هر اقلیمی(حتی مناطق پربارش خزری) نیز وجود دارد. بنابراین در نیم قرن اخیر، خشکسالی در کشور ایران هم شدت گرفته و هم فراگیر شده است و حتی در نیمه شمالی، شمال‌غرب و غرب ایران نیز رخنه کرده است. ضمن اینکه، ترسالی‌ها در ایران نیز متمرکز شده و از پدیده لانه‌گزینی اقلیمی تبعیت می‌کند. این شرایط، نقش افزایش گرمایش جهانی و تغییرات فزاینده اقلیمی را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری: موقعیت خاص جغرافیایی ایران مانند قرارگیری در منطقه گرم و خشک کره زمین، همجواری با کویر لوت و بیابان‌های مرکزی و دوری از منابع تغذیه کننده رطوبت سبب شده است تا میزان بارش در این کشور بسیار کمتر از میانگین جهانی باشد. این در حالی است که امروزه افزایش گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، شرایط خشکی و خشکسالی را در کشور ایران تشدید کرده است. بنابراین افزایش دما از یک‌سو و کاهش بارش از سویی دیگر، می‌تواند منجر به کاهش ذخیره آب سطحی،کاهش نگهداشت رطوبت خاک، افزایش تبخیر و در نهایت بحران کم‌آبی و خشکسالی شود. ضمن اینکه دوربودن از منبع رطوبتی؛ همسایگی با کویرها و بیابان‌های داخلی ایران؛ قرارگیری در بادپناه شرقی نوار کوهستانی زاگرس و بادپناه جنوبی سلسله جبال البرز سبب شده است که حوزه‌های آبریز ایران دچار خشکسالی شدید و بحران‌های آبی قرار گیرند. به طوری که در در اغلب موارد، مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، خشکسالی‌های هواشناسی به وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی منتهی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: ایران، تغییرات اقلیمی، ترسالی، خشکسالی، حوزه آبریز.

استناد: حسینی، س.م. (۱۴۰۵). اقلیم‌شناسی حوزه‌های آبریز اصلی ایران. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۴۸-۱۳۲. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2076790.1252

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

در سال‌های اخیر به سبب رخداد تغییر اقلیم و افزایش گرمایش جهانی، کشورهای دنیا با کمبود منابع آب که یکی از مهمترین چالش‌های بشر بوده است، مواجه شده‌اند (Abdulaziz & Burn, 2006; Yu *et al.*, 2019; Halwani & Halwani, 2022; Moradi & Maleki, 2025). از آنجا که بیشتر گسترهٔ ایران نیز در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته است از این چالش مستثنی نبوده و تنش‌های وارده بر اغلب زیست‌بوم‌های انسانی، جانوری و گیاهی اثرات فراوانی گذاشته (Tabari et *al*., 2001; Asgari *et al.*, 2025) و موجب بیابان‌زایی در این کشورها شده است (Wang *et al.*, 2007). این در حالی است که میانگین بارندگی سالانه ایران، حدود ۲۵۲ میلی‌متر گزارش شده است که کمتر از یک‌سوم میانگین بارش کره زمین و متوسط سالانه تبخیروتعرق کشور، سه برابر تبخیر کره زمین ثبت شده است (Masoodian, 2011). لذا بایستی اذعان داشت که بروز بحران‌های آبی و حدی مانند سیلاب و خشکسالی شدید از مشخصه‌های اصلی این کشورها به شمار می‌آید (Drolet & Sampson, 2017; Tajbakhsh, 2025). خشکسالی‌های مکرر همراه با برداشت بیش از حد آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق شبکه بزرگی از چاه‌های عمیق و زیرساخت‌های هیدرولیک، وضعیت آب کشور را به سطح بحرانی رسانده است. از نشانه‌های این وضعیت؛ کمبود منابع آبی، خشک‌شدن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب، فرسایش خاک، بیابان‌زایی و افزایش توفان‌های گردوغبار در کشور است (Kogan, 1997; Feng, 2014; Konapala *et al.*, 2020; Panda et al, 2020; Mengistu *et al.*, 2021; Hosseini *et al.*, 2021; Salakpi, 2021;

امروزه؛ تغییرات اقلیمی با تأثیرگذاری بر عواملی مانند دما و تبخیروتعرق، شدت خشکسالی‌ها را تسریع کرده (Ongoma *et al.*, 2020; Orimoloye *et al.*, 2022) و احتمال رخداد این پدیده در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت (Beaudin, 2006). تحلیل خشکسالی در کشور ایران نشان می‌دهد که هیچ بخشی از کشور، از این پدیده در امان نبوده و نسبت به موقعیت جغرافیایی خود و وضعیت اقلیمی موجود، اثرهای گوناگون این پدیده مخرب را تجربه کرده است (Hosseini & Fateminya, 2021). عده‌ای از اندیشمندان و صاحب‌نظران بر این باورند که علل بروز خشکسالی‌ها را باید در ناهنجاری‌های گردش عمومی جو جستجو کرد (Masoodian, 2011). برخی نیز خشکسالی را کمبود بارش در دوره‌های بلندمدت که موجب کمبود رطوبت در خاک شده و سبب کاهش منابع آب می‌گردد و بدین طریق، فعالیت‌های انسانی و حیات معمول گیاهی و جانوری را بر هم می‌زند، تعبیر می‌کنند (Barry & Chorley, 1992). با این وجود، تعریف خشکسالی و چگونگی ارتباط آن با پدیده‌های هیدرولوژی بسیار مشکل و پیچیده است؛ زیرا اولاً، خشکسالی ممکن است به طور همزمان تمام اجزاء سیستم هیدرولوژی را تحت تاثیر قرار ندهد؛ ثانیاً، خشکسالی یک پدیده مطلق نبوده بلکه کمبود نسبی رطوبت می‌باشد (Alizadeh, 2015; Hosseini Seddigh & Jalali, 2025).

مطالعات پراکنده زیادی در مورد ویژگی‌های اقلیمی یک منطقه در سطح جهان و ایران انجام شده است که به اختصار به چند نمونه اشاره می‌شود؛ Silva (۲۰۰۳) تأثیر تغییرات اقلیمی را روی پارامترهای اقلیمی و پدیده خشکسالی در برزیل در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۴۸ بررسی نموده و نشان دادند که در دهه‌های گذشته، فراوانی وقوع و شدت خشکسالی‌ها در منطقه نیمه‌خشک و ساحلی برزیل افزایش پیدا کرده است. Garbrecht و همکاران (۲۰۰۴) به مطالعه تغییرات زمانی بارندگی و تبخیروتعرق در ایالات متحده از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ پرداختند و نشان دادند که در دو دهه اخیر، بارندگی به میزان قابل توجهی افزایش یافته ولی افزایش مقدار تبخیروتعرق در نتیجه این تغییرات بارندگی کمتر بوده است. Hesch و Burn (۲۰۰۷) با بررسی روند تبخیر و عوامل تأثیرگذار بر آن در کانادا

از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که میزان تبخیر و همچنین سرعت باد روند کاهشی داشته است. Toma و Croitoru (۲۰۱۱) با بررسی رخداد خشکسالی در دشت‌های مرکزی رومانی در سال ۲۰۰۰، ممانعت هوا در مسیر فرارفت توده هوای مرطوب حاره‌ای را دلیل رخداد این پدیده بیان کردند. Jhajharia و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی روند تبخیروتعرق در مناطق مرطوب شمال هند در یک دوره ۲۲ ساله نشان دادند که تبخیروتعرق در مناطق مرطوب روندی کاهشی داشته است. Jain و همکاران (۲۰۱۳) به تحلیل روند متغیرهای بارندگی و دما در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در قسمت شمال غرب کشور هند در بازه زمانی ۲۰۰۸-۱۸۷۱ پرداختند. نتایج حاکی از این است که بارندگی در هیچ مقیاس زمانی روند معنی‌دار نداشته ولی دما در هر سه مقیاس زمانی به طور معنی‌دار افزایشی بوده است. Das و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی خشکسالی کشاورزی در حوضه بانکورا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ پرداخته و معتقدند که این منطقه با خشکسالی ترکیبی مواجه است به طوری که ۶ درصد منطقه بدون خطر، ۵۳ با خطر متوسط و ۴۱ درصد با خطر بالا مواجه هستند. Elfaigh (۲۰۱۵) با بررسی خشکسالی کشاورزی کشور سودان در ۳۰ سال اخیر نشان دادند که استفاده از ارقام مقاوم به خشکی، بذرپاشی زودهنگام به منظور استفاده از بارندگی‌های غیرمنتظره، افزایش فاصله بین ردیف‌ها و استفاده از کشت‌های مخلوط، می‌تواند آسیب‌پذیری کشاورزان را کاهش دهد. Qian و Wu (۲۰۱۷) روند تغییرات بارندگی سالانه و فصلی را در استان شانگشی چین از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که بارندگی سالانه در شمال منطقه روند کاهشی داشته است درحالی که در مقیاس فصلی تنها در تعداد معدودی از ایستگاه‌ها روند معنی‌داری وجود دارد. Xu و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی تبخیروتعرق در رودخانه زرد چین بر این باورند که تبخیروتعرق پتانسیل طی ۵۰ سال اخیر کاهش یافته است که دلیل آن را کاهش سرعت باد در منطقه می‌دانند. Wang و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی در حوضه رودخانه زرد چین بر این باروند که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ کاهش خشکسالی به جز زمستان در این منطقه اتفاق افتاده است. Paul و Dhawale (۲۰۱۸) با پایش خشکسالی در لاتور هند در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که شاخص وضعیت دما با دقت بالایی میزان خشکسالی منطقه را نشان می‌دهد. Baig و همکاران (۲۰۲۰) با تحلیل خشکسالی حوزه رودخانه چیترال کابل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ نشان دادند که سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ میلادی خشکسالی هواشناسی و سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ خشکسالی کشاورزی را تجربه کرده‌اند.

در ایران نیز؛ Sedaghatkerdar و Fattahi (۲۰۰۷) طی دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۶۰ نشان دادند زمانی که شاخص بارش استاندارد (SPI)[1] دارای توالی‌های منفی باشد، بیانگر وقوع شرایط خشکسالی در ایران می‌باشد. Babaee و Alijani (۲۰۰۹) بر این باورند که در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵، قسمت‌های شمال‌غرب، شمال و شمال‌شرق کشور خشکسالی‌ها بسیار شدید است در صورتی که در مناطق مرکز، جنوب و جنوب‌شرق خشکسالی‌ها متوسط و ملایم می‌باشد. Khoushakhlagh و همکاران (۲۰۱۲) در یک دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (۲۰۰۸ تا ۱۹۸۹)، معتقدند که فراوانی دوره‌های خشکسالی در جنوب‌غرب ایران بیش از دوره‌های ترسالی است و روند دوره‌های کاهش بارش به ویژه در سال‌های اخیر رو به افزایش می‌باشد. Torkamani و Maleki (۲۰۱۵) با بررسی خشکسالی و نقش آن در استفاده بهینه از منابع آب استان خراسان

[1] - Standardized Precipitation Index (SPI)

شمالی در سال زراعی ۱۳۹۱ معتقدند که در این استان، تعداد سال‌های مرطوب کمتر از تعداد سال‌های خشک و کم‌باران بوده است. Montaseri و Mardani (۲۰۲۳) با بررسی خشکسالی در شهرستان مرودشت در دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۱۹– ۲۰۰۰) بر این باورند که وضعیت خشکی خیلی شدید، بیش‌تر در قسمت‌های جنوبی و جنوب‌غربی این منطقه مشاهده می‌شود. Hedjazizadeh و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی اثر خشکسالی استان همدان طی دوره زمانی ۳۰ ساله بر این باورند که ماه‌های فوریه، مارس و نیز آوریل در گستره این استان خشکسالی‌های شدیدتری تجربه شده است. Tajbakhsh (۲۰۲۵) معتقد است که تغییرات دما و بارش ایران طی ۵۰ سال گذشته کشور، نسبت به میانگین‌های بلندمدت به‌ترتیب روند افزایشی با نرخ ۰/۴ درجه سانتیگراد و روند کاهشی با نرخ ۰/۸ میلی‌متر در سال دارد. Asgari و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که تاثیر خشکسالی و نوسانات آن طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ از لحاظ شدت و مدت بر خشکیدگی جنگل‌های بلوط زیاد است و اگر خشکسالی با همین روند پیش برود سالانه ۱۱۱۸/۴ هکتار از جنگل‌های بلوط استان ایلام نابود می‌شود.

در پژوهش حاضر، به بررسی اقلیمی حوزه‌های آبریز اصلی ایران پرداخته شد تا ضمن شناسایی رفتار اقلیمی حوضه‌ها، راهکارهای علمی-عملیاتی سازگاری با بحرانهای ناشی از تغییر اقلیم ارائه گردد. لازم به ذکر است که تاکنون تحلیل جامعی از وضعیت اقلیمی ابرحوزه‌های ایران به صورت مقایسه‌ای انجام نشده است و اغلب پژوهش‌ها فقط به بررسی جنبه هیدرولوژیکی یک یا چند حوضه پرداخته‌اند و از این جهت، پژوهش حاضر به سبب مقایسه اقلیمی- هیدرولوژیکی همه ۶ حوزه آبریز اصلی، نوآوری خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

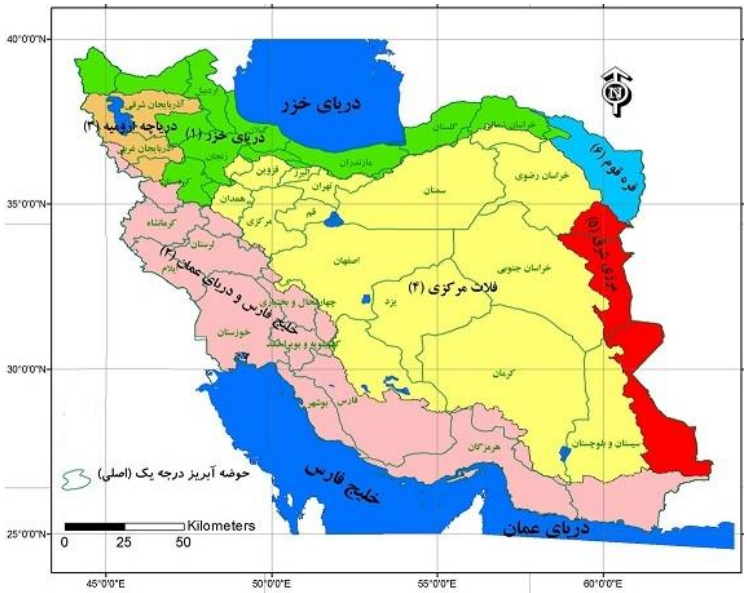
منطقه موردمطالعه

در پژوهش حاضر، تحلیل اقلیمی حوزه‌های آبریز اصلی ایران مورد کنکاش علمی قرار گرفته است. ایران شامل ۶ ابرحوضه می‌باشد که هر یک از این حوضه‌ها خود به حوضه‌های کوچک و تا چندین رده کوچکتر نیز تقسیم می‌شوند (شکل ۱). این ابرحوضه عبارتند از: ۱- حوزه آبریز دریای مازندران با ۷ زیرحوزه؛ ۲- حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با ۹ زیرحوزه؛ ۳- حوزه آبریز دریاچه ارومیه؛ ۴- حوزه آبریز فلات مرکزی با ۹ زیرحوزه؛ ۵- حوزه آبریز مرزی شرق کشور با ۳ زیرحوزه؛ ۶- حوزه آبریز قره‌قوم. بر اساس تقسیمات آبخیزداری، حوزه‌های آبریز حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از مساحت کشور را در بر می‌گیرند. حدود ۳۹ میلیون هکتار باقی‌مانده از سطح کشور را مناطق بیابانی، کویری، باتلاق‌ها، دریاچه‌ها، شهرها و روستاها تشکیل داده است. وسیع‌ترین حوزه آبریز ایران، حوزه آبریز فلات مرکزی با ۸۲۴۶۱۱ کیلومترمربع (بیش از ۵۰ درصد مساحت ایران) و کوچکترین حوضه، حوزه آبریز قره‌قوم با ۴۴۲۹۵ کیلومترمربع (کمتر از ۳ درصد مساحت ایران) می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- آماره‌های حوزه‌های آبریز اصلی ایران

Table 1- Statistics of major drainage basins in Iran

کد حوضه	نام حوزه آبریز	مساحت حوضه (کیلومترمربع)	مساحت حوضه (درصد)
1	دریای مازندران	175060	79.10
2	خلیج فارس و دریای عمان	424029.6	13.26
3	دریاچه ارومیه	51761.9	19.3
4	فلات مرکزی	824611.4	81.50
5	مرزی شرق	103183.2	36.6
6	قره‌قوم	44295.5	73.2

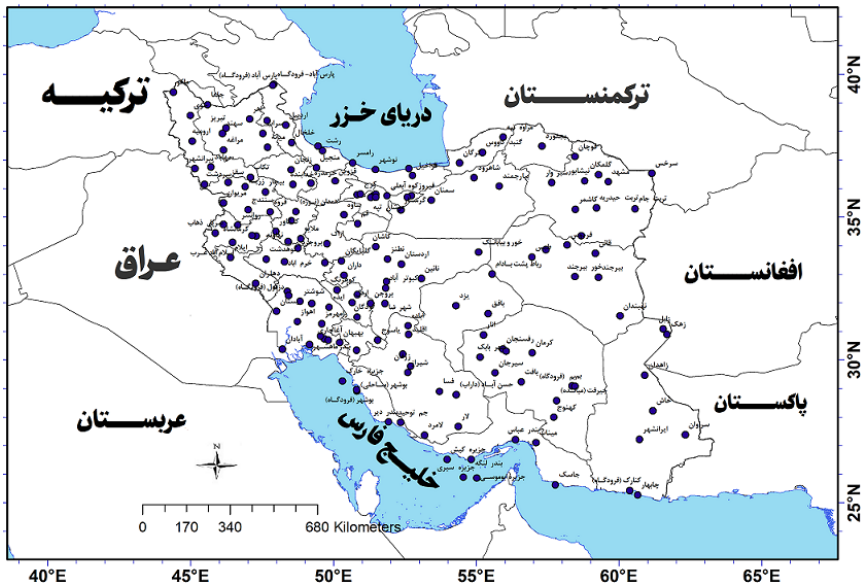


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبریز اصلی ایران

Figure 1- Geographical location of major drainage basins in Iran

روش تحقیق

در پژوهش حاضر از داده‌های روزانه دمای میانگین (جهت ترسیم نمودار روند دمای کشور)، از داده‌های روزانه تبخیروتعرق (جهت ترسیم نمودار روند تعریق و تعرق) و از داده‌های روزانه بارش (جهت ترسیم نمودار روند بارش کشور و همچنین بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش استاندارد) استفاده شده است. این داده‌ها برای ۲۳۰ ایستگاه همدید سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو (شکل ۲) با حداقل ۵۰ سال آماری در حوزه‌های آبریز اصلی کشور استخراج شد. این داده‌ها در مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی به نشانی https://ndc.irimo.ir از سال ۱۳۵۴ تا ۱۴۰۳ خورشیدی در دسترس است.



شکل ۲- پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران

Figure 2- Distribution of study stations in Iran

همچنین در پژوهش حاضر برای بررسی روند دما، بارش و تبخیروتعرق ایران در ۵۰ سال اخیر، از آزمون ناپارامتریک من- کندال[۲] در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شده است. این آزمون در اغلب پژوهش‌ها از جمله تحلیل‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی استفاده می‌شود (Yue *et al.*, 2002). من-کندال بر اساس آماره تاوکندال(τ) استوار است و برای بررسی تصادفی بودن سری زمانی کاربرد دارد و بر مبنای عدم وجود روند در داده‌ها (فرض صفر) یا وجود روند در داده‌ها (فرض یک)، تصمیم‌گیری می‌نماید. محاسبه این آزمون از رابطه ۱ به دست می‌آید. بر اساس آماره (S) اختلاف بین تک‌تک مشاهدات محاسبه می‌گردد. سپس خروجی این تابع، علامت هر سری را روشن می‌کند (Hirsch & Slack, 1984):

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{J=i+1}^{N} sgn(x_j - x_i) \qquad (۱)$$

که در آن؛ xi و xj مقادیر سالیانه در سال‌های i و j هستند و $j>I$ و N تعداد نقاط اطلاعات هستند. مقدار $sgn(x_j - x_i)$ طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & if\ (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & if\ (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & if\ (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

در این رابطه؛ xj ارزش jاُم سری و xk ارزش kاُم سری و sgn تابع علامت می‌باشد.

معمولاً این آزمون در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد انجام می‌شود. مقدار α برای ۹۵ درصد برابر ۰/۰۵ و برای ۹۹ درصد، ۰/۰۱ است. به دیگر سخن، اگر حد بالا و پایین Q که در دو سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ به‌دست می‌آید هر دو مثبت باشند، فرض وجود روند افزایشی در دما رد نمی‌شود. اگر حد بالا و پایین Q هر دو منفی باشند، فرض وجود روند کاهشی در دما ثابت می‌شود و اگر حد بالا و پایین نایکسان باشند، فرض وجود روند تأیید نمی‌گردد.

همچنین در این پژوهش، نقشه و نمودارهای گرافیکی دما، بارش، تبخیروتعرق و نقشه‌های خشکسالی بر اساس شاخص بارش استاندارد به تفکیک برای کل حوزه‌های آبریز اصلی کشور استخراج شده است. این شاخص توسط Mckee و همکاران (۱۹۹۳) برای پایش خشکسالی در منطقه کلرادو ارائه شد و به دلیل سادگی در محاسبات و استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب و هوایی به عنوان مناسب‌ترین شاخص شناخته می‌شود. این شاخص برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۶ و ۷۲ ماهه) و بر مبنای داده‌های بارش که همبستگی بالایی نسبت به هم دارند استوار است. این شاخص از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$SPI = \frac{xi - \bar{x}}{SD} \qquad (۳)$$

که در این رابطه؛ SPI = شاخص بارش استاندارد؛ $\bar{x}$ = میانگین بارش در طول دوره آماری؛ xi = بارش در هر ماه یا سال؛ SD = انحراف استاندارد می‌باشد.

نتایج و بحث

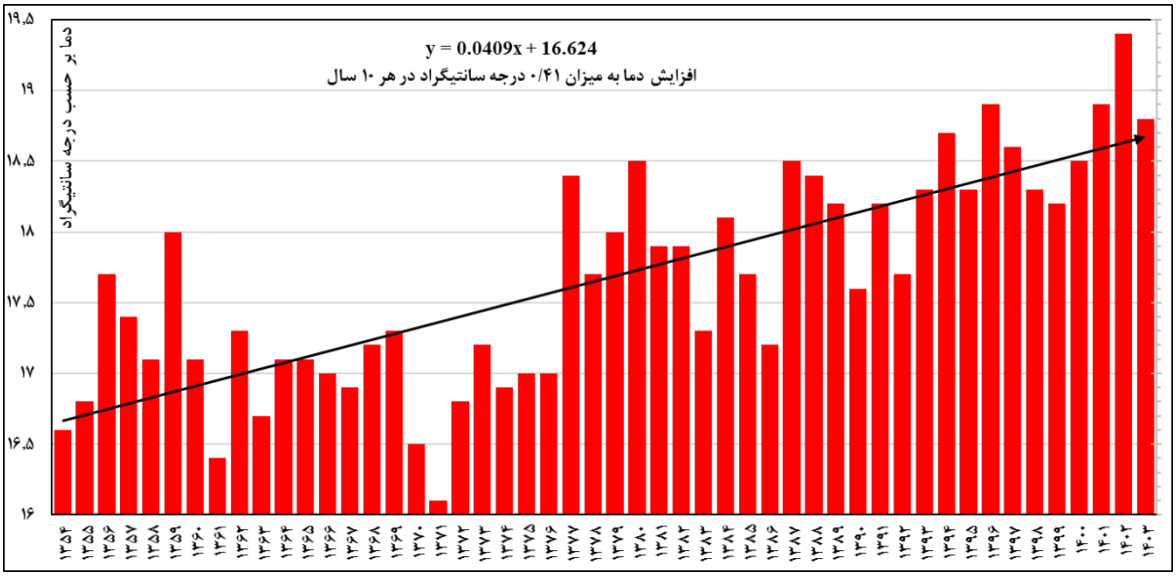
- وضعیت اقلیمی ایران در نیم قرن اخیر

شواهد حاکی از این است که در ۵۰ سال اخیر، روند دمای سالانه در کشور با استفاده از آزمون من-کندال، و در سطح اطمینان ۹۵ درصد، افزایش معنی‌داری داشته است و ۰/۴۱ درجه در هر دهه صعود کرده است (شکل ۳). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های زیر انطباق دارد؛ Ghahraman و Shirgholami (۲۰۰۵) با بررسی دمای ایران در یک دوره ۳۰ ساله بر این باورند که در ۶۸ درصد از گستره ایران، روند دما افزایشی است. همچنین Kamali و همکاران (۲۰۲۵) در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان دادند که اغلب شاخص‌های اقلیمی، افزایش معنی‌داری دارند (به معنای گرمایش

2 - Mann-Kendall

شدیدتر)، به‌ویژه در شاخص‌های مربوط به دماهای بالا. Jamali و همکاران (۲۰۲۴) نیز در یک دوره ۷۰ ساله و در سطح اطمینان ۹۵ درصدی بر این باورند که روند دماهای حدی بیشینه و کمینه در کشور، افزایش معنی‌داری داشته است.

افزایش دما در نیم قرن اخیر سبب شده است که از یک‌سو، تبخیروتعرق افزایش یابد و از سویی دیگر، میزان خشکسالی در ایران گسترش چشمگیری داشته باشد. نوسانات جزئی در میانگین دما می‌تواند بر بخش‌های مختلفی همچون کشاورزی، منابع آب، تنش در کشت محصولات زراعی، افزایش بروز مخاطرات طبیعی و حتی سلامت عمومی تأثیر بگذارد و لزوم برنامه‌ریزی برای مقابله با تغییرات اقلیمی را برجسته می‌کند (Fanaei *et al.*, 2021). به نظر می‌رسد اقلیم خشک و نیمه‌خشک جنب‌حارّه‌ای که بیشتر مناطق ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باعث می‌شود که زمان بیشتری برای اشباع جوّ از بخار آب و شروع بارش صرف شود. بنابراین، بخار آب بیشتری از طریق گردش کلّی جوّ و قبل از شکل‌گیری بارش به عرض‌های جغرافیایی بالاتر منتقل می‌شود و لزوماً افزایش دما در سال‌های اخیر، سبب افزایش بارش در ایران نشده است.

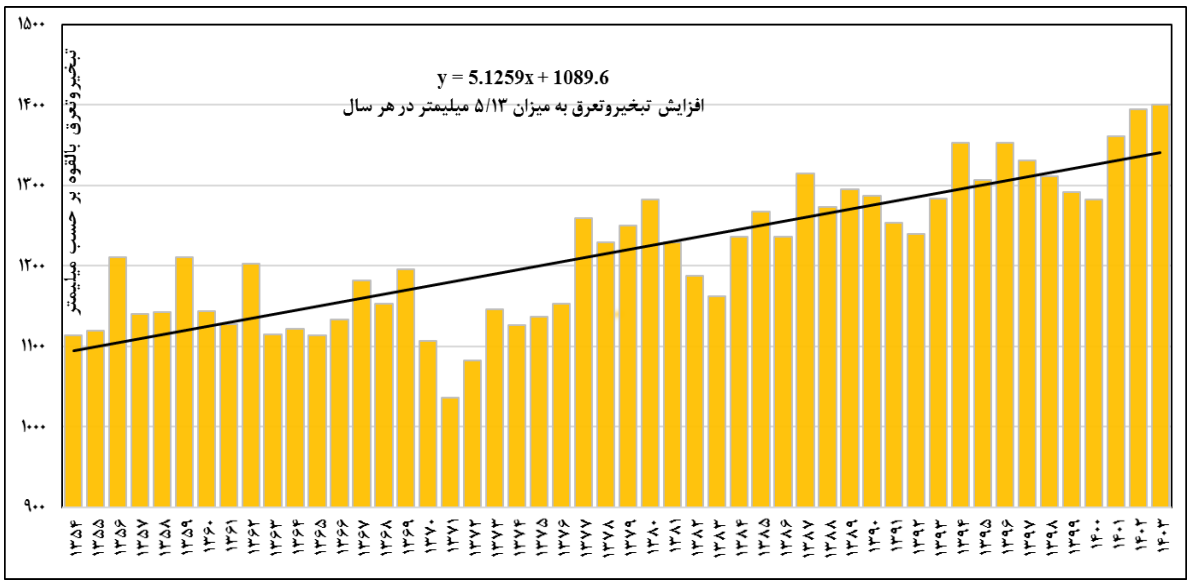


شکل ۳- روند تغییرات دما در نیم قرن اخیر ایران

Figure 3- Temperature change trend in Iran over the last half century

تبخیروتعرق، یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان هیدرولوژیکی یک حوزه آبریز محسوب می‌شود. به طوری که بخش عمده‌ای از منابع آبی کشورها از طریق تبخیروتعرق واقعی از سیستم منابع آبی حوضه‌ها خارج می‌شود. لذا روند تغییرات تبخیروتعرق بالقوه در نیم قرن اخیر در ایران نیز حاکی از این است که این عنصر اقلیمی با نرخ ۵/۱۳ میلی‌متر در سال و با اطمینان ۹۵ درصد، روندی افزایشی داشته است (شکل ۴). این رفتار اقلیمی در تبخیروتعرق ایران توسط Dinpashoh و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأیید شده است و بر این باورند که روند افزایشی در این عنصر اقلیمی ایران به سبب افزایش دما در دهه‌های اخیر وجود داشته است. این شرایط سبب می‌شود که نیاز آبی گیاه جهت رشد و باردهی افزایش یابد. در این حالت چنانچه از ریزش‌های جوی نیز کاسته شود، بر شدت خشکسالی‌های ایران افزوده خواهد شد و به‌تبع آن، اثرات مخرب محیط‌زیستی، کشاورزی، اقتصادی در پی خواهد داشت. بنابراین مشارکت عوامل محلی مانند ارتفاعات و عرض جغرافیایی و عوامل فرامحلی مانند عناصر گردش عمومی جو، بر تغییر روند تبخیروتعرق نقش زیادی دارند. بطوری که در عرض‌های جنوبی که از گرمایش بیشتر سطح زمین برخوردارند، مقدار

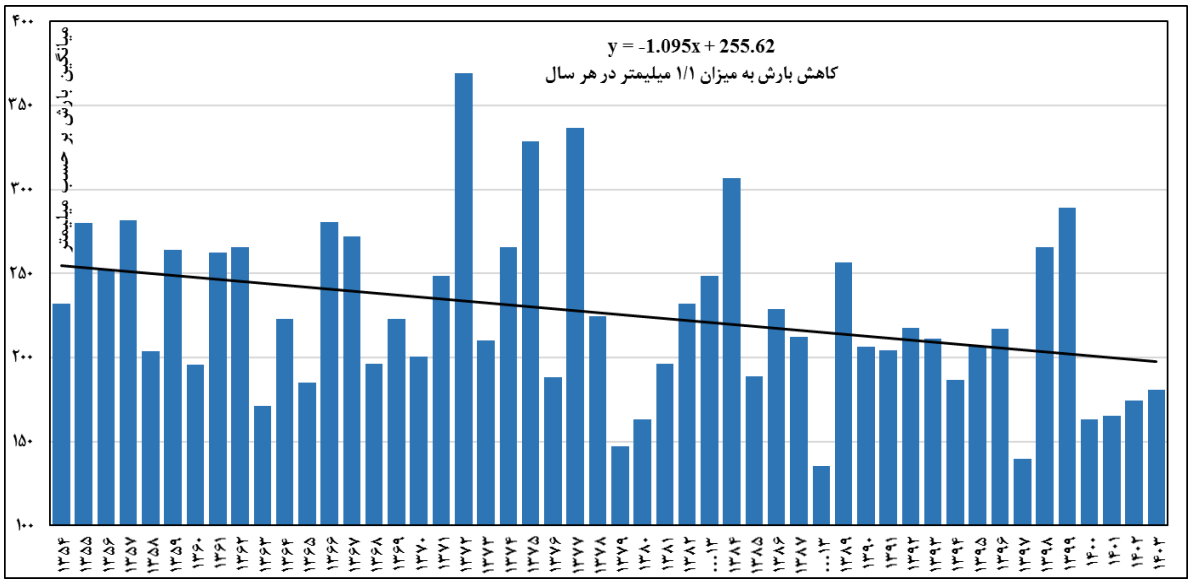
تبخیروتعرق بیشتر و در عرض‌های شمالی به دلیل دمای پایین‌تر، کمتر است. این یافته با پژوهش Delghandi و همکاران (۲۰۱۷) که معتقد بودند در بخش وسیعی از مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب‌شرقی ایران، روند تبخیروتعرق افزایشی و از نظر آماری معنی‌دار است، در حالی‌که در برخی نواحی شمالی کشور روند ضعیف‌تر یا غیرمعنی‌دار مشاهده شده است، انطباق دارد.



شکل ۴- روند تغییرات تبخیروتعرق بالقوه در نیم قرن اخیر ایران

Figure 4- Potential evapotranspiration changes trends in Iran over the last half century

در نیم قرن اخیر، بارش در ایران نیز تغییر شگرفی داشته و ناهنجار شده است. این تغییر هم در مقیاس دهه‌ای و هم در سری‌های زمانی سالانه مشهود است؛ به طوری که، رفتار بارش ایران در نیم قرن اخیر نشان می‌دهد که روند بارش در کشور به میزان ۱/۱۰ میلی‌متر در سال کاهشی بوده است (شکل ۵). این نتایج با یافته‌های Tabari & Hosseinzadehtalaei (۲۰۱۱) انطباق دارد. آن‌ها نشان دادند که در ۶۰ درصد از وسعت ایران، روند نزولی بارش با سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد. مقادیر این روند کاهشی از ۱/۹- تا ۴/۲- متغیر است. این شواهد حاکی از این است که موقعیت خاص جغرافیایی ایران مانند قرارگیری در منطقه گرم و خشک کره زمین، همجواری با کویر لوت و مرکزی و دوری از منابع تغذیه کننده رطوبت سبب شده است میزان بارش در کشور ایران بسیار کمتر از میانگین جهانی باشد. این در حالی است که امروزه افزایش گرمایش جهانی و تغییر اقلیم شرایط خشکی و خشکسالی را در کشور تشدید کرده است. بنابراین افزایش دما از یک‌سو و کاهش بارش از سویی دیگر، می‌تواند منجر به کاهش ذخیره آب سطحی، کاهش نگهداشت به شکل رطوبت خاک، افزایش تبخیر از بارش و در نهایت کاهش قابل توجه حجم آب تجدیدپذیرشده باشد (Dadashi Roudbari & Keykhosravi Kiani, 2016).



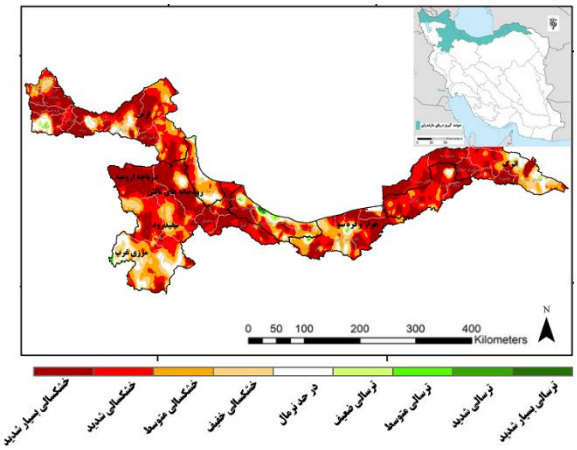
شکل ۵- روند تغییرات بارش در نیم قرن اخیر ایران

Figure 5- Precipitation change trends in Iran over the last half century

- وضعیت اقلیمی حوزه‌های آبریز اصلی ایران در نیم قرن اخیر

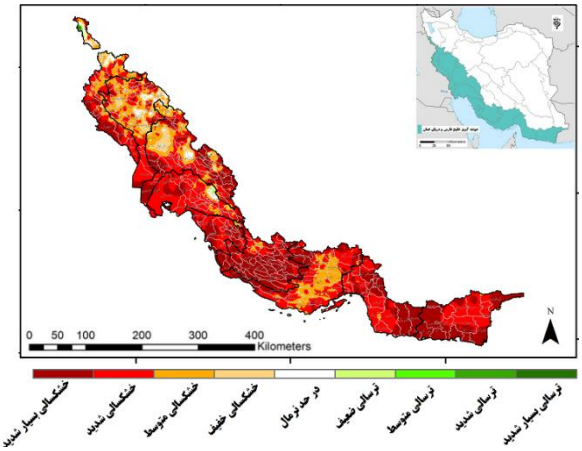
اقلیم‌شناسی حوزه آبریز دریای مازندران حاکی از این است که در این حوضه که بخش‌های پربارش شمال و شمال‌غرب کشور را در برمی‌گیرد و فقط کرانه‌های جنوبی دریای خزر در همسایگی بندرانزلی (به سبب مجاورت با پهنه‌های آبی و رودخانه‌های دائمی) و بخش‌های پراکنده‌ای در دریاچه ارومیه و دامنه‌های البرز (به سبب مجاورت با ارتفاعات کوهستانی) دارای ترسالی هستند (شکل ۶). این ترسالی فقط وسعت ۲ درصدی حوضه را به خود اختصاص داده است ولی بخش بزرگی از حوضه با ۳۷ درصد از مساحت در قلمرو خشکسالی‌های شدید است (جدول ۳). به نظر می‌رسد خشکسالی در ایران فقط مربوط به مناطق داخلی و کم‌بارش کشور نیست و احتمال رخداد این پدیده در هر اقلیمی (حتی مناطق پربارش خزری) نیز وجود دارد. بنابراین ترسالی پایدار در این حوضه پربارش نیز تضمین شده نیست (Raziei *et al.*, 2008). این شرایط، نقش افزایش گرمایش جهانی و تغییرات فزاینده اقلیمی را در تمام مناطق کشور تایید می‌کند. در حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان که غالباً نیمه غربی و جنوبی ایران را در مجاورت سلسله جبال زاگرس و گستره آبی دریا را شامل می‌شود، خشکسالی‌های بسیار شدید بیش از ۵۰ درصد مساحت حوضه را از آن خود کرده است و سهم ترسالی‌های حوضه بسیار اندک است. فقط بخش‌های غربی زاگرس در دامنه‌های چین‌خورده و مرتفع، شرایط ترسالی را به صورت هسته‌های پراکنده ثبت کرده است (شکل ۷،جدول ۴). افزایش دما و تبخیر در نیمه جنوبی کشور و نبود شرایط چگالش و صعود بخار آب در این بخش، سبب کاهش بارش و افزایش خشکسالی شده است. در حوزه آبریز دریاچه ارومیه به عنوان گره‌گاه کوهستانی شمال‌غرب کشور شرایط اقلیمی چندان مساعد نیست و فقط بخش‌های پراکنده‌ای از جنوب و جنوب‌غرب حوضه ترسالی دارند و مابقی حوضه در قلمرو خشکسالی قرار دارد که سهم ۴۷ درصدی به خود اختصاص داده است (شکل ۸، جدول ۵). در حوزه آبریز فلات مرکزی به عنوان بزرگترین حوزه آبریز ایران که بخش‌های وسیعی از مناطق داخلی کشور را در برمی‌گیرد، وضعیت خشکسالی نسبت به دیگر حوضه‌ها بسیار بحرانی‌تر است. به طوری‌که سهم ترسالی‌ها نزدیک به صفر و سهم خشکسالی‌ها نزدیک ۸۰ درصد از مساحت حوضه

می‌باشد (شکل ۹، جدول ۶). همسایگی با کویرها و بیابان‌های داخلی ایران، قرارگیری در بادپناه شرقی نوار کوهستانی زاگرس و بادپناه جنوبی سلسله جبال البرز سبب شده است این پهنه وسیع، در گستره خشکسالی‌های شدید و بحران‌های زیست‌محیطی قرار گیرد. در حوزه آبریز مرزی شرق ایران در راستای نوار شمال-جنوب، اوضاع اقلیمی چندان مساعد نیست و تمام طیف‌های ترسالی سهم صفر درصدی دارند و خشکسالی‌ها، ۶۰ درصد از وسعت حوضه را در برگرفته است (شکل ۱۰، جدول ۷). دوری از منابع رطوبتی کشور، همجواری با کویر لوت و ارتفاع اندک حوضه، نقش بسزایی در کاهش بارش و در نهایت افزایش خشکسالی این حوضه بازی می‌کند. در حوزه آبریز قره‌قوم (سرخس) در شمال‌شرق ایران، نیز اوضاع خشکسالی بسیار شدید است و ترسالی‌ها سهم صفر درصدی و خشکسالی‌های بسیار شدید، سهم ۴۴ درصدی را از آن خود کرده است. این حوضه نیز مانند حوزه مرزی شرق ایران به سبب نداشتن منابع تامین کننده رطوبت، توپوگرافی خاص و موقعیت ویژه جغرافیایی، در قلمرو مناطق کم‌بارش کشور قرار می‌گیرد (شکل ۱۱، جدول ۸).



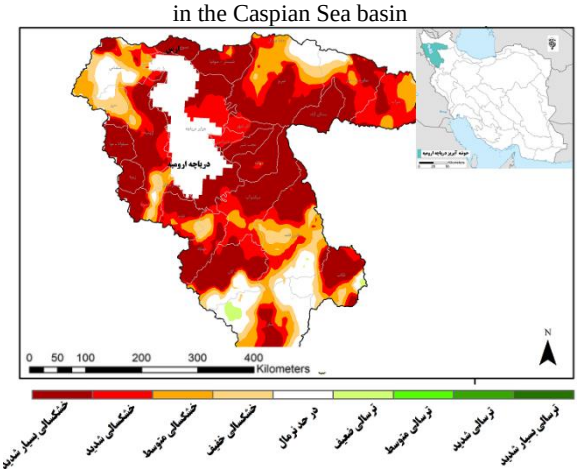
شکل ۶- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز دریای مازندران

Figure 6- Hydro-climatic situation and drought distribution in the Caspian Sea basin



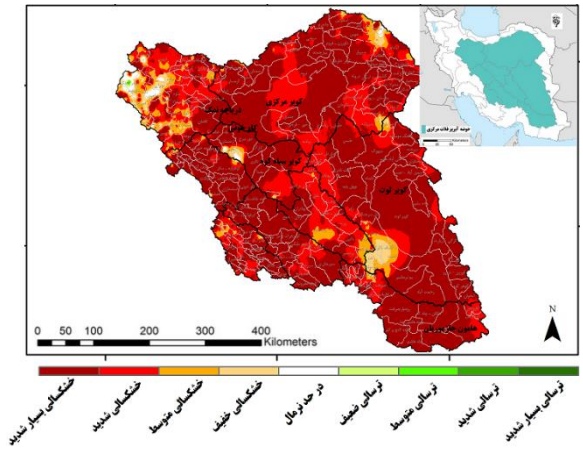
شکل ۷- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان

Figure 7- Hydro-climatic situation and drought distribution in the Persian Gulf and Oman basin



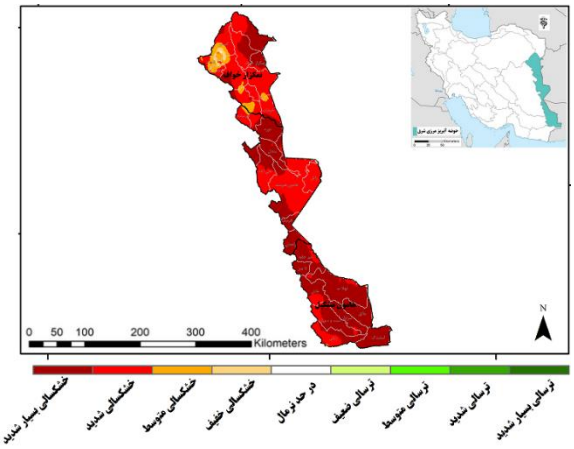
شکل ۸- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه

Figure 8- Hydro-climatic situation and drought distribution in the Lake Urmia basin



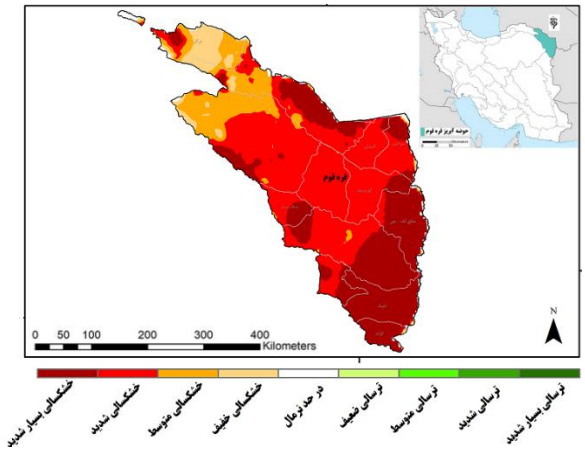
شکل ۹- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز فلات مرکزی

Figure 9- Hydro-climatic situation and drought distribution in the Central Plateau basin



شکل ۱۰- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز مرزی شرق

Figure 10- Hydro-climatic situation and drought distribution in the Eastern Border basin



شکل ۱۱- موقعیت هیدرواقلیمی و پراکنش خشکسالی در حوزه آبریز دریای قره‌قوم

Figure 11- Hydro-climatic situation and drought distribution in Qaraqom basin

جدول ۳- مساحت خشکسالی در حوزه‌های آبریز ایران (به درصد) بر اساس دوره آماری ۵۰ ساله (۱۳۵۴ تا ۱۴۰۳)

Table 3- Drought area in drainage basins of Iran (%) for 50-year statistical period (1975 to 2024)

نام حوزه	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی متوسط	ترسالی ضعیف	درحد نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
دریای مازندران	2.05	0.83	1.30	2.87	13.67	10.91	13.88	17.91	36.57
خلیج فارس و دریای عمان	0.06	0.02	0.02	0.11	1.56	3.05	10.19	34.58	50.41
دریاچه ارومیه	0.46	0.26	0.71	1.11	8.27	8.55	13.63	19.90	47.14
فلات مرکزی	0.00	0.01	0.05	0.09	1.02	1.76	3.57	15.38	78.12
مرزی شرق	0.00	0.00	0.00	0.00	2.51	2.27	4.95	31.38	58.59
قره‌قوم	0.00	0.00	0.00	0.00	2.89	4.59	11.51	37.12	43.88

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اقلیم‌شناسی حوزه‌های آبریز اصلی ایران نشان داد که الگوی غالب اقلیمی در کشور ایران طی ۵۰ سال اخیر نشان از روند افزایشی دما با ۰/۴۱ درجه در هر دهه با سطح اطمینان ۹۵ درصد، افزایش تبخیروتعرق با نرخ ۵/۱۳ میلی‌متر در سال به‌همراه روند کاهشی بارش به میزان ۱/۱ میلی‌متر در سال است. بنابراین رخداد این شرایط سبب افزایش تبخیروتعرق از یک‌سو و از سویی دیگر، تشدید خشکسالی‌های فراگیر در کشور شده است که در نهایت، سبب افزایش نیاز آبی گیاه جهت رشد و باردهی شده و علاوه بر کاهش کیفیت تولیدات گیاهی، کمیت تولید نیز دچار مشکل شده و امنیت غذایی بشر به خطر می‌افتد. به نظر می‌رسد خشکسالی در ایران فقط مربوط به مناطق داخلی و کم‌بارش کشور نیست و احتمال رخداد این پدیده در هر اقلیمی (حتی مناطق پربارش خزری) نیز وجود دارد. بنابراین در نیم قرن اخیر، خشکسالی در کشور ایران هم شدت گرفته و هم فراگیر شده است و محدود به مناطق گرم و خشک داخلی نیست و حتی در نیمه شمالی، شمال‌غربی و غرب ایران نیز رخنه کرده است. ضمن اینکه، ترسالی‌ها در ایران نیز متمرکز شده و از پدیده لانه‌گزینی اقلیمی تبعیت می‌کند. این شرایط، نقش افزایش گرمایش جهانی و تغییرات فزاینده اقلیمی را تایید می‌کند. ضمن اینکه دوربودن از منبع رطوبتی؛ همسایگی با کویرها و بیابان‌های داخلی ایران؛ قرارگیری در بادپناه شرقی نوار

کوهستانی زاگرس و بادپناه جنوبی سلسله جبال البرز سبب شده است که حوزه‌های آبریز ایران دچار خشکسالی شدید و بحران‌های آبی قرار گیرند. به طوری که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، کمبود بارندگی اثرات شدیدی بر روی منابع آبی می‌گذارد و در اغلب موارد خشکسالی‌های هواشناسی به وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی منتهی خواهد شد. اما در مناطق مرطوب و بارشی ایران، کمبود بارش سبب کاهش سطح تولید محصولات کشاورزی و در نهایت منجر به خسارت‌های اقتصادی و مالی می‌شود.

در نهایت برای سازگاری با اثرات تغییر اقلیم جهانی و جلوگیری از پیامدهای زیانبار خشکسالی در ایران، اقدامات عملیاتی زیر در کوتاه‌مدت و بلندمدت پیشنهاد می‌شود: استفاده از فناوری‌های نوین جهت پایش و پیش‌بینی پدیده خشکسالی مانند استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های رقومی مستخرج از آن‌ها؛ استفاده از پهبادها جهت رصد منظم و مداوم سطوح آبی کشور مانند سدها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها؛ جلوگیری از احداث چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق غیراصولی و غیرمجاز؛ کشاورزی اصولی و استفاده از روش‌های صحیح آبیاری؛ برنامه‌ریزی برای جلوگیری از بیابان‌زایی از طریق احداث بادشکن‌های طبیعی و مصنوعی؛ اجرای عملیات آبخوان‌داری و آبخیزداری در بالادست حوزه‌های آبریز مانند گابیون‌سازی و بندسازی؛ آموزش همگانی در مدارس و دانشگاه‌ها جهت صرفه‌جویی آب در بخش خانگی و مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری در بخش‌کشاورزی و صنعتی؛ رعایت الگوی کشت در کشور و تمرکز بر کشت‌های سازگار با اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور؛ بهبود پوشش‌های بیمه‌ای محصولات کشاورزان؛ ایجاد فرصت‌های اشتغال غیرکشاورزی خصوصاً در صنایع‌دستی و تولیدات روستایی؛ اعطای کمک‌های یارانه‌ای و غیرنقدی به کشاورزان برای جبران کمبودهای ناشی از خسارت‌های خشکسالی؛ توسعه کشت گلخانه‌ای به دلیل پایین بودن مصرف آب و اشتغالزایی بالای آن.

سپاسگزاری

نویسنده این پژوهش از حمایت‌های بی‌دریغ مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی کشور به سبب در اختیار گذاشتن نقشه‌ها و داده‌های مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

Abdulaziz, O.I., & Burn, D.H. (2006). Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 319, 282-294. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.039

Alijani, B., & Babaee, O.S. (2009). Spatial Analysis of Short-Term Droughts in Iran. *Geography and Regional Planning*, 88, 109-121. https://doi.org/20.1001.1.25383930.1388.1.0.7.5 (In Persian)

Alizadeh, A. (2015). *Principles of Applied Hydrology, Astan Quds Razavi Publications*. Imam Reza University (AS), Mashhad. (In Persian)

Asgari, S., Raziei, T., Jafari, M., & Noroozi, A. (2025). The effects of meteorological drought on oak forest dieback in Ilam province. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 25 (76), 308-325. http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.1 (In Persian)

Baig, M. H. A., Abid, M., Khan, M. R., Jiao, W., Amin, M., & Adnan, S. (2020). Assessing meteorological and agricultural drought in Chitral Kabul River Basin using multiple drought indices. *Remote Sensing*, 12 (9), 1417. https://doi.org/10.3390/rs12091417

Barry, R.G., & Chorley R.J.A. (1992). *Atmosphere and Climate, Six edition* Routledge.

Beaudin, I. (2006). *Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de*

sécheresse en milieu méditerranéen. University LAVAL.

Burn, D. H., & Hesch, N. M. (2007). Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 336, 61-73. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.011

Croitoru, A. E., & Toma, F.M. (2011). Meteorological Drought in Central Romanian Plain (Between OLT and Ages Rivers) Case Study: Year 2000. *Riscuri Sicatastrofe*, 9, 113-120.

Dadashi Roudbari, A., & Keykhosravi Kiani, M. (2016). Analysis of the spatial and temporal trend of annual rainfall in Iran during 1950–2007. *Environmental Sciences and Water Management*, 2(2), 111–121. (In Persian)

Das, S., Roy, C., & Malini, S. (2013). Geospatial Assessment of Agricultural Drought (case study of Bankura, weast Bengal). *International Journal of Agricultural Science and Research*, 1, 1-28. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-684936/v1

Delghandi, M., Joorabloo, S., & Emamgholizadeh, S. (2017). Climate change impacts on spatial-temporal variations of reference evapotranspiration in Iran. *Water Harvesting Research*, 2(1), 13–23. https://doi.org/10.22077/jwhr.2017.592

Dhawale, R., & Paul, S. K. (2018). A Comparative Analysis of Drought Indices on Vegetation Through Remote Sensing for Latur Region of India. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5:20-23. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-403-2018

Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Mogaddam, M., Jahanbakhsh, S., & Mirnia, M. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, 399(3), 422- 433. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021 (In Persian)

Drolet, J. L., & Sampson, T. (2017). Addressing climate change from a social development approach: Small cities and rural communities' adaptation and response to climate change in British Columbia, Canada. *International Social Work*, 60, 61-73. https://doi.org/10.1177/0020872814539984

Elfaigh, A. H. I. (2015). *Strategies to Reduce Drought Vulnerability with Special Emphasis on Coping Strategies of the Poor: Sub–Saharan Semi-arid area, Western Sudan.* International Conference on Integrated Drought Management: Lessons for Sub-Saharan Africa, At: Pretoria, South Africa.

Fanaei, R., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2021). Reanalyzing the Trend of Long-term Spatial Changes in the Minimum Temperature of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 11(4), 1-17. https://doi.org/10.22126/ges.2021.6938.2453 (In Persian)

Fattahi, I., & Sedaghatkerdar, A. (2007). Analysis of drought intensity-duration and frequency curves: case study; selected stations in southwestern Iran. *Geography and Development Iranian Journal*, 86, 1-13. https://doi.org/10.22111/gdij.2007.3666 (In Persian)

Feng, G. (2014). Monitoring drought intensity in Illinois with a combined index, AM Degree of Geography and Environmental Resources, In the Graduate School Southern Illinois University.

Garbrecht, J., M. Van Liew., & G. O. Brown., (2004). Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States. *Journal of Hydrological Engineering*, 9(5), 360-367 https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:5(360)

Halwani, J., & Halwani, B. (2022). Climate Change in Lebanon and the Impact to Water Resources. In W.Leal Filho & E. Manolas (Eds.), *Climate Change in the Mediterranean and Middle Eastern Region*, 395–41. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78566-6_19

Hedjazizadeh, Z., Hosseini, S. M., Karbalaee, A.R., & layeghi, S. (2025). Assessment of Drought Impact on Vegetation Changes in Hamadan over the

Past Three Decades Using the TCI Model. *Journal of Applied Researches in Geographical Science*, 25, 44-59. https://doi.org/10.61186/jgs.25.77.23 (In Persian)

Hirsch, R. M., & Slack, J.R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20, 727-732. https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727

Hosseini Seddigh, S.M., & Jalali, M. (2025). Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's elf-Adjustment Index. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1, 93-106. https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.6149.1016 (In Persian)

Hosseini, S. M., & Fateminya, F.S. (2021). *Exploring Iran's natural hazards*. The 6th National Congress of New Findings in Agricultural and Natural Resources, Environment and Tourism, Tehran, Iran. (In Persian)

Hosseini, S. M., khoramabadi, F., & Solfagharzadeh, S. (2024). Climatology of Arid and Semi-Arid Regions in Central Iran. *Journal of geography and human relationships*, 7(1), 498–517. https://doi.org/10.22034/gahr.2024.435076.2028 (In Persian)

Hosseini, S. M., khoramabadi, F., & Tahani yazdly, M. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Changes of Dust Hazard in Kurdistan Province. *Journal of Environmental Researches*, 28, 181-197. https://doi.org/10.22034/eiap.2024.191709 (In Persian)

Jain, S. K., V. Kumar., & M. Sahari. (2013). Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. *International Journal of Climatology*, 33, 968-978. https://doi.org/10.1002/joc.3483

Jamali, M., Gohari, A., & Akhavan Saraf, G. (2024). Spatiotemporal evaluation of temperature and precipitation extremes indices over Iran under the influence of climate change. *Water and Irrigation Management*, 14(3), 743-752. https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374814.1156 (In Persian)

Jhajharia, D., Dinpashoh. Y., Kahya. E., Singh, V.P., & Fakheri-Fard, A. (2012). Trend in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes*, 26, 421-435. https://doi.org/10.1002/hyp.8140

Kamali, S., Fattahi, F., & Habibi, M. (2025). Investigating the Trend Changes in Temperature Extreme Indices in Iran. *Atmosphere*, 16, 483-496. https://doi.org/10.3390/atmos16040483 (In Persian)

Khoushakhlagh, F., Azizi, G., & Rahimi, M. (2012). Synoptic patterns of winter drought and wetness in southwestern Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Science*, 25, 57-77. (In Persian)

Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite Data and Information Service, Camp Springs, Maryland, 4, 621-636. https://doi.org/10.1175/1520-0477

Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*,11, 3044. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w

Maleki, A.R., & Torkamani, M.J. (2015). Drought Management for Optimazation of Water Resources. *Journal of Agricultural Economics Research*, 25, 65-89. (In Persian)

Mardani, R., & Montaseri, H. (2023). Spatio-temporal variation of meteorological drought and its relation with temperature and vegetation condition indices using remote sensing and satellite imagery in Marvdasht city. *Water and Soil Management and Modeling*, 3, 72-89. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11541.1140 (In Persian)

Masoodian, S.A. (2011). *Iran's weather, Sharia Toos Publications*. Sharia Toos Publications. (In Persian)

Mckee, T.B., Doesken, N.J & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA.176-184.

Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Panitz, H. J., (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 592, 125- 146. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125614

Moradi, H., & Maleki, S. (2025). Investigating the security challenges of drought and water crisis in Khuzestan. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 20, 21-39. https://doi.org/10.22124/gscaj.2025.25366.1263 (In Persian)

Ongoma, V., Chena, H., & Gaoa, C. (2018). Projected changes in mean rainfall and temperature over east Africa based on CMIP5 models. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1375–1392. https://doi.org/10.1002/joc.5252

Orimoloye, I. R., Belle, J. A., Orimoloye, Y. M., Olusola, A. O., & Ololade, O. O. (2022). Drought: A common environmental disaster. *Atmosphere*, 13 (1), 111. https://doi.org/10.3390/atmos13010111

Panda, A., Sahoo, N., Panigrahi, B., & Mohan Das, D. (2020). Drought Assessment using Standardized Precipitation Index and Normalized Difference Vegetation Index. *nt. J. Curr. Microbiol. App. Sci*. 9(7), 1125-1136. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.907.132

Raziei, T., Bordi, I., & Pereira, L. S. (2008). A precipitation-based regionalization for Western Iran and regional drought variability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1309–1321. https://doi.org/10.5194/hess-12-1309-2008

Salakpi, F. (2021). Forecasting Vegetation Condition in Pastoral Communities for Disaster Prevention, Ph.D Degree of Philosophy, University of Sussex.

Shirgholami, H., & Ghahraman, B. (2005). Study of Time Trend Changes in Annual Mean Temperature of Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 9, 9-24. (In Persian)

Silva, V. P. R. (2003). climate variability in northeast Brazil. *Journal of Arid Environment*, 58(4), 575–596. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002

Tabari, H., & Hosseinzadehtalaei, P. (2011). Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. *Journal of Hydrology*, 396(4), 313–320. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.034 (In Persian)

Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaee, P.H. Mohammadi, K. (2011). Trend Analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 128-136. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009

Tajbakhsh, S. (2025). Reviewing the Latest Climate State and Its Changes on Global and National Scales. *Journal of the Nivar*, 129, 173-194. https://doi.org/10.30467/nivar.2025.529698.1340 (In Persian)

Wang, F., Yang, H., Zhao,Y., Li, Z., & Wu, J. (2018). Capability of Remotely Sensed Drought Indices for Representing the Spatio–Temporal Variations of the Meteorological Droughts in the Yellow River Basin. *Journals Remote Sensing*, 11, 1834-1844. https://doi.org/10.3390/rs10111834

Wang, Y., Jiang, T., Bothe, O., & Fraedrich, K., (2007). Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 13-23. https://doi.org/10.1007/s00704-006-0276-y

Wu, H., & H. Qian. (2017). Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. *International Journal of Climatology*, 37(2), 2582-2592. https://doi.org/10.1002/joc.4866

Xu, S., Yu, Z., Yang, C., Ji, X., & Zhang, K. (2018). Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin. *Agricultural and forest meteorology*, 263, 118-129. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.010

Yu, Y., Pi, Y., Yu, X., Ta, Z., Sun, L., Disse, M., Zeng, F., Li, Y., Chen, X., & Yu, R., (2019). Climate change, water resources

and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. *Journal of Arid Land*, 11, 1–14. https://doi.org/10.1007/s40333-018-0073-3

Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254-271. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7

Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 149-164 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2026.2077942.1253 **Online ISSN: 2783-4581**

Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management

Mohamadreza Raeisi Dehkordi*, Amir Hossein Yeganeh Mazhar

Department of Civil Engineering Science and Research Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

*** Corresponding author**: mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

(Received: 18 November 2025 Revised: 06 February 2026 Accepted: 01 June 2026)

Extended Abstract

Introduction: Contamination of water resources by heavy metals, due to their high persistence, bioaccumulation potential, and toxic effects, is considered to be one of the serious challenges for sustainable water resources management in urban-industrial watersheds. The Karaj watershed, because of its population density, industrial and agricultural activities, is among the areas prone to this type of contamination. However, a comprehensive assessment of the spatial distribution and environmental status of heavy metals in the water resources of this watershed has received less attention. Therefore, the overall aim of this study is to spatially analyze and assess the risk of heavy metals in the groundwater resources of the Karaj watershed in order to provide management strategies for sustainable water resources development.

Materials and methods: Water samples were collected from 22 monitoring stations distributed across the Karaj watershed, covering the upstream, midstream, and downstream reaches. Sampling and analyses were conducted in collaboration with the Alborz Province Water and Wastewater Company. Concentrations of Arsenic (As), Nickel (Ni), and Chromium (Cr) were determined using standard methods recommended by the World Health Organization (WHO) and the Iranian National Standards (ISIRI 1053). Geographic coordinates of sampling points were recorded using GPS devices. To assess the spatial variability of metal concentrations, the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method was applied in the ArcGIS environment. Three pollution indices were used to quantify the contamination levels: (1) the single-factor Pollution Index (PI), (2) the Heavy Metal Pollution Index (HPI), and (3) the Contamination Degree (Cd). The results of these indices were compared with the permissible limits of WHO and ISIRI standards. Statistical analyses were conducted using descriptive statistics and correlation analysis to evaluate the relationships among metals and identify potential pollution sources.

Results and Discussion: The concentrations of As, Ni, and Cr in all sampling sites were below the permissible limits of the WHO and ISIRI drinking water standards. Spatial interpolation maps revealed that the concentration gradients of heavy metals were generally uniform across the watershed, with slightly elevated values near agricultural and urban zones the downstream of the Karaj River. The calculated pollution indices indicated low contamination risk in all sampling locations: the maximum PI values were below 1, the mean HPI was significantly lower than the critical value of 100, and the Cd index approached zero. These findings suggest that the water quality in the Karaj watershed is within a safe range with respect to heavy metal pollution. The spatial uniformity of contamination patterns reflects the absence of major point-source pollution, implying that the detected concentrations primarily result from natural geochemical processes and limited non-point sources. The integration of GIS-based spatial analysis with pollution indices proved effective for identifying potential vulnerable zones and for supporting watershed-scale environmental management.

Conclusion: The concentrations of As, Ni, and Cr in the surface water resources of the Karaj watershed were below the applicable national and international permissible limits. Furthermore, the calculated pollution indices indicated no significant contamination. These findings suggest that heavy metal contamination in the surface water resources of the Karaj watershed is currently limited. The key findings are summarized as follows:

1. Water quality in the study area was within acceptable limits with respect to the heavy metals investigated.
2. Spatial variations in heavy metal concentrations were limited and appeared to be primarily associated with natural geological factors.
3. The PI, HPI, and Cd indices consistently indicated low levels of contamination, suggesting relatively good water quality with respect to heavy metal pollution.
4. Continued periodic monitoring, combined with spatial analysis techniques, could help identify potential changes in heavy metal concentrations associated with urban and agricultural development.

The analytical approach adopted in this study provides a preliminary framework for assessing heavy metal contamination in other watersheds across the country.

Keywords: Heavy metals, Heavy Metal Pollution Index (HPI), Inverse Distance Weighting (IDW), Karaj Watershed, Sustainable Water Resources Management.

Citation: Raeisi dehkordi, M. R. & Yeganeh Mazhar, A. H. (2026). Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 149-164. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077942.1253

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۶۴-۱۴۹) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2026.2077942.1253

ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب

محمدرضا رئیسی دهکردی*، امیرحسین یگانه مظهر

گروه عمران مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران

***نویسنده مسئول:** mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۷ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۱۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۱۱)

چکیده مبسوط

مقدمه: آلودگی منابع آب به فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا، خاصیت تجمع‌زیستی و اثرات سمی، یکی از چالش‌های جدی مدیریت پایدار منابع آب در حوزه‌های آبخیز شهری-صنعتی محسوب می‌شود. حوزه آبخیز کرج به دلیل تراکم جمعیت، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، از مناطق مستعد این نوع آلودگی است. با این حال، ارزیابی جامع از پراکنش مکانی و وضعیت محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب این حوزه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف کلی این پژوهش، تحلیل مکانی و ارزیابی خطر فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی برای توسعه پایدار منابع آب است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از داده‌های پایش شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز استفاده شد. نمونه‌برداری از ۱۲ ایستگاه در دو فصل در نقاط مختلف حوزه آبخیز کرج شامل بخش‌های بالادست، میانی و پایین‌دست انجام گرفت. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد. غلظت فلزات سنگین آرسنیک، نیکل و کروم با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI 1053) اندازه‌گیری گردید. برای تحلیل مکانی، داده‌های مربوط به غلظت فلزات وارد محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) شد و از روش درون‌یابی IDW جهت تهیه نقشه‌های توزیع مکانی استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی سطح آلودگی از سه شاخص عددی استفاده شد. (۱)شاخص آلودگی تک عنصری (PI) جهت سنجش میزان آلودگی هر فلز نسبت به حد مجاز. (۲) شاخص آلودگی فلزات سنگین(HPI) برای ارزیابی آلودگی کلی چند فلز. (۳) شاخص درجه آلودگی (Cd) برای برآورد سطح کلی آلودگی محیطی. مقادیر این شاخص‌ها با حدود مجاز استانداردهای WHO و ISIRI مقایسه گردید. همچنین، از روش‌های آماری توصیفی و تحلیل همبستگی برای بررسی ارتباط میان غلظت فلزات استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که غلظت فلزات سنگین آرسنیک، نیکل و کروم در کلیه ایستگاه‌های نمونه‌برداری کمتر از حدود مجاز استانداردهای WHOو ISIRI است. نقشه‌های درون‌یابی مکانی نیز حاکی از یکنواختی نسبی توزیع فلزات در سطح حوزه بوده و غلظت‌های بالاتر به طور جزئی در نواحی پایین‌دست و مجاور مناطق کشاورزی و شهری مشاهده شد. بر اساس محاسبات، مقادیر شاخص آلودگی PI برای تمام فلزات کمتر از ۱ بود که بیانگر وضعیت ایمن از نظر آلودگی فلزات سنگین است. مقدار میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) بسیار پایین‌تر از مقدار بحرانی ۱۰۰ به دست آمد که نشانگر نبود خطر جدی آلودگی فلزی است. شاخص درجه آلودگی (Cd) نیز در تمامی ایستگاه‌ها نزدیک به صفر بود و حاکی از وضعیت بسیار مطلوب منابع آب سطحی از نظر تجمع فلزات سنگین می‌باشد. تحلیل همبستگی بین فلزات نشان داد که رابطه معنی‌دار بین آرسنیک و نیکل وجود ندارد و منشأ آلودگی‌ها بیشتر طبیعی و ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه است تا منابع انسانی. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که حوزه آبخیز کرج در حال حاضر از نظر آلودگی فلزات سنگین در وضعیت پایدار قرار دارد و خطر محیط‌زیستی قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های این پژوهش، نتیجه‌گیری شد که غلظت فلزات آرسنیک، نیکل و کروم در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج پایین‌تر از حدود مجاز بین‌المللی و ملی است و شاخص‌های آلودگی محاسبه‌شده نیز نشانگر نبود آلودگی معنی‌دار هستند. این نتایج تأکید می‌کند که حوزه آبخیز کرج در وضعیت محیط‌زیستی مطلوبی قرار دارد و از منظر فلزات سنگین تهدیدی متوجه منابع آب آن نیست. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

۱) وضعیت کیفی آب در محدوده مورد مطالعه در سطح ایمن و قابل‌قبول است.

۲) تغییرات مکانی فلزات سنگین ناچیز و به طور عمده تحت‌تأثیر عوامل زمین‌شناسی طبیعی می‌باشد.

۳) شاخص‌های PI، HPI و Cd هر سه مؤید پایین‌بودن سطح آلودگی و پایداری کیفی منابع آب هستند.

۴) تداوم پایش‌های دوره‌ای و استفاده از روش‌های مکانی می‌تواند در شناسایی تغییرات احتمالی ناشی از توسعه شهری و کشاورزی مؤثر باشد.

روش تحلیلی مورداستفاده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگویی مقدماتی برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در سایر حوزه‌های آبخیز کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، شاخص آلودگی فلزات، درون‌یابی فاصله معکوس، حوزه آبخیز کرج، مدیریت پایدار منابع آب

استناد: رئیسی‌دهکردی، م.ر.، و یگانه مظهر، ا.ح. (۱۴۰۵). ارزیابی محیط زیستی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۶۴-۱۴۹. https://doi.org/10.22034/iwm.2026.2077942.1253

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد شتابان شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی سبب شده است که کیفیت منابع آب در بسیاری از مناطق کشور با چالش جدی روبه‌رو شود. از طرفی منابع آب سطحی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی نظام‌های محیط‌زیستی و توسعه پایدار، نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت دارند (Raeisi dehkordi *et al*., 2023). بااین‌حال، افزایش جمعیت، توسعه شهری و فعالیت‌های صنعتی در دهه‌های اخیر موجب ورود انواع آلاینده‌ها ازجمله فلزات سنگین به منابع آب شده است (Singh *et al*., 2024). فلزات سنگین نظیر سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، مس (Cu) و روی (Zn) به دلیل پایداری بالا، خاصیت تجمع زیستی و اثرات سمی بر موجودات زنده، از مهم‌ترین آلاینده‌های غیرآلی محسوب می‌شوند که می‌توانند تعادل بوم‌شناختی حوزه‌های آبخیز را مختل کنند (Huang *et al*., 2024).

در حوزه‌های آبخیز شهری و نیمه‌صنعتی، ترکیب پیچیده‌ای از منابع آلاینده شامل پساب‌های صنعتی، فاضلاب شهری، رواناب‌های سطحی و فرسایش خاک منجر به ورود تدریجی فلزات سنگین به شبکه‌های آب سطحی می‌شود. این پدیده نه‌تنها کیفیت آب را کاهش می‌دهد، بلکه چرخه‌های زیستی را در نظام‌های رودخانه‌ای تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Crispin & Parthasarathy, 2025). ازاین‌رو، شناسایی الگوی مکانی آلودگی و ارزیابی میزان خطرات محیط‌زیستی ناشی از آن، گامی اساسی در مدیریت کیفی منابع آب و تصمیم‌سازی‌های حوزه آبخیز است.

تحلیل مکانی با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و شاخص‌های آلودگی نظیر (PI[1])، (HPI[2]) و(Cd[3]) ابزاری کارآمد برای تعیین گستره، شدت و منشأ احتمالی آلودگی در محیط‌های آبی به شمار می‌رود. این روش‌ها با تلفیق داده‌های مکانی و کیفی، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی مدیریتی را فراهم می‌سازند (Aparisi-Navarro *et al*., 2025). افزایش فعالیت‌های صنعتی و تمرکز جمعیتی در سال‌های اخیر، موجب رشد قابل‌توجه آلاینده‌های محیطی و به‌ویژه تغییرات کیفی در منابع آب‌وخاک کشور شده است. بررسی‌های انجام‌شده در مناطق صنعتی ایران نیز نشان داده‌اند که آلودگی‌های محیط‌زیستی صرفاً پیامدهای بوم‌شناختی ندارند، بلکه بر ابعاد اجتماعی و سلامت جامعه نیز تأثیرگذارند (Mousavipoor *et al*., 2022).

حوزه آبخیز کرج به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی، تراکم بالای جمعیت، فعالیت‌های صنعتی و وجود مسیرهای انتقال پساب‌های شهری، یکی از مناطق مستعد آلودگی فلزات سنگین در کشور محسوب می‌شود. بررسی‌های پراکنده در سال‌های گذشته عمدتاً به جنبه‌های کمی منابع آب پرداخته‌اند و ارزیابی جامع از وضعیت کیفی و پراکنش فلزات سنگین در این حوزه کمتر موردتوجه قرار گرفته است (Borji Hassangavyar *et al*., 2021).

براین‌اساس، هدف از پژوهش حاضر تحلیل مکانی و ارزیابی محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب است. این مطالعه با ترکیب داده‌های اندازه‌گیری میدانی و تحلیل‌های جغرافیایی، به دنبال تبیین وضعیت کنونی آلودگی فلزات سنگین، شناسایی مناطق بحرانی و ارائه راهکارهایی جهت مدیریت کیفی پایدار منابع آب می‌باشد.

در راستای درک بهتر از وضعیت آلودگی فلزات سنگین در منابع آب و جایگاه این مسئله در مدیریت حوزه‌های آبخیز، مرور پژوهش‌های انجام‌شده در داخل و خارج از کشور می‌تواند به تبیین رویکردها، شاخص‌ها و نتایج مطالعات پیشین کمک نماید.

[1] Pollution Index

[2] Heavy Metal Pollution Index
[3] Contamination Degree

در مطالعه‌ای که توسط Fazel Tavassol و همکاران (۲۰۱۷) انجام شده است، ۳۲ نمونه آب زیرزمینی را طی فصول مختلف با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS[۴]) بررسی کردند و غلظت فلزات جیوه (Hg)، کُبالت (Co)، مس، روی، نیکل، کروم و سرب را با حدود مجاز WHO و استانداردهای ایران سنجیدند. نتیجه‌ی کلیدی آن بود که به طور میانگین اغلب فلزات زیر حدود مجاز بودند، اما در برخی نقاط جیوه و آرسنیک از حد مجاز فراتر رفتند؛ نویسندگان منشأهای انسانی (ازجمله گذر کانال فاضلاب رواناب شهری حِصارک–قزلحصار) را در آلودگی‌های موضعی محتمل دانستند. Ghalandarzadeh و همکاران (2020) رودخانه کرج را به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی حوزه آبخیز کرج مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق در سال ۲۰۱۸ و در ۷ ایستگاه انجام شد. آن‌ها غلظت فلزات کادمیوم، کروم و روی را در آب و رسوب با استفاده از دستگاه ICP اندازه‌گیری کردند. همچنین شاخص زیستی Z محاسبه گردید. یافته مهم این پژوهش نشان داد که غلظت فلزات از بالادست به پایین‌دست افزایش معنی‌داری دارد. همچنین وضعیت آلودگی در تابستان بدتر از زمستان بود. نویسندگان علت این پدیده را تخلیه‌های شهری، صنعتی و کشاورزی در مناطق پایین‌دست دانستند. این نتایج شواهد تجربی قوی از تأثیر تراکم جمعیت، فعالیت‌های خدماتی-صنعتی و مسیرهای پساب بر بدنه‌های آبی حوزه کرج ارائه می‌دهد و تصویر کیفی منطقه را تکمیل می‌کند. Eslami و همکاران (2022) در تحقیق خود نمونه‌های آب زیرزمینی آشامیدنی منطقه جنوب‌شرقی ایران را مورد بررسی قرار دادند و غلظت فلزات سمی مانند سرب، کادمیوم، نیکل، روی و غیره را اندازه‌گیری کردند. علاوه بر آن، توزیع فضایی (نقشه‌برداری) و ارزیابی ریسک سلامت بر اساس مصرف آب انجام شد. نتایج نشان داد که در بعضی مناطق سطح فلزات نزدیک یا فراتر از حد مجاز است و ریسک برای بعضی گروه‌ها قابل‌توجه محسوب می‌شود. Aghamirzadeh و همکاران (2022) به بررسی تغییرات غلظت عنصر آلومینیوم در منابع آب سطحی (رودخانه شور) و زیرزمینی (قنوات و چاه‌ها) در حوزه آبخیز سرچشمه کرمان پرداختند. نمونه‌برداری در دو فصل تر و خشک انجام و با استفاده از آزمون آماری t-test، تفاوت‌های فصلی و مکانی بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین غلظت آلومینیوم در نزدیکی معدن مس سرچشمه مشاهده شده (بین ۱ تا ۱/۷۷ میلی‌گرم بر لیتر) و با افزایش فاصله از معدن، غلظت کاهش می‌یابد. همچنین غلظت آلومینیوم در آب‌های سطحی فصل تر و در آب‌های زیرزمینی فصل خشک بالاتر از سایر مقاطع بود. میزان آلومینیوم در بیشتر نمونه‌ها از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت فراتر رفت و آب منطقه برای شرب نامناسب ارزیابی شد. Raeisi Dehkordi & Yeganeh Mazhar (2023) به‌منظور بهینه‌سازی ضرایب پویآبی[۵] و شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی در آبخوان دامنه–داران از مدل عددی GMS[۶] و ماژول‌های MODFLOW، MT3DMS و MODPATH استفاده کردند. نتایج مدل نشان داد دقت شبیه‌سازی بسیار بالا بوده (ضریب تعیین بیش از ۰/۹۹) و در بخش‌هایی از آبخوان غلظت نیترات تا بیش از ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته است که بیانگر گسترش ناحیه آلودگی و تأثیر مستقیم بهره‌برداری بی‌رویه و خشکسالی بر افت سطح آب و تشدید آلودگی می‌باشد. این پژوهش با ترکیب مدل جریان و مدل انتقال، الگویی کاربردی برای تحلیل رفتار آلودگی در آبخوان‌های مشابه، ازجمله حوزه آبخیز کرج فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط Younesi Baneh و همکاران (2024) در استان کردستان انجام شده، ۱۵۵ نمونه‌ی چاه‌ها و چشمه‌ها با دستگاه ICP-MS برای ۲۰ فلز ردیابی شدند؛ سپس ارزیابی ریسک

[4] Atomic Absorption Spectrometry
[5] Hydrodinamic
[6] Groundwater Modeling System

سلامت (HQ/HI و ریسک سرطان‌زایی) برای گروه‌های سنی انجام شد. نتایج نشان داد برخی فلزات مثل آرسنیک و Li ریسک غیرسرطان‌زایی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کنند و ریسک سرطان‌زاییِ سرب از حدود راهنما فراتر است.

باتوجه‌به اهمیت مدیریت کیفی منابع آب و لزوم شناسایی دقیق مناطق بحرانی در حوزه آبخیز کرج، انجام تحلیل‌های مکانی و شاخصی می‌تواند تصویری جامع از وضعیت کنونی آلودگی فلزات سنگین ارائه دهد. براین‌اساس، در ادامهٔ این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و ابزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی، شاخص‌های کمی آلودگی شامل PI، HPI و Cd محاسبه و توزیع مکانی آن‌ها در محدوده مورد مطالعه تحلیل شده است. نوآوری و اهمیت پژوهش حاضر در آن است که برای نخستین بار در منطقه مورد مطالعه، وضعیت فلزات سنگین در منابع آب با رویکردی ترکیبی شامل ۱) سنجش آزمایشگاهی غلظت عناصر، ۲) تحلیل سه شاخص تجمیعی HPI، PImax و CD، و ۳) مدل‌سازی و نمایش الگوی مکانی غلظت فلزات با استفاده از GIS و روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله[۷] ارزیابی شد. نتایج این مطالعه به‌عنوان یک داده پایه[۸] می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و پایش بلندمدت کیفیت آب منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کرج در شمال‌غربی استان تهران و بخشی از استان البرز کنونی واقع شده است. این حوزه از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی "۲۳ '۵۴ °۵۰ تا "۵۹ '۵۷ °۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۴ '۴۲ °۳۵ تا "۳۲ '۴۶ °۳۵ شمالی گسترش یافته است. محدوده ارتفاعی حوزه از حدود۸۰۰ متر در پایین‌دست تا ۴۹۰۰ متر در ارتفاعات البرز مرکزی متغیر است. میانگین بارندگی سالانه در این حوزه حدود ۶۲۵ میلی‌متر گزارش شده است که عمدتاً به صورت برف در ارتفاعات و باران در مناطق پست فرو می‌ریزد (BorjiHassangavyar *et al.*, 2023). از نظر اقلیمی، حوزه آبخیز کرج در پهنه‌ای با شرایط نیمه‌مرطوب تا نیمه‌خشک قرار دارد؛ به‌طوری که مناطق مرتفع شمالی دارای اقلیم سرد کوهستانی و بخش‌های جنوبی آن از اقلیم نسبتاً خشک برخوردار هستند (Masoodiyan, 2003). میانگین دمای سالانه در محدوده مورد مطالعه بین ۸ تا ۲۱ درجه سلسیوس در نوسان است. حوزه آبخیز کرج در بخش‌های شهری و روستایی پیرامون شهر کرج واقع شده و به دلیل نزدیکی به مراکز جمعیتی، توسعه سریع شهرنشینی و استقرار فعالیت‌های خدماتی و صنعتی، تحت فشارهای متعددی از نظر بهره‌برداری و کیفیت منابع آب قرار دارد. مساحت کل حوزه حدود ۱۰۰۰ کیلومترمربع برآورد شده است. منابع آب مورد بررسی در این مطالعه عمدتاً چاه‌های تأمین آب هستند که در محدوده امور فردیس پراکنده‌اند و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب منطقه نقش دارند (Aghamirzadeh *et al.*, 2022).

روش تحقیق

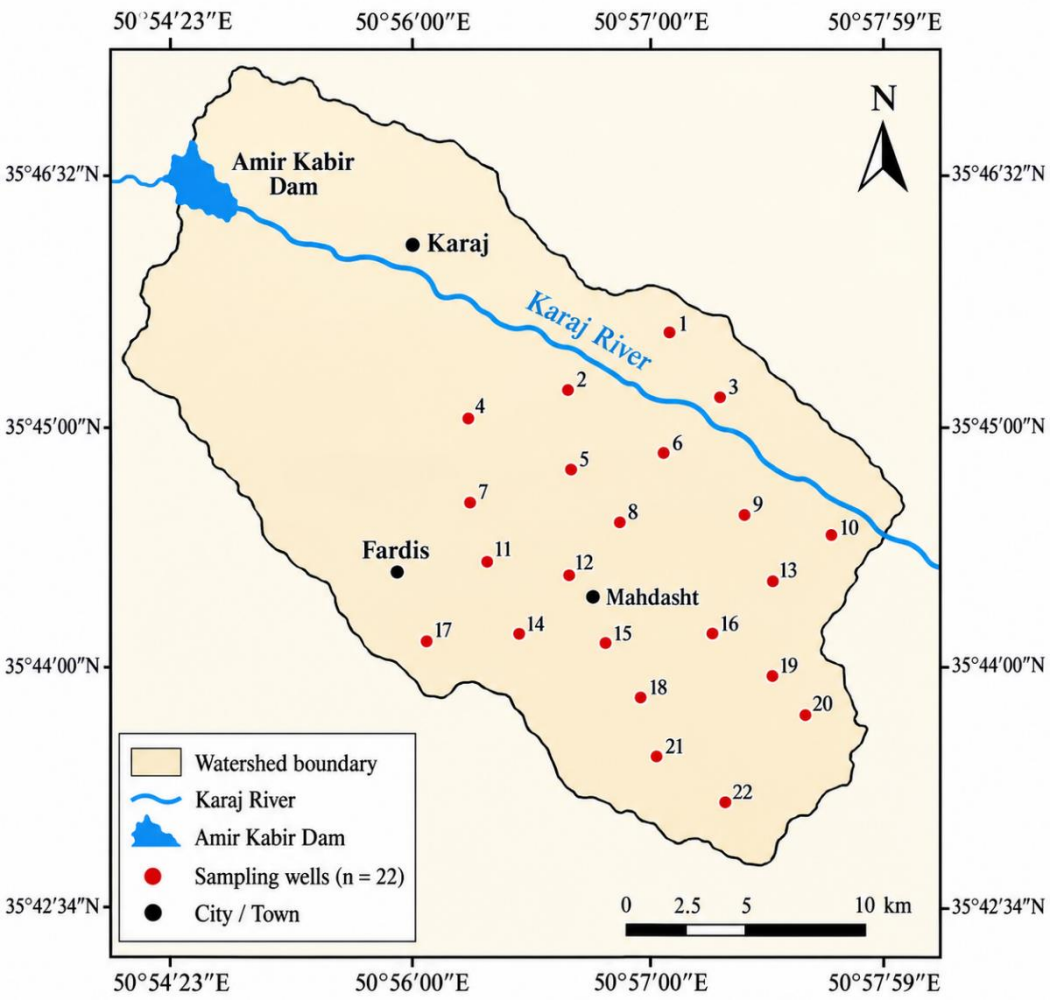
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، حاصل پایش‌های دوره‌ای شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز است که از ۲۲ حلقه چاه تأمین آب در محدوده امور فردیس در دو فصل تر و خشک (فروردین و مهر ۱۴۰۲) جمع‌آوری شده است. بدین ترتیب امکان مقایسه تغییرات فصلی فراهم گردید. موقعیت مکانی چاه‌ها به‌صورت دقیق ثبت شده است و این اطلاعات در مرحله تحلیل‌های مکانی و تهیه نقشه‌های توزیع فضایی فلزات سنگین در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفت.

به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های پایش، پراکنش نقاط نمونه‌برداری کاملاً یکنواخت نمی‌باشد. با

[۷] IDW

[۸] Baseline

این وجود، ایستگاه‌های موجود نماینده شرایط غالب کاربری زمین در محدوده امور فردیس هستند و امکان ارزیابی واقع‌بینانه از وضعیت منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نمایش داده شده است. از نظر اقلیمی، منطقه مورد مطالعه در پهنه‌ای با شرایط نسبتاً خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد که نوسانات بارندگی و تفاوت محسوس بین فصل‌های تر و خشک می‌تواند بر سطح ایستابی، میزان تغذیه آبخوان و همچنین غلظت املاح و عناصر در آب زیرزمینی اثرگذار باشد. علاوه بر عوامل طبیعی، فشارهای انسانی ناشی از توسعه سکونتگاه‌ها، فعالیت‌های صنعتی و خدماتی، تردد و حمل‌ونقل شهری، و همچنین ورود احتمالی پساب‌های شهری و رواناب‌های سطحی می‌توانند به عنوان منابع بالقوه ورود فلزات سنگین به منابع آب زیرزمینی مطرح شوند. با توجه به نقش کلیدی چاه‌های تأمین آب در تأمین آب شرب و مصارف شهری محدوده فردیس، ارزیابی غلظت فلزات سنگین و تحلیل شاخص‌های مدیریتی در این منطقه می‌تواند اطلاعات پایه و کاربردی برای برنامه‌ریزی‌های پایش دوره‌ای، مدیریت کیفیت منابع آب و کاهش ریسک‌های بالقوه محیط‌زیستی و بهداشتی فراهم کند.



شکل ۱ – موقعیت منطقه مورد مطالعه (دشت تهران–کرج)

Figure 1 – Geographic location of the study area (Tehran–Karaj Plain)

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز دریافت شده است. مجموعه داده شامل ۲۲ نمونه از ۲۲ منبع و کُد یکتای بهره‌برداری (MIS) است که در بازه زمانی

۱۴۰۱/۰۸/۲۸ تا ۱۴۰۴/۰۱/۳۱ برداشت و آزمون شده‌اند. در مجموع ۲۴ نمونه آب در دو دوره زمانی برداشت شد؛ به‌طوری‌که ۱۲ نمونه در فصل‌تر (اوایل فصل بهار، ماه فروردین) و ۱۲ نمونه در فصل خشک (اوایل فصل پاییز، ماه مهر) جمع‌آوری و آنالیز گردید. از نظر کاربری محل، ۱۵ نمونه شهری و ۷ نمونه روستایی گزارش شده است. برای هر نمونه، مختصات طول و عرض جغرافیایی، تاریخ آزمون، و نتایج سنجش فلزات و ریزآلایش‌ها ثبت شده است. فلزات و عناصر اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از آرسنیک، کروم‌کل، کادمیوم، مس، سرب، نیکل، روی، آهن و منگنز که غلظت کلیه فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش بر حسب میکروگرم بر لیتر (µg/L) گزارش شده است تا امکان مقایسه مستقیم با حدود مجاز استانداردهای ملی (ISIRI 1053) و بین‌المللی WHO فراهم گردد.

در این مجموعه، مقادیر آهن برای اغلب نمونه‌ها ثبت نشده و در تحلیل‌های شاخصی لحاظ نشده است. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات، از دستگاه ICP-MS استفاده شده است. نمونه‌ها پس از برداشت، در ظروف پلی‌اتیلنی از پیش اسیدشویی شده نگهداری و به منظور حذف ذرات معلق، از فیلتر غشایی عبور داده شدند. باتکیه‌بر پروتکل‌های آزمایشگاهی آبفا و استانداردهای مرجع آزمون آب، فرایند کنترل کیفیت به‌صورت زیر در نظر گرفته شد(Al-Hakkani, 2019):

۱) استفاده از محلول‌های استاندارد گواهی‌شده برای سامانکاری[9] دستگاه؛
۲) اجرای شاهد واقعی و میانی در هر شیفت؛
۳) اندازه‌گیری نمونه تکراری[10] برای حداقل ۱۰ درصد نمونه‌ها؛
۴) پایش خطی‌بودن منحنی سامانکاری ($R^2 \geq 0.995$)؛
۵) گزارش و حذف مقادیر خارج از محدوده تشخیصی دستگاه (LOD/LOQ) یا جای‌گذاری آن‌ها بر مبنای روال‌های پذیرفته (مثلاً LOQ/√2) در تحلیل‌های آماری، در صورت نیاز.

استانداردهای مرجع و حدود مجاز

برای قضاوت مدیریتی درباره کیفیت، غلظت فلزات با راهنمای سازمان بهداشت جهانی[11] و استاندارد ملی آب شرب ایران (استاندارد ۱۰۵۳ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران) مقایسه می‌شود. به‌منظور تبدیل داده‌های تک پارامتری به ارزیابی مدیریتی - ترکیبی، از شاخص‌های رایج کیفیت آلودگی فلزات استفاده شد:

۱) شاخص آلودگی تک‌عاملی (Single-Factor PI)

شاخص آلودگی تک‌عاملی (PI) برای هر فلز مطابق رابطه (۱) از نسبت غلظت اندازه‌گیری‌شده به حد مجاز استاندارد محاسبه شد:

$$\frac{C_i}{S_i} = PI_i \qquad (۱)$$

که در رابطه ۱ C_i غلظت اندازه‌گیری‌شده و S_i حد راهنمای استاندارد (WHO) است. برای ارزیابی کلی، از آمارهایی مانند PI_{max} (بدترین حالت)، $\bar{PI}$ (میانگین شاخص‌ها) یا توزیع فراوانی PI استفاده می‌شود.

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)

شاخص HPI معیاری جامع برای تعیین میزان تأثیر همزمان چند فلز سنگین بر کیفیت محیط مورد مطالعه بوده و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده آلودگی شدیدتر است. این شاخص با در نظر گرفتن غلظت اندازه‌گیری‌شده هر فلز، حداکثر مجاز آن (Standard) و وزن سمیت (Wi) مرتبط با هر عنصر، یک عدد واحد ارائه می‌دهد که امکان مقایسه کمی بین ایستگاه‌های مختلف را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، HPI نه‌تنها

[9] calibtation
[10] Duplicate
[11] WHO

شدت آلودگی بلکه سهم هر فلز را در آلودگی کل منعکس می‌سازد و مقادیر کمتر از ۱۰۰ بیانگر آلودگی قابل قبول و مقادیر بالاتر از ۱۰۰ نشان‌دهنده آلودگی بحرانی است (Mohan *et al*., 1996).

برای محاسبه شاخص کیفیت هر فلز (Q_i) در شاخص HPI، از رابطه (۲) استفاده شد و همچنین پس از محاسبه شاخص کیفیت هر عنصر، مقدار شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) بر اساس میانگین وزنی شاخص‌های کیفیت مطابق رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$\frac{M_i - I_i}{S_i - I_i} = Q_i \qquad (۲)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i Q}{\sum_{i=1}^{n} W_i} = HPI \qquad (۳)$$

که در آن M_i غلظت مشاهده‌شده، S_i حد استاندارد و I_i مقدار ایده‌آل (معمولاً صفر برای اغلب فلزات) است. وزن‌ها W_i بر پایه اهمیت نسبی یا رویکرد وزن‌دهی برابر تعیین می‌شوند (با گزارش شفاف روش وزن‌دهی).

درجه آلودگی(Cd Index)

شاخص درجه آلودگی (Cd) برخلاف HPI که جنبه وزنی دارد، بر پایه جمع ساده نسبت غلظت هر فلز به مقدار مجاز یا زمینه آن بنا شده و برای شناسایی نواحی با آلودگی بحرانی به کار می‌رود. در این روش ابتدا برای هر فلز، فاکتور آلودگی (Cf) محاسبه شده و سپس مجموع این فاکتورها، شاخص نهایی Cd را به دست می‌دهد. بر اساس طبقه‌بندی رایج، مقادیر Cd کمتر از ۱/۵ نشان‌دهنده آلودگی خیلی کم، ۱/۵ تا ۲ آلودگی کم، ۲ تا ۴ آلودگی متوسط، ۴ تا ۸ آلودگی زیاد و بیشتر از ۸ نشان‌دهنده آلودگی بسیار زیاد است. (Hakanson, 1980)

در مرحله نخست، فاکتور آلودگی هر فلز (C_f^i) مطابق رابطه (۴) محاسبه شد و سپس با جمع فاکتورهای آلودگی تمامی عناصر، مقدار شاخص درجه آلودگی (CD) مطابق رابطه (۵) به‌دست آمد:

برای مقادیر $S_i < C_i$

$$C_f^i \sum_{i=1}^{n} = CD \qquad (۴)$$

$$1 - \frac{C_i}{S_i} = C_f^i \qquad (۵)$$

این شاخص، میزان مازاد غلظت فلزات سنگین نسبت به حدود استاندارد را به‌صورت تجمیعی نشان می‌دهد و برای اولویت‌بندی نقاط بحرانی آلودگی مناسب است.

پردازش داده‌ها و تحلیل آماری

پیش‌پردازش شامل پالایش مقادیر صفر، یکسان‌سازی واحدها و محاسبه شاخص‌ها بود. آمار توصیفی (میانگین، میانه، انحراف معیار و دامنه) برای هر عنصر استخراج شد. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون Shapiro-Wilk استفاده گردید. نتایج آزمون نشان داد که داده‌های آرسنیک (p=0.083)، کروم (p=0.112) و نیکل (p=0.067) در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای توزیع نرمال هستند (p>0.05)؛ بنابراین نیازی به تبدیل لگاریتمی داده‌ها نبود. اختلافات بین نمونه‌های شهری و روستایی با استفاده از آزمون t-test (به دلیل نرمال بودن داده‌ها) بررسی شد. تمام محاسبات عددی اولیه در نرم‌افزارهای Excel و Python انجام گردید.

تحلیل مکانی

به منظور نمایش الگوهای فضایی غلظت فلزات سنگین آرسنیک، کروم و نیکل و شاخص‌های آلودگی (PI~max~ HPI)، از روش‌های درون‌یابی در محیط ArcGIS استفاده گردید. ابتدا واریوگرافی تجربی برای هر سه فلز محاسبه شد. مدل‌های نظری کروی[۱۲]، نمایی[۱۳] و گوسی[۱۴] بر داده‌ها برازش یافتند و بر اساس کمترین مقدار RSS[۱۵] و بالاترین R^2، مدل کروی به عنوان مدل برتر انتخاب گردید. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه (Nugget/Sill) برابر ۰/۲۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده همبستگی فضایی قوی در دامنه تقریبی

[12] Spherical
[13] Exponential
[14] Gaussian
[15] Residual Sum of Squares

۳۸۵۰ متر می‌باشد. سپس سه روش درون‌یابی IDW با توان‌های ۱، ۲ و ۳، کریجینگ معمولی[16] و کریجینگ ساده[17] با یکدیگر مقایسه شدند. ارزیابی دقت با استفاده از اعتبارسنجی متقابل[18] انجام گرفت. معیارهای ارزیابی شامل ریشه میانگین مجذور مربعات خطا[19]، میانگین خطای مطلق[20]، ضریب تعیین[21] و میانگین خطای اریبی[22] محاسبه گردید. نتایج اعتبارسنجی متقابل در جدول ۱ ارائه شده است. روش IDW با توان ۲ با کمترین مقدار RMSE (۰/۳۹ میکروگرم بر لیتر)، کمترین MAE (۰/۳۰ میکروگرم بر لیتر) و بالاترین R^2 (۰/۸۵) نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری داشت. همچنین مقدار MBE نزدیک به صفر (۰/۰۱- میکروگرم بر لیتر) نشان‌دهنده عدم وجود اریبی Systematic در تخمین‌ها است. بر این اساس و با توجه به سادگی محاسباتی IDW در مقایسه با کریجینگ، روش IDW با توان ۲ برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی انتخاب گردید.

جدول ۱- ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی برای فلز آرسنیک با اعتبارسنجی متقابل

Table 1- Accuracy assessment of interpolation methods for Arsenic using cross-validation

روش درون‌یابی	MBE (µg/L)	R^2	MAE (µg/L)	RMSE (µg/L)
IDW (Power=1)	-0.03	0.74	0.41	0.52
IDW (Power=2)	**-0.01**	**0.85**	**0.30**	**0.39**
IDW (Power=3)	-0.02	0.79	0.37	0.46
کریجینگ معمولی - مدل کروی	-0/04	0/82	0/34	0/44
کریجینگ ساده - مدل کروی	0/03	0/8	0/36	0/47

مقایسه و داوری مدیریتی

نتایج شاخص‌ها و نقشه‌های خطر به‌صورت دوگانه گزارش می‌شوند:

۱) در سطح هر نقطه نمونه‌برداری شده برای شناسایی نقاط بحرانی؛

۲) در سطح خُردحوضه/محدوده خدماتی برای توصیه‌های مدیریتی.

آستانه‌های تصمیم‌گیری (مثلاً $HPI>100$، $PI_{max}>1$ یا $Cd>0$) برای علامت‌گذاری وضعیت‌های نیازمند مداخله استفاده می‌شود، سپس پیامدهای مدیریتی (پایش افزوده، مدیریت پساب، بهسازی سامانه‌های تصفیه، مدیریت بهره‌برداری) تدوین می‌گردد.

بحث

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل آماری و شاخصیِ داده‌های ۲۲ نمونه چاه‌های آب در محدوده امور فردیس (مشکین‌دشت) نشان داد که وضعیت فلزات سنگین در منابع آب سطحی بهره‌برداری‌شده به‌طورکلی مطلوب است و از حدود راهنمای WHO و استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳) تجاوزی مشاهده نشد. میانگین و بیشینه عناصر کلیدی به‌صورت زیر گزارش شد: آرسنیک با میانگین ۱/۳۹ و بیشینه ۲/۲ میکروگرم بر لیتر (µg/L)، نیکل با میانگین ۷/۴۸ و بیشینه ۲۷/۳ µg/L حد مجاز ۷۰، کروم کل با میانگین ۶/۸۹ و بیشینه ۱۶/۱ µg/L حد مجاز ۵۰، روی با میانگین ۳/۴۸ و بیشینه ۸/۸۴ µg/L حد مجاز ۳۰۰۰ و منگنز با میانگین ۰/۱۰ و بیشینه ۱ µg/L حد مجاز ۴۰۰. مقادیر مس در همه نمونه‌ها بسیار پایین (میانگین ۰/۱۶، بیشینه ۲ µg/L در برابر حد مجاز ۲۰۰۰) و مقادیر سرب و کادمیوم در این مجموعه صفر گزارش شده‌اند. این الگوی کمّی، در کنار فقدان هرگونه رخداد

[16] Ordinary Kriging
[17] Simple Kriging
[18] Leave-One-Out Cross-Validation)
[19] RMSE
[20] MAE
[21] R^2
[22] MBE

تجاوز از استاندارد برای تمام پارامترها، دلالت بر خطر پایینِ آلودگی فلزات سنگین در مقطع زمانی نمونه‌برداری دارد. برای بررسی وضعیت فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی منطقه، پارامترهای آماری اصلی شامل حداقل، حداکثر، میانگین، میانه و انحراف معیار برای هر عنصر به دست آمد. نتایج این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین حدود مجاز سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2022) و استاندارد ملی ایران (ISIRI 1053) جهت مقایسه آورده شده‌اند.

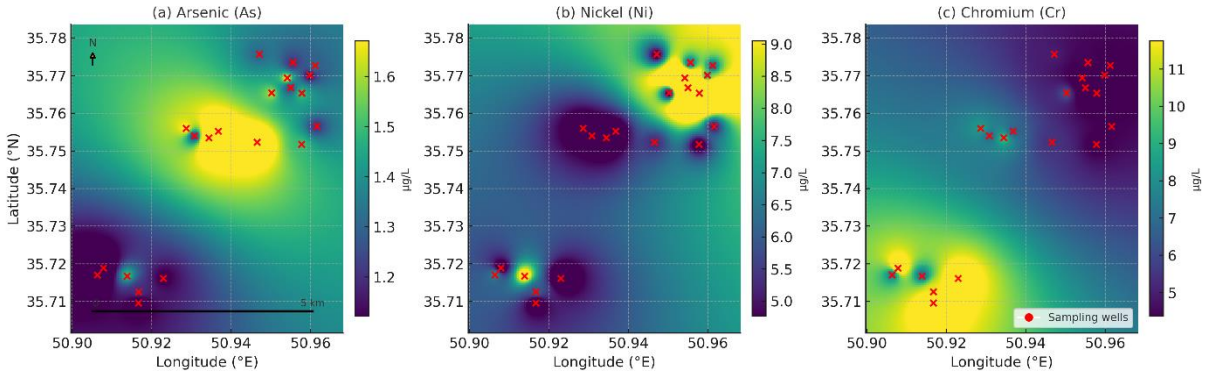
جدول ۲- شاخص‌های آماری غلظت فلزات سنگین بر حسب میکروگرم بر لیتر (µg/L) در نمونه‌های آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج و مقایسه با حدود مجاز ملی و بین‌المللی

Table 2- Statistical parameters of heavy metal concentrations (µg/L) in groundwater samples of the Karaj watershed and comparison with national and international standards

ISIRI limit	WHO limit	Std. Dev	Median	Mean	Max	Min	Metal
10	10	0.47	1.3	1.39	2.2	0.2	As
50	50	3.15	6.2	6.89	16.1	2.1	Cr
3	3	0	0	0	0	0	Cd
2000	2000	0.37	0	0.16	2	0	Cu
10	10	0	0	0	0	0	Pb
70	70	5.02	6.9	7.48	27.3	2.2	Ni
3000	3000	7.61	2.1	3.48	84.8	0.3	Zn
400	400	0.27	0	0.10	1	0	Mn
300	300	0.06	0.05	0.07	0.2	0	Fe

همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت تمام فلزات اندازه‌گیری‌شده کمتر از حدود مجاز استانداردهای ملی و جهانی است. بیشترین مقادیر مربوط به نیکل و کروم بوده که در هیچ نمونه‌ای از حد مجاز فراتر نرفته‌اند. در مقابل، سرب و کادمیوم در تمامی نمونه‌ها کمتر از حد تشخیص گزارش شده‌اند.

از منظر شاخص‌های تجمیعی، مقدار HPI با وزن‌دهی برابر و $I_i = 0$ در دامنه ۳/۱۰ تا ۶/۴۹ با میانگین ۴/۲۸ برآورد شد؛ که فاصله معنی‌دار با آستانه‌های هشدار مدیریتیِ رایج (مثلاً $HPI \approx 100$) دارد و در طبقه خطر پایین قرار می‌گیرد. شاخص PI_{max}(بدترین نسبت S_i و C_i در هر نمونه) نیز در بازه ۰/۱۱ تا ۰/۳۹ قرار گرفت و هرگز به ۱ نزدیک نشد؛ بدین معنی که حتی بیشترین نسبت مشاهده‌شده هم کمتر از ۴۰ درصد حد مجاز بوده است. همچنین شاخص CD (درجه آلودگی به‌معنای مجموع مازادها) برای همه نمونه‌ها صفر به دست آمد، زیرا هیچ پارامتری از حد استاندارد فراتر نرفت. این هم‌گراییِ سه شاخص < 1، پایین HPI و PI_{max}=0 تصویری سازگار و اطمینان‌بخش از کیفیت مطلوب آب از نظر غلظت فلزات سنگین ترسیم می‌کند. به‌منظور نمایش الگوی مکانی غلظت فلزات، از روش IDW در محیط GIS استفاده شد. نقشه‌های حاصل برای سه فلز شاخص آرسنیک، نیکل و کروم در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲- نقشه‌های توزیع مکانی فلزات سنگین منتخب (آرسنیک، نیکل و کروم) در آب‌های زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Figure 2- Spatial distribution maps of selected heavy metals (As, Ni, and Cr) in groundwater of the Karaj Watershe

الگوهای مکانی حاکی از پراکنش نسبتاً یکنواخت فلزات در سطح حوزه آبخیز است و در کلیه نقاط نمونه‌برداری، غلظت تمام فلزات کمتر از حدود مجاز استاندارد می‌باشد. مقادیر برآوردشده در نقشه‌های درون‌یابی نیز (با احتیاط در مورد نواحی فاقد داده) از حد مجاز پایین‌تر هستند. این موضوع با نتایج آماری جدول ۲ نیز هم‌خوانی دارد و حاکی از خطر پایین آلودگی فلزات سنگین در زمان پایش است. برای ارزیابی وضعیت کلی آلودگی، شاخص‌های مختلف شامل شاخص آلودگی منفرد (PI)، شاخص کلی آلودگی فلزات سنگین (HPI) و شاخص درجه آلودگی (Cd) محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ آمده است.

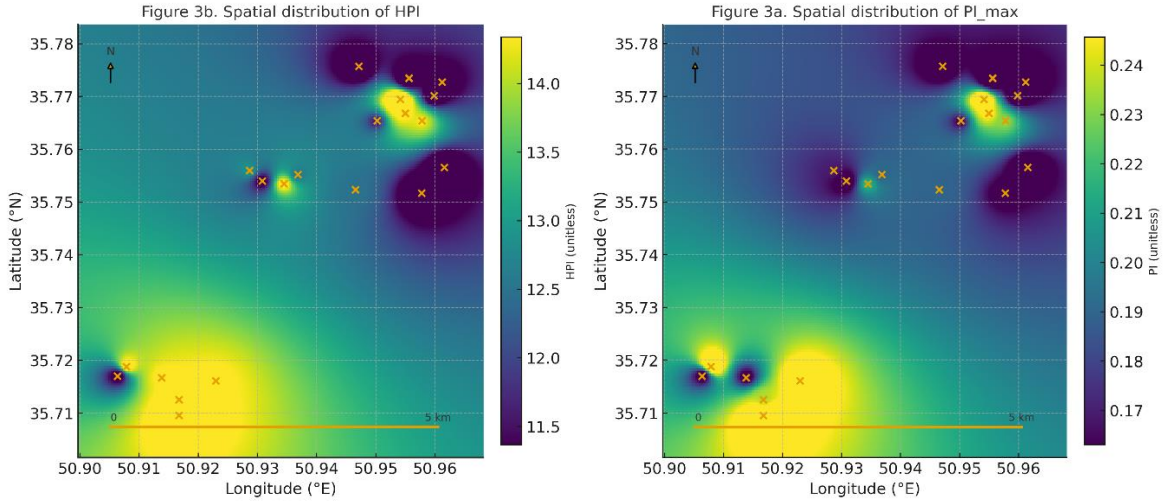
جدول ۳- مقادیر محاسبه‌شده شاخص‌های آلودگی (PI، HPI و Cd) در نمونه‌های آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Table 3- Calculated pollution indices (PI, HPI, and Cd) in groundwater samples of the Karaj Watershed

Cd	PImax	HPI	Sample Code
0	0.39	4.28	S1
0	0.35	3.85	S2
0	0.31	4.12	S3
0	0.29	4.45	S4
0	0.28	4.08	S5
0	0.27	4.36	S6
0	0.32	4.28	Mean

مقادیر شاخص‌های HPI و PI در تمام نمونه‌ها کمتر از ۱۰۰ و ۱ بوده و شاخص Cd نیز در تمام نقاط صفر به دست آمد که نشان‌دهنده عدم وجود آلودگی قابل‌ملاحظه در آب زیرزمینی منطقه است. مقدار میانگین HPI برابر ۴/۲۸ به دست آمد که مطابق طبقه‌بندی استاندارد، در محدوده پاک قرار می‌گیرد. باوجود این سطح کلیِ مطلوب، تحلیل حساسیتِ محرک‌های محلی نشان داد که در اغلب نمونه‌ها نیکل عاملِ غالب در تعیین PI_{max} بوده و در تعداد معدودی نمونه آرسنیک نقشِ محرکِ اصلی را ایفا کرده است. این نکته از منظر مدیریتی مهم است؛ زیرا در شرایط تغییرات هیدرولوژیکی (افزایش برداشت، افت سطح آب، تغییر مسیرهای جریان یا رخدادهای بارشی شدید که می‌تواند الگوهای انتقال را دگرگون کند)، نیکل و آرسنیک محتمل‌ترین نامزدها برای نزدیک‌شدن به حدود هشدار خواهند بود. از طرف دیگر، مقادیر بسیار پایین سرب و کادمیوم (صفر در این مجموعه) می‌تواند بازتاب پایش مؤثر منابع نقطه‌ای مرتبط یا شرایط زمین‌شیمیایی محلی باشد که تحرک‌پذیری آن‌ها را محدود می‌کند. مقدار پایین منگنز و آهن (دومی در بسیاری از ردیف‌ها ناموجود) نیز نشان می‌دهد دست‌کم در زمان نمونه‌برداری، شرایط کاهنده قوی یا حل‌شدگی ناشی از کانی‌زایی آهن و منگنز، مسئله‌ساز نبوده است. به‌منظور ارزیابی الگوهای مکانی شاخص‌های آلودگی، مقادیر PI_{max} و HPI برای هر ایستگاه محاسبه و با

استفاده از روش IDW در محیط GIS ترسیم شد و در شکل ۳ نمایش داده شده است. نقشه‌های حاصل نشان می‌دهند که مقدار PI_{max} در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها به آستانه بحرانی ۱ نزدیک نشده و شاخص HPI نیز در تمامی نقاط محدوده مطالعه در بازه‌ای پایین‌تر از مقدار بحرانی ۱۰۰ قرار دارد. این موضوع دلالت بر نبود آلودگی معنی‌دار فلزات سنگین در زمان پایش دارد و با نتایج عددی جدول ۳ مطابقت کامل دارد. ازآنجاکه شاخص‌های PI و HPI از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای کمی برای ارزیابی وضعیت کیفی منابع آب از نظر فلزات سنگین محسوب می‌شوند، تحلیل مکانی آن‌ها در محیط GIS می‌تواند به درک بهتر از پراکنش آلاینده‌ها و شناسایی نواحی بالقوه حساس کمک کند (Li & Heap, 2014). روش IDW با فرض کاهش شدت آلودگی متناسب با افزایش فاصله از منبع آلاینده، یکی از متداول‌ترین روش‌های درون‌یابی در مطالعات آلودگی آب‌وخاک است که دقت بالایی در مقیاس‌های محلی دارد (Sanad *et al.*, 2024). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب شاخص‌های کمی آلودگی فلزات با روش‌های مکانی در GIS می‌تواند به طور مؤثر الگوهای فضایی آلودگی را آشکار سازد و در طراحی راهکارهای پایش و مدیریت پایدار منابع آب نقش مهمی ایفا کند (Alzahrani *et al.*, 2024)؛ بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن تأیید پایین‌بودن سطح آلودگی فلزات سنگین در حوزه آبخیز کرج، بر ضرورت تداوم پایش مکانی این شاخص‌ها برای پیشگیری از تغییرات احتمالی ناشی از توسعه فعالیت‌های کشاورزی و شهری تأکید دارد.



شکل ۳- نقشه‌های مکانی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی حوزه آبخیز کرج: (الف) PI_{max} و (ب) HPI

Figure 3- Spatial distribution maps of heavy metal pollution indices in groundwater of the Karaj Watershed: (a) PI_{max} , (b) HPI

از دیدگاه فرایندی، پایینیِ نسبت‌های S_i و C_i برای همه عناصر نشان می‌دهد انتقال سطحی و نفوذیِ آلاینده‌ها دست‌کم در موقعیت و بازه زمانیِ این پایش در سطح پس‌زمینه قرار داشته است. باتوجه‌به اینکه نقاط نمونه‌برداری، چاه‌های بهره‌برداری هستند، کیفیت مشاهده‌شده علاوه بر منابع آلودگی، تحت‌تأثیر جریان‌های زیرسطحی، ویژگی‌های زمین‌شناسی رسوبی، تبادل آب سنگ، و زمان ماند نیز قرار می‌گیرد؛ عواملی که می‌توانند موجب رقیق‌سازی[۲۳] یا بازدارندگی مهاجرت فلزات شوند. در چنین بستری، پایداری کیفی

[23] Dilution

فعلی نباید به‌عنوان تضمین قطعی در همه فصول سال‌ها تلقی شود؛ زیرا تغییرات فصلی (بارش، رواناب، نفوذ)، عملیات بهره‌برداری (پمپاژ و افت سطح)، و ورودهای جدید نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای می‌تواند الگوی ریسک را جابجا کند(Ha *et al.*, 2021).

همچنین پویایی بلندمدت کیفیت آب‌های زیرزمینی تابعی از برهم‌کنش میان عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و انسانی است. تغییرات اقلیمی و افزایش نوسانات بارش می‌تواند منجر به جابه‌جایی فلزات در ستون خاک و تغییر مسیر جریان‌های زیرسطحی شود (Wu *et al.*, 2022) در کنار این، بهره‌برداری مفرط از منابع آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی، احتمال ورود آلاینده‌ها از لایه‌های سطحی به سفره را افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، استمرار پایش کمی و کیفی همراه با تحلیل‌های زمانی ضروری است تا رفتار بلندمدت فلزات سنگین در سیستم آبخیز به‌درستی شناسایی و مدیریت شود.

بررسی همبستگی بین فلزات سنگین می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص منشأ آلودگی‌ها ارائه دهد. در جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون بین فلزات مختلف آورده شده است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون بین فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج

Table 4- Pearson correlation coefficients among heavy metals measured in groundwater sources of the Karaj Watershed

Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Cr	As	
0.05	0.15	0.23	0.10	0.56	0.42	1.00	**As**
0.09	0.19	0.31	0.12	0.61	1.00	0.42	**Cr**
0.13	0.21	0.38	0.18	1.00	0.61	0.56	**Ni**
0.08	0.03	0.05	1.00	0.18	0.12	0.10	**Cu**
0.11	0.25	1.00	0.05	0.38	0.31	0.23	**Zn**
0.32	1.00	0.25	0.03	0.21	0.19	0.15	**Mn**
1.00	0.32	0.11	0.08	0.13	0.09	0.05	**Fe**

نتایج نشان می‌دهد که بین عناصر نیکل و کروم (r = 0.61) همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد که احتمال منشأ زمین‌شناختی مشترک یا فرآیندهای انحلال مشابه را تقویت می‌کند. سایر همبستگی‌ها در حد ضعیف تا متوسط بوده و نشان‌دهنده تنوع منابع احتمالی فلزات است.

پیامد مدیریتی نتایج حاضر برای مدیریت پایدار منابع آب در حوزه آبخیز کرج را می‌توان در سه محور جمع‌بندی کرد:

۱) تداوم پایش هدفمند با تمرکز بر نیکل و آرسنیک: باتوجه‌به نقش این دو در تعیین PI_{max}، پیشنهاد می‌شود بسامد پایش و حد تشخیص گزارش‌ها برای آن‌ها بازنگری و در صورت امکان کاهش داده شود تا تغییرات ظریف قابل کشف باشد.

۲) یکپارچه‌سازی پایش کیفی آب، خاک، پساب: اگرچه غلظت‌های کنونی پایین است، اتصال داده‌های آب با پروفیل‌های خاک و رسوبات ریزدانه (به‌عنوان مخازن بالقوه فلزات) و پساب‌های شهری و صنعتی می‌تواند منشأیابی را دقیق‌تر کند و احتمال خیزش‌های موضعی را به‌موقع آشکار سازد.

۳) رویکرد پیشگیرانه در سطح حوزه آبخیز: حفظ وضعیت موجود نیازمند اقداماتی با هزینه فایده مناسب است: بهبود نگهداشت شبکه جمع‌آوری و دفع پساب، حوضچه‌های ته‌نشینی در خروجی زیرحوضه‌های حساس، مدیریت رواناب‌های نخستین‌بارش[۲۴] و تدوین پروتکل‌های پایش فصلی در دوره‌های تر و خشک.

[24] First flush

باتوجه‌به مجموع شواهد، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که کیفیت فلزات سنگین در محدوده مورد مطالعه، در زمان پایش، در سطح مطمئن قرار دارد؛ بااین‌حال، با درنظرگرفتن پویایی آب‌شناختی[۲۵] و فشارهای شهری و صنعتی در حوزه آبخیز کرج، اتخاذ راهبرد پایش تقویت‌شده و پیشگیرانه برای نیکل و آرسنیک، و پیگیری منشأیابی یکپارچه، شرط لازم برای پایداری کیفی بلندمدت و کاهش ریسک‌های بالقوه است.

کمبود داده آهن و به‌طورکلی تک فصلی و غیرپیوسته بودن سری زمانی، امکان تحلیل روندهای زمانی را محدود می‌کند. رفع این محدودیت‌ها باعث تقویت اعتبار استنباط‌ها و ارتقای قدرت تصمیم‌سازی مدیریتی خواهد شد همچنین به دلیل محدودیت داده‌ها، تحلیل فصلی انجام نشد و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، نمونه‌برداری فصلی انجام گیرد تا نوسانات زمانی بررسی شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش که با هدف تحلیل مکانی و ارزیابی محیط‌زیستی فلزات سنگین در منابع آب سطحی حوزه آبخیز کرج و با رویکرد مدیریت پایدار منابع آب انجام شد، تأیید می‌کند که استفاده از شاخص‌های مکانی در تصمیم‌سازی مدیریتی، ابزار مؤثری برای پایش پایدار منابع آب است (Murariu et al., 2025) و همچنین نشان می‌دهد کیفیت آب از نظر عناصر فلزی در وضعیت مطلوب قرار دارد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای تمامی فلزات ازجمله آرسنیک، نیکل، کروم، مس، روی، منگنز، سرب الگوی ریسک و کادمیوم کمتر از حدود مجاز استانداردهای ملی (استاندارد ۱۰۵۳ ایران) و بین‌المللی (WHO) بوده و هیچ نمونه‌ای تجاوز از حد مجاز را نشان نداد. مقدار میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI=4.28) و شاخص آلودگی تک‌عاملی (PI<1) نیز حاکی از سطح آلودگی بسیار پایین و قابل‌قبول در تمامی نقاط موردبررسی است.

بررسی الگوی مکانی آلودگی‌ها نشان داد که نیکل و آرسنیک بیشترین سهم را در مقدار شاخص PI_{max} داشتند؛ هرچند غلظت آن‌ها همچنان پایین‌تر از حد استاندارد است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت پایش هدفمند این دو عنصر در آینده است، زیرا در شرایط تغییرات هیدرولوژیکی و افزایش فشارهای شهری و صنعتی می‌توانند به شاخص‌های حساس در کیفیت آب تبدیل شوند.

یافته‌های این مطالعه بیانگر آن است که اگرچه وضعیت کنونی فلزات سنگین در منابع آب حوزه آبخیز کرج رضایت‌بخش است، اما پایداری این شرایط نیازمند استمرار پایش منظم، شناسایی منابع بالقوهٔ آلودگی، و اجرای راهبردهای پیشگیرانه است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود اقدامات زیر در برنامه‌های مدیریتی حوزه آبخیز لحاظ گردد:

۱) تدوین و اجرای نظام پایش فصلی و بلندمدت با تمرکز بر عناصر نیکل و آرسنیک؛
۲) یکپارچه‌سازی پایش آب، خاک و پساب‌ها جهت شناسایی منشأهای نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای آلودگی؛
۳) مدیریت رواناب‌های سطحی از طریق احداث حوضچه‌های ته‌نشینی، مناطق بافر گیاهی و کنترل رواناب نخستین‌بارش؛
۴) بازنگری در پروتکل‌های آزمایشگاهی جهت ثبت حدود تشخیص (LOD/LOQ) و افزایش دقت سنجش در غلظت‌های پایین.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حوزه آبخیز کرج از منظر آلودگی فلزات سنگین در محدودهٔ ایمن قرار دارد؛ بااین‌حال، به دلیل توسعهٔ سریع شهری و تغییرات اقلیمی محتمل، اتخاذ رویکرد مدیریت جامع و پایدار منابع آب، با تأکید بر پیشگیری و پایش مستمر، برای حفظ سلامت اکوسیستم آبی و پایداری کیفیت منابع آب در بلندمدت ضروری است.

[25] Hhdrologic

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و سپاس خود را از شرکت آب‌وفاضلاب استان البرز و به‌ویژه آزمایشگاه کنترل کیفی آب‌وفاضلاب این شرکت به دلیل همکاری ارزشمند در تأمین داده‌های کیفی، انجام آزمون‌های فلزات سنگین و فراهم‌سازی بستر اجرای این پژوهش ابراز می‌دارند. بدون همراهی و حمایت فنی این مجموعه، انجام دقیق مراحل اندازه‌گیری و تحلیل داده‌ها میسر نمی‌بود.

References

Aghamirzadeh,S. , Ganjei zadeh Rouhani,F. , Saeediyan,H. & Ganjeizadeh,K. (2022). Investigation of Aluminum Element Changes in Surface and Groundwater of Sarcheshmeh Watershed in Kerman Province. *Integrated Watershed Management*, 2(1), 61-72. https://doi.org/10.22034/iwm.2022.551640.1026 (In Persian)

Al-Hakkani, M.F. (2019). Guideline of inductively coupled plasma mass spectrometry “ICP–MS”: fundamentals, practices, determination of the limits, quality control, and method validation parameters. *SN Applied Sciences*1, 791. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0825-5

Alzahrani, H., El-Sorogy, A. S., Okok, A., & Shokr, M. S. (2024). GIS- and Multivariate-Based Approaches for Assessing Potential Environmental Hazards in Some Areas of Southwestern Saudi Arabia. *Toxics*, 12(8), 569.https://doi.org/10.3390/toxics12080569

Aparisi-Navarro, S., Moncho-Santonja, M., Defez, B., Candeias, C., Rocha, F., & Peris-Fajarnés, G. (2025). Assessing heavy metal contamination in agricultural soils: a new GIS-based Probabilistic Pollution Index (PPI) – case study: Guarda Region, Portugal. *Annals of GIS*, 31(1), 143–162. https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2452256

Borji Hassangavyar, M. , Nazari Samani, A. A. , Feiznia, S. & Fathabadi, A. (2023). Investigating the Risk of Heavy Metal Contamination in Suspended Sediments and Surface Soil of Laniz Watershed, Karaj. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(12), 2937-2954. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351189.669395 (In Persian)

Crispin, A., & Parthasarathy, P. (2025). Understanding the Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Life in a Non-Perennial River Basin South India – A Multi-Index Geochemical Analysis . *Environmental Forensics*, 26(4), 529–544. https://doi.org/10.1080/15275922.2025.2459412

Eslami, H., Esmaeili, A., Razaeian, M., Salari, M., Nassab Hosseini, A., Mobini, M., & Barani, A. (2022). Potentially toxic metal concentration, spatial distribution, and health risk assessment in drinking groundwater resources of southeast Iran. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101276. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101276

Fazel Tavassol, S., Ashamanjari, K. G., & Dehghan, M. (2017). Assessment of heavy metal contamination of groundwater in Karaj Plain, Iran. *International Journal of Geology & Earth Science*, 3(3), 33–38.

Ghalandarzadeh, F. , Rezaei Tavabe, K. , Haji seyed Mohammad Shirazi, R. & Samadi Kuchaksaraei, B. (2020). An investigation on heavy metal (cadmium, chromium, zinc) concentration changes in water and sediment, and assessing the biological value index (Z) in Karaj River. *Journal of Fisheries*, 73(2), 199-212. https://doi.org/10.22059/jfisheries.2020.302397.1164 (In Persian)

Ha, K., Lee, E., An, H., Kim, S., Park, C., Kim, G.-B., & Ko, K.-S. (2021). Evaluation of Seasonal Groundwater Quality Changes Associated with Groundwater Pumping and Level Fluctuations in an Agricultural Area. *Korea. Water*, 13(1), 51. https://doi.org/10.3390/w13010051

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8), 975-1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8

Huang, S., Han, M., Chen, P., Feng, W., Li, G., Zhang, H., Peng, H., & Huang, T. (2024). Assessing health risks from bioaccessible PM2.5-bound toxic metals in Nanchang metro: Implications for metro workers and emissions control. Environmental research, 258, 119284.

https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119284

Li, J., & Heap, A. D. (2014). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia Record, 2014/05*, 1–137. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008

Masoodiyan, S. A. (2003). Investigation of Precipitation Geographical Dispersion In Iran through Rotated Factor Analysis. *Geography and Development*, 1(1), 79-87. https://doi.org/10.22111/gdij.2003.3642

Mohan, S. V., Nithila, P., & Reddy, S. J. (1996). Estimation of heavy metal in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science & Health*, Part A, 31 (2), 283-289. https://doi.org/10.1080/10934529609376357

Mousavipoor,F. , Kazemi,A. , Hadipour,M. & Hedayati Aghmashhadi,A. (2022). The Role of Pollutants on Health and the Environment with Emphasis on Social Resilience (A Study Based on Pollutants in Arak). *Integrated Watershed Management*, 2(2), 75-93. https://doi.org/10.22034/iwm.2022.552129.1027 (In Persian)

Murariu, G., Stanciu, S., Dinca, L., & Munteanu, D. (2025). GIS Applications in Monitoring and Managing Heavy Metal Contamination of Water Resources. *Applied Sciences*, 15(19), 10332. https://doi.org/10.3390/app151910332

Raeisi Dehkordi, M. R. & Yeganeh Mazhar, A. H. (2023). Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modeling (Case study: Damaneh-Daran Plain Aquifer). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 262-278. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11683.1155 (In Persian)

Raeisi dehkordi,M. R. , Yeganeh Mazhar,A. H. & Kheradzare,F. (2023). Investigating Effects of lateral Inflow Characteristics on Main flow using Numerical Modeling. *Integrated Watershed Management*, 3(1), 54-71. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.1990397.1064 (In Persian)

Sanad, H., Moussadek, R., Dakak, H., Zouahri, A., Oueld Lhaj, M., & Mouhir, L. (2024). Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater within an Agricultural Ecosystem Using GIS and Multivariate Statistical Analysis (MSA): A Case Study of the Mnasra Region, Gharb Plain, Morocco. *Water*, 16(17), 2417. https://doi.org/10.3390/w16172417.

Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Yadav, S., Pandey, S., Kumar, A., & Dhiman, N. (2024). Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*, 14(1), 7595. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3

Wu, Q., Cui, Y., Zhao, Y., & Li, W. (2022). Spatial–temporal variations and risk assessment of heavy metals in river water using GIS-based methods. *Environmental Pollution*, 295, 118683. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118683

Younesi Baneh, P., Ahmadi, B., Salehzadeh, H., Mohammadi, H., Shahmoradi, B., & Ghaderi, B. (2024). Assessment of heavy metal contamination in groundwater of rural areas of Kurdistan Province Iran: A comprehensive study. *Heliyon*, 10(21), e39833. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39833

Content

An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province)

Mohammad Jafar Zare, Ali Salajegheh, Sousan Salajegheh, Mohsen Kazemi

1-17

Level of Achievement of Ecosystem Conservation and Sustainable Use Indicators within the Framework of the Sustainable Development Goals in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran

Seyed Hamidreza Sadeghi, Mohaddeseh Alimohamadisani, Seyedeh Hajar Akbari, Fatemeh Niknam, Foruzan Jamgohari, Mitra Jalilian, Mohammadmehdi Malek, Reza Yaghoti, Marjan Bahlekeh and Reza Chamani

18-49

Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed

Mohsen Zabihi, Hamidreza Moradi, Abdulvahed Khaledi Darvishan, Mehdi Gholamalifard

50-72

Farmers' Adaptation to Climate Change in Iran: A Bibliometric Analysis Based on International Sources

Saeid Barkhori

73-94

Evaluation and comparison of XBeach, DBN and LightGBM models for predicting flood discharge (Case study: Taleghan Watershed)

Ramtin Tavoosi Rad , Sadaf Piri , Mohammad Ansari ghojghar

95-111

Analysis of Factors Affecting the Adaptation of Iranian Agricultural Communities to Natural Hazards (Theoretical Foundations, Applied Dimensions and Factor Analysis)

Ardeshir Mesbah, Ali Tohidloo, Esmail Karamidehkordi, Amin Salehpour jam, Tofigh Saadi

112-131

Climatology of the Major Drainage Basins of Iran

Sayyed Mohammad Hosseini

132-148

Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management

Mohamadreza Raeisi Dehkordi, Amir Hossein Yeganeh Mazhar

149-164

Integrated Watershed Management

Vol: 6, No: 3. Autumn 2026

Online ISSN **2783-4581**

Publisher **Ilam University** in association with **Iranian Rainwater Catchment Systems Association**

Director-in-Charge **Dr. Noredin Rostami**

Editor-in-Chief **Dr. Haji Karimi**

Editorial Board

Dr. Hosein Arzani (Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran)
Dr. Gholamreza Zehtabian (Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran)
Dr. Forood Sharifi (Professor, Research Group of Hydrology and Water Resources Development, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran)
Dr. Haji Karimi (Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran)
Dr. Hamid Reza Nassery (Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran)
Dr. Hassan Pourbabaei (Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran)
Dr. Mohsen Rezaei (Professor, Department of Geology, Shiraz University, Faculty of Sciences, Shiraz, Iran)
Dr. Zargham Mohammadi (Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran)
Dr. Hamid Reza Pourghasemi (Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran)
Dr. Abazar Esmali Ouri (Professor, Department of Range & Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran)
Dr. Mehdi Heydari (Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ilam, Ilam, Iran)
Dr. Mohsen Tavakoli (Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran)
Dr. Noredin Rostami (Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran)
Dr. Marzban Faramarzi (Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran)
Dr. Lahcen Benaabidate (Professor, University of Sidi Mohammed Ben Abdellah Faculty of Sciences and Techniques/ Environment Teaching and Research)
Dr. Pedro J.M. Costa (Assistant Professor, Departamento de Ciencias da Terra, Universidade de Coimbra, Portugal)

Manager **Dr. Mehdi Heydari**
Editor (English Version) **Dr. Noredin Rostami**
Editor (Persian Version) **Dr. Noredin Rostami; Dr. Reza Omidipour**
Cover and Page Designer **Dr. Reza Omidipour**
Executive Director **Maryam Rabbani**

Address: **Deputy of Research and Technology, Ilam University, Pajoohesh Bolvd, Ilam- Iran**

P.O. **Box: 69317-516**

Telefax: **0843222703**

Email: **iwm@ilam.ac.ir**

Web Site: **www.iwm.ilam.ac.ir**

Integrated Watershed Management

Ilam University

Vol: 6, No: 3. Autumn 2026

Online ISSN: 2783-4581

An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province) 1-17

Mohammad Jafar Zare, Ali Salajegheh, Sousan Salajegheh, Mohsen Kazemi

Level of Achievement of Ecosystem Conservation and Sustainable Use Indicators within the Framework of the Sustainable Development Goals in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran 18-49

Seyed Hamidreza Sadeghi, Mohaddeseh Alimohamadisani, Seyedeh Hajar Akbari, Fatemeh Niknam, Foruzan Jamgohari, Mitra Jalilian, Mohammadmehdi Malek, Reza Yaghoti, Marjan Bahlekeh and Reza Chamani

Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed 50-72

Mohsen Zabihi, Hamidreza Moradi, Abdulvahed Khaledi Darvishan, Mehdi Gholamalifard

Farmers' Adaptation to Climate Change in Iran: A Bibliometric Analysis Based on International Sources 73-94

Saeid Barkhori

Evaluation and comparison of XBeach, DBN and LightGBM models for predicting flood discharge (Case study: Taleghan Watershed) 95-111

Ramtin Tavoosi Rad , Sadaf Piri , Mohammad Ansari ghojghar

Analysis of Factors Affecting the Adaptation of Iranian Agricultural Communities to Natural Hazards (Theoretical Foundations, Applied Dimensions and Factor Analysis) 112-131

Ardeshir Mesbah, Ali Tohidloo, Esmail Karamidehkordi, Amin Salehpour jam, Tofigh Saadi

Climatology of the Major Drainage Basins of Iran 132-148

Sayyed Mohammad Hosseini

Environmental Assessment of Heavy Metals in Water Resources of the Karaj Watershed: Toward Sustainable Water Resources Management 149-164

Mohamadreza Raeisi Dehkordi, Amir Hossein Yeganeh Mazhar