



مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۵۸۱

سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

۱-۲۴

نگاشت خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین

امین صالح‌پورجم، جمال مصفايي، صمد شادفر، فرامرز سرفراز

۲۴-۵۰

ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری

صدف پیری، حمیدرضا مرادی، وحید موسوی

۵۱-۷۳

چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک

غلامرضا شجاعی، مهدی قربانی، آرش ملکیان، امیر علم بیگی، مریم رستمی

۷۴-۹۳

پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی به کمک یادگیری عمیق و عوامل تأثیرگذار بر آن با استفاده از سنجش‌ازدور

مریم حیدرزاده، هادی سیاسر

۹۴-۱۱۲

کمی‌سازی اجمالی تعمیم‌یافته خسارت فرسایش خاک ناشی از هدررفت پتاسیم و فسفر در آبخیزهای رده دوم ایران

رضا چمنی، سیدحمیدرضا صادقی، مرجان بهلکه

۱۱۳-۱۲۸

ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام)

نرگس پردل، جعفر حسین‌زاده، مهدی حیدری، رضا امیدپور

۱۲۹-۱۴۶

چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی از دیدگاه ذینفعان (مطالعه موردی: استان گلستان)

عامره تیموری، حنا محمدی کنگرانی، محمدهادی معیری، محمدرضا شهرکی

۱۴۷-۱۵۹

بررسی تأثیر سامانه‌های هلالی آبخیز در افزایش رطوبت خاک (مطالعه موردی: بخشی از منطقه مانشت و قلارنگ)

علی‌رضا محمدی، محسن توکلی، فریدون سلیمانی



مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز

سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

۴۵۸۱-۲۷۸۲

دانشگاه ایلام با همکاری انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبخیز ایران

دکتر نورالدین رستمی

دکتر حاجی کریمی

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، 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 اسمعیلی 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، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دکتر محسن توکلی: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

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

دکتر مرزبان فرامزی: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

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

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

دکتر مهدی حیدری

دکتر نورالدین رستمی

دکتر نورالدین رستمی، دکتر رضا امیدپور

دکتر رضا امیدپور

شاپا الکترونیکی

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سر دبیر

اعضای هیأت تحریریه

مدیر داخلی

ویراستار انگلیسی

ویراستار فارسی

صفحه آرا و طراح جلد

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>



نگاشت خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین

امین صالح‌پورجم، جمال مصفایی، صمد شادفر، فرامرز سرفراز

۱-۲۴

ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری

صدف پیری، حمیدرضا مرادی، وحید موسوی

۲۴-۵۰

چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک

غلامرضا شجاعی، مهدی قربانی، آرش ملکیان، امیر علم بیگی، مریم رستمی

۵۱-۷۳

پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیر زمینی به کمک یادگیری عمیق و عوامل تأثیرگذار بر آن با استفاده از سنجش از دور

مریم حیدرزاده، هادی سیاسر

۷۴-۹۳

کمی‌سازی اجمالی تعمیر یافته خسارت فرسایش خاک ناشی از هدررفت پتاسیم و فسفر در آبخیزهای رده دوم ایران

رضا چمنی، سیدحمیدرضا صادقی، مرجان بهلکه

۹۴-۱۱۲

ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام)

نرگس پردل، جعفر حسین‌زاده، مهدی حیدری، رضا امیدپور

۱۱۳-۱۲۸

چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی از دیدگاه ذینفعان (مطالعه موردی: استان گلستان)

عامره تیموری، حنا محمدی کنگرانی، محمدهادی معیری، محمدرضا شهرکی

۱۲۹-۱۴۶

بررسی تأثیر سامانه‌های هلالی آبگیر در افزایش رطوبت خاک (مطالعه موردی: بخشی از منطقه مانشت و قلا رنگ)

علی‌رضا محمدی، محسن توکلی، فریدون سلیمانی

۱۴۷-۱۵۹

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 صحت و سقم 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 قابل توجه نویسندگان برای نگارش مقاله

۱-۲. 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 به ترتیب 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.

۱. نکات قابل توجه 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 به دلیل 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

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

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 در نهایت 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

ساختار همه مقاله‌ها از چکیده، کلیدواژه‌ها، 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، تجزیه و تحلیل‌های 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.

تجزیه و تحلیل‌های 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؛ به عبارتی، نویسنده باید بکوشد با مقایسه پژوهش‌های متعدد نشان دهد که واگرایی‌ها و همگرایی‌های بین پژوهش‌وی با دیگران در کجاست و به چه دلیل رخ داده است.

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 به صورت کلی صادر می‌کند؛ به عبارتی، اکنون نتایج پژوهش نویسنده از صافی ارزیابی‌ای به نام بحث گذشته‌اند و برد اثرگذاری و کاربرد آن مشخص شده است و نتیجه‌گیری بهترین مبحثی است که نویسنده فرصت می‌یابد تا نتیجه به دست آمده و میزان اثرگذاری آن را گزارش کند. اگر نویسنده بر اساس تجربه‌ای که به دست 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 پیشنهادها را در نتیجه‌گیری ارائه دهد.

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.

۲-۱۰. 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

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

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، به صورت زیرنویس نوشته شود.

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 تجزیه و تحلیل کرده است تا هدف یا اهداف پژوهش (حل خلاً علمی که در مقدمه بیان شد) را برآورد کند. این توضیحات باید به قدری 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 به طور ابتدای بخش مواد و روش‌ها است، قرار دهد.

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 به طور 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.

۲-۷. بحث

بحث مقاله به دلیل سنگین بودن آن و نیاز به تفکری عمیق و شاید وقت‌گیر، به طور معمول در معرض خطر است. در این بخش، به استناد مشاهدات بیشتر، مبانی نظری علم، سابقه پژوهش‌ها و تجربیات گذشتگان و همچنین

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

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

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

نام خانوادگی نویسنده اول، نام نویسنده اول؛ نام خانوادگی نویسنده دوم، نام نویسنده دوم و نام خانوادگی نویسنده چندم، نام نویسنده چندم. (سال انتشار). عنوان کتاب (به صورت کج‌نویسی). محل انتشار: ناشر.

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

ب) کتاب ترجمه شده

نام خانوادگی، نام. (تاریخ انتشار ترجمه). نام کتاب (به صورت کج‌نویسی). مترجم: نام و نام خانوادگی 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

نام خانوادگی نویسنده اول، نام نویسنده اول؛ نام خانوادگی نویسنده دوم، نام نویسنده دوم و نام خانوادگی نویسنده چندم، نام نویسنده چندم. (سال انتشار). عنوان مقاله. نام نشریه (به صورت کج‌نویسی)، سال یا دوره (شماره)، صفحه آغاز مقاله- صفحه پایان مقاله. در صورت دارا بودن شناسه راقومی 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*

متن مقاله باید به شیوه داخل پرانتز باشد، به گونه‌ای که ابتدا نام خانوادگی نویسنده یا نویسندگان و سال انتشار آورده شود. برای مثال، در صورت وجود یک نویسنده با ذکر نام خانوادگی نویسنده و سال انتشار؛ مانند (Rostami, 2014)؛ برای دو نویسنده با ذکر نام خانوادگی هر دو نویسنده و سال انتشار؛ مانند (Rostami & Ahmadi, 2021) باشد. در صورت وجود چندین نگارنده، ارجاع به منبع باید به صورت (نام خانوادگی نگارنده اول و همکاران، سال انتشار) مانند (Rostami et al., 2021) باشد. در صورتی که 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

۲-۱۱. 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.

۲-۱۱-۱. 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.

۲-۱۱-۲. 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.

۲-۱۱-۳. همه منابع مورد استفاده اعم از فارسی و لاتین در پایان مقاله به زبان انگلیسی برگردانده و به ترتیب حروف الفبای نام خانوادگی 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.

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. حروف چینی 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 به صورت Bold) و انگلیسی (Times

New Roman 10 به صورت Bold) نوشته شود. اعداد

داخل جدول‌ها به صورت 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

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 (به صورت کج نویسی). پایان‌نامه مقطع رشته، نام دانشگاه.

Rostami, N. (2013). *Modeling the relationship between effective precipitation and flood hydrograph by joint probability approach*. 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 (به صورت کج‌نویسی)، (صص شماره صفحات). محل انتشار: ناشر.

و) کتاب منتشر شده در سازمان‌ها یا نهادها

نام سازمان یا نهاد. (سال انتشار). عنوان کتاب (به صورت

کج‌نویسی). محل انتشار: ناشر.

ز) وبگاه اینترنتی

نام‌خانوادگی نویسنده، نام نویسنده. (در صورت وجود تاریخ انتشار). عنوان مطلب مورد استفاده (به صورت کج‌نویسی).

برگرفته از: آدرس اینترنتی.

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 فرم‌های 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

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

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.

۳-۲. 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. نقشه‌ها باید واضح، مطالب آن‌ها خوانا و دارای مقیاس باشند. ذکر مأخذ نقشه‌ها، عکس‌ها یا شکل‌هایی که از منابع دیگر اقتباس شده‌اند الزامی است.

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

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.

۳-۶. 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.

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

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

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

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

۲-۵. در صورتی که 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 می‌تواند 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 به صورت 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.

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 کدام یک 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.

مجموعه مقالات

Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province

Amin Salehpour Jam^{1*}, Jamal Mosaffaie¹, Samad Shadfar¹, Faramarz Sarfaraz²

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
2. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Qazvin, Iran

* Corresponding author: aminpourjam@scwmri.ac.ir

(Received: 16 November 2024

Revised: 01 December 2024

Accepted: 21 December 2024)

Extended Abstract

Introduction: Landslides are a natural hazard that cause human and financial losses. This phenomenon also results in significant environmental damage through land degradation in landslide-prone areas. In this regard, it is important to prepare landslide hazard maps to effectively plan for landslide risk management. In recent years, multi-attribute decision-making (MADM) methods have been used in landslide hazard mapping. This study aims to evaluate the performance of widely used hybrid MADM methods, including AHP-SAW, AHP-TOPSIS, and AHP-VIKOR for creating landslide hazard maps in the Qezel Owzan region, Qazvin Province.

Materials and methods: In the present study, various causal factors, including rainfall, slope angle, slope aspect, lithology, altitude, land use, distance to roads, distance to faults, and distance to streams, were considered as effective indicators for predicting landslide occurrence. Two normalization methods were employed, namely, the Min-Max normalization method for the SAW method and the vector normalization method for the TOPSIS and VIKOR methods. In addition, the group decision-making method in the Analytical Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weights of causal factors based on the perspectives of 12 experts. Furthermore, the Quality sum (Qs) index and the Area Under the Curve (AUC) values of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were used to validate the performance of the different MADM methods used in this study.

Results and Discussion: The Qs values for the AHP-SAW, AHP-TOPSIS, and AHP-VIKOR methods were calculated as 0.241, 0.262, and 0.626, respectively. Also, the AUC values for these three methods were calculated 0.769, 0.786, and 0.805, respectively, so that they are within the acceptable and excellent acceptance range. In this study, the AHP-VIKOR method is introduced as the best method for producing a landslide hazard map. One of the disadvantages of using hybrid MADM methods is their reliance on the precise calculation of the weights of causal factors, which heavily depends on expert's view points in the AHP method. To address this, the group decision-making method was applied in AHP to improve weights calculations. It is worth noting that the AHP-SAW method used in this study, which demonstrates acceptable accuracy in producing landslide hazard maps, has also been introduced in other studies as a simple and efficient method. Although the SAW method is a simple weighting method based on normalizing the decision matrix data, determining the weights of the indicators, and aggregating the indicators based on the weighted average method, it is widely used in environmental assessments. Additionally, the Density Ratio (Dr) values of different landslide hazard classes, calculated for the VIKOR method, exhibit an upward trend from areas with very low potential for landslide occurrence (class I) to areas with very high potential for landslide occurrence (class V). This trend highlights the VIKOR method capability for producing landslide hazard maps in the study area.

Conclusion: The evaluation of hybrid MADM methods based on performance evaluation indicators, indicated acceptable (AHP-SAW and AHP-TOPSIS) and excellent (AHP-VIKOR) performance of methods for producing landslide hazard maps. Due to the presence of areas with high to very high landslide hazard potential in this region, planning for landslide risk management is strongly recommended. Although landslide distribution maps are beneficial for evaluating MADM methods, the lack of reliance on these maps during the MADM process is one of the strengths of this approach. However, accurately determining the weights of causal factors remains a challenge. To enhance the weight calculation process, using the group decision-making method in AHP is highly advisable.

Keywords: AHP; Causal factors; Decision matrix; Group decision-making; MADM

Citation: Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Shadfar, S., & Sarfaraz, F. (2025). Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 1-24. doi= 10.22034/iwm.2024.2045897.1189

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>).



نگاشت خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین

امین صالح‌پورجم^{۱*}، جمال مصفایی^۱، صمد شادفر^۱، فرامرز سرفراز^۲

۱. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: aminpourjam@scwmri.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶)

چکیده مبسوط

مقدمه: زمین‌لغزش‌ها از جمله مخاطرات طبیعی هستند که باعث خسارات جانی و مالی می‌شود. همچنین، این پدیده منجر به خسارات زیست محیطی قابل توجهی از طریق تخریب زمین در مناطق مستعد زمین لغزش می‌شود. در این ارتباط، تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش برای برنامه‌ریزی موثر برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش دارای اهمیت است. در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM) در نگاشت خطر زمین‌لغزش استفاده شده است. این مطالعه باهدف ارزیابی عملکرد روش‌های ترکیبی MADM شامل AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای نگاشت خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قزل‌اوزن در استان قزوین انجام شد.

مواد و روش‌ها: در تحقیق حاضر، انواع عوامل علی به‌صورت نقشه‌های بارش، زاویه و جهت شیب، سنگ‌شناسی، ارتفاع، کاربری اراضی و فاصله از جاده، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه به عنوان شاخص‌های موثر برای پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش در نظر گرفته شدند. در این مطالعه از دو روش نرمال‌سازی شامل روش نرمال‌سازی Min-Max برای روش SAW و روش نرمال‌سازی برداری برای روش‌های TOPSIS و VIKOR استفاده شد. همچنین، از روش تصمیم‌گیری گروهی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به‌منظور تعیین اوزان عوامل علی بر اساس دیدگاه ۱۲ کارشناس خبره استفاده شد. علاوه بر این، از شاخص‌های مجموع کیفیت (QS)، مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) و منحنی‌های مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برای صحت‌سنجی عملکرد روش‌های مختلف MADM مورد بررسی در این تحقیق استفاده شد.

نتایج و بحث: مقادیر QS برای روش AHP-SAW، ۰/۲۴۱، برای روش AHP-TOPSIS ۰/۲۶۲ و برای روش AHP-VIKOR، ۰/۶۲۶ محاسبه شد. همچنین، مقادیر AUC برای این سه روش به ترتیب ۰/۷۶۹، ۰/۷۸۶ و ۰/۸۰۵ محاسبه شد که در محدوده پذیرش قابل‌قبول و عالی قرار دارند. در این مطالعه، روش AHP-VIKOR به‌عنوان بهترین روش تولید نقشه خطر زمین‌لغزش معرفی می‌شود. یکی از معایب استفاده از مدل‌های ترکیبی MADM، محاسبه دقیق اوزان عوامل علی مبتنی بر دیدگاه کارشناسی بر اساس روش AHP است، به‌طوری‌که اوزان به دست آمده قویاً بستگی به دیدگاه کارشناس نظر دهنده دارد. در این مطالعه به‌منظور بهبود دقت در محاسبه اوزان معیارها، از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP استفاده شد. باید توجه داشت که روش AHP-SAW به کار رفته در این مطالعه که از صحت قابل‌قبولی در تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش برخوردار است، در دیگر مطالعات نیز، به‌عنوان روشی ساده و کارآمد برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش معرفی شده است. همچنین، اگرچه روش SAW، یک روش وزن‌دهی ساده مبتنی بر نرمال‌سازی داده‌های ماتریس تصمیم، تعیین اوزان شاخص‌ها و تجمیع شاخص‌ها بر اساس روش میانگین وزنی است، اما از کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی‌های زیست‌محیطی نیز برخوردار است. علاوه بر این، مقادیر Dr طبقات مختلف خطر زمین‌لغزش محاسبه شده برای روش VIKOR، دارای یک روندی تقریباً صعودی از مناطق با خطر بسیار پایین به زمین‌لغزش (طبقه I) به سمت مناطق با خطر بسیار زیاد به زمین‌لغزش (طبقه V) هستند. این روند نشان‌دهنده قابلیت بالای روش VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

نتیجه‌گیری: نتایج ارزیابی روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی عملکرد، نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول (AHP-SAW) و عالی (AHP-TOPSIS) و عالی (AHP-VIKOR) روش‌ها برای تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش بود. با توجه به حضور پهنه‌های با خطر زیاد تا خیلی‌زیاد در منطقه مورد مطالعه، برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش قویاً برای منطقه توصیه می‌شود. اگرچه نقشه پراکنش زمین‌لغزش در ارزیابی روش‌های MADM مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما عدم نیاز به استفاده از این نقشه‌ها در فرایند MADM به‌منظور تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش از نقاط قوت روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. با این حال، تعیین صحیح اوزان شاخص‌های علی از جمله چالش‌های مطرح در کاربست این روش‌ها است که برای بهبود فرایند محاسبه اوزان، استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری گروهی؛ عوامل علی؛ ماتریس تصمیم؛ AHP؛ MADM

استناد: صالح‌پور جم، ا.، مصفایی، ج.، شادفر، ص.، و سرفراز، ف. (۱۴۰۴). نگاشت خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در حوزه آبخیز قزل‌اوزن، استان قزوین. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۱-۲۴.

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

زمین لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که خسارات جانی و مالی آن، منجر به انواع مشکلات اجتماعی و اقتصادی برای ساکنان حوزه‌های آبخیز می‌شود (Díaz *et al.*, 2020). همچنین، این پدیده از طریق تخریب اراضی، خسارات زیست‌محیطی بارزی را در عرصه مربوطه به دنبال دارد (Khan *et al.*, 2011; Parkash, 2023)؛ بنابراین، مدیریت ریسک زمین لغزش برای کاهش وقوع و خسارات ناشی از آن ضروری است. در این ارتباط، نگاشت (تولید نقشه) حساسیت زمین لغزش، طبقه‌بندی پتانسیل خطر زمین لغزش و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری منطقه نقش مهمی را در مدیریت ریسک زمین لغزش و کاهش مخاطرات مربوطه داراست (Dai *et al.*, 2002; Mosaffaie *et al.*, 2023).

عوامل مختلف از قبیل بارندگی، کاربری اراضی، واحدهای سنگ‌شناسی، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله تا گسل و فاصله تا جاده و آبراهه می‌توانند در نگاشت حساسیت به زمین لغزش و تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر زمین لغزش دخالت داشته باشند (Yalcin, 2011; Chen *et al.*, 2018; Pourghasemi & Rahmati, 2018; Achu *et al.*, 2023). همچنین، انواع روش‌های کمی و کیفی نیز در تهیه این نقشه‌ها دخالت دارند که انتخاب بهترین روش تهیه این نقشه‌ها مبتنی بر صحت‌سنجی مربوطه، از جمله مسائل اصلی تحقیق در مطالعات مربوطه است (Merghadi *et al.*, 2020; Naceur, *et al.*, 2022). در این راستا، توسعه روزافزون سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، امکان استفاده از انواع روش‌ها را برای تولید نقشه‌های حساسیت زمین لغزش تسهیل نموده است (Huang *et al.*, 2022; Miao *et al.*, 2023).

تاکنون انواع روش‌های کمی و کیفی برای نگاشت خطر زمین لغزش ارائه شده است (Aleotti & Chowdhury, 1999; Pourghasemi *et al.*, 2018).

برای ارزیابی خطر زمین لغزش روش‌های کمی و کیفی مختلفی وجود دارد. برخلاف روش‌های کمی، روش‌های کیفی بیشتر متکی به تجربه و قضاوت کارشناسان هستند (Aleotti & Chowdhury, 1999). در این ارتباط، روش تحلیل زمین‌ریخت‌شناسی از جمله روش‌های نگاشت کیفی زمین لغزش است (Van Westen *et al.*, 2003). به‌طور کلی، روش‌های نگاشت خطر زمین لغزش را می‌توان در چهار گروه اصلی فنون اکتشافی، قطعی، آماری و احتمالاتی مبتنی بر نقشه پراکنش زمین لغزش طبقه‌بندی نمود (Abella & Van Westen, 2008; Akgun, 2012). برای نمونه، تاکنون نگاشت حساسیت زمین لغزش با در نظر گرفتن عوامل علی^۱ (عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش) با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره (Arabameri *et al.*, 2019; Ozioko & Igwe, 2020)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Bragagnolo *et al.*, 2020)، روش‌های احتمالاتی مبتنی بر نقشه پراکنش زمین لغزش (Ozdemir, 2020) و منطق فازی (Tsangaratos, 2018) انجام شده است.

در سال‌های اخیر، انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه^۲ (MADM) در نگاشت خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Pourghasemi & Rossi, 2017; Bhagya *et al.*, 2023). این روش‌ها در گروه روش‌های اکتشافی GIS مبنا قرار می‌گیرند (Tomashevskii & Tomashevskii, 2021). به‌طور کلی، روش‌های MADM یکی از انواع روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ (MCDM) هستند که در ارتباط با شاخه‌ای از علم به نام تحقیق در عملیات هستند (Triantaphyllou *et al.*, 1998). امروزه فنون

1- Causal factors

2- Multi-attribute decision-making

3- Multi-criteria decision-making

ضروری است. در مطالعات پیشین، روش AHP بیشتر به صورت انفرادی یا در ترکیب با سایر روش‌های غیر MADM برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش استفاده شده است. در این مطالعه از روش AHP برای تعیین اوزان عوامل علی در ترکیب با سایر روش‌های MADM به صورت ترکیبی با روش‌های SAW، TOPSIS و VIKOR به عنوان یک مدل ترکیبی استفاده شده است. همچنین، با توجه به اینکه روش‌های MADM بیشتر مبتنی بر ارزش متوسط شاخص‌ها در واحدهای کاری، اقدام به تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش می‌کنند (Salehpour Jam *et al.*, 2021)، در این مطالعه از فرایندی پیکسل‌مبنا برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش استفاده شده است. عملکرد مدل‌های ترکیبی استفاده شده با استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم (Dr)، شاخص مجموع کیفی (Qs) و همچنین با روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه طرح قزل‌اوزن بخشی از حوضه رودخانه سفیدرود است که در شمال غربی استان قزوین واقع شده است. این حوضه دارای مساحت ۱۵۱۶۲۶ هکتار بوده و به ترتیب کمینه و بیشینه ارتفاع آن ۲۴۸ و ۲۹۶۰ متر است (شکل ۱). این حوضه دارای کاربری‌های اراضی مختلفی همچون مرتع، جنگل، اراضی بدون پوشش، زراعت آبی و دیم است که به ترتیب، اراضی مرتعی با دارا بودن مساحت ۱۱۴۴۱۴ هکتار (۷۵/۳۷ درصد) و اراضی عاری از پوشش گیاهی با مساحت ۵۸۸/۵ هکتار (۰/۳۹ درصد)، بیشینه و کمینه مساحت را در این حوضه به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). کمینه و بیشینه بارندگی متوسط سالانه این حوضه، به ترتیب ۲۰۹ و ۴۶۵ میلی‌متر است (شکل ۳). این حوضه دارای ۴۸ روستا است که این روستاها تقریباً در تمامی گستره منطقه،

تصمیم‌گیری چندشاخصه به طور گسترده‌ای در پهنه‌بندی پتانسیل مخاطراتی مانند سیل (Vojtek *et al.*, 2021)، بیابان‌زایی و تخریب اراضی (Salehpour *et al.*, 2019)، زلزله (Jam *et al.*, 2020) و غیره استفاده شده است. در این مطالعه، از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۴ (AHP) پیشنهاد شده توسط Saaty (1980) برای تعیین اوزان معیارها و از تکنیک ترتیب اولویت بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل^۵ (TOPSIS) پیشنهاد شده توسط Yoon و Hwang (۱۹۸۱) و روش ویکور^۶ (VIKOR) پیشنهاد شده توسط Opricovic (۱۹۹۸) برای نگاشت خطر زمین لغزش استفاده شده است.

در میان این روش‌ها، روش AHP بیشترین فراوانی کاربرد را در تولید نقشه خطر زمین لغزش داشته است (Chen *et al.*, 2016; Basu & Pal, 2020; Andriani *et al.*, 2024). همچنین، روش TOPSIS به طور گسترده در مطالعات مخاطرات چندگانه مانند زمین لغزش و سایر مخاطرات مورد استفاده قرار گرفته است (Sheikh *et al.*, 2019; Thakur & Mohanty, 2023).

این مطالعه باهدف ارزیابی عملکرد مدل‌های پرکاربرد ترکیبی MADM برای تولید نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز قزل‌اوزن استان قزوین انجام شد. این حوضه از جمله حوضه‌هایی است که در سال‌های اخیر، مبتنی بر رخداد متعدد زمین لغزش به خصوص در قسمت‌های مرکزی و غربی خود، توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین به عنوان کارفرما، در قالب یک قرارداد پژوهشی، تحت مطالعه قرار گرفت، که مقاله جاری، نتیجه این مطالعه است. بر این اساس، تهیه نقشه خطر زمین لغزش به عنوان یک لایه مهم برای مدیریت ریسک زمین لغزش

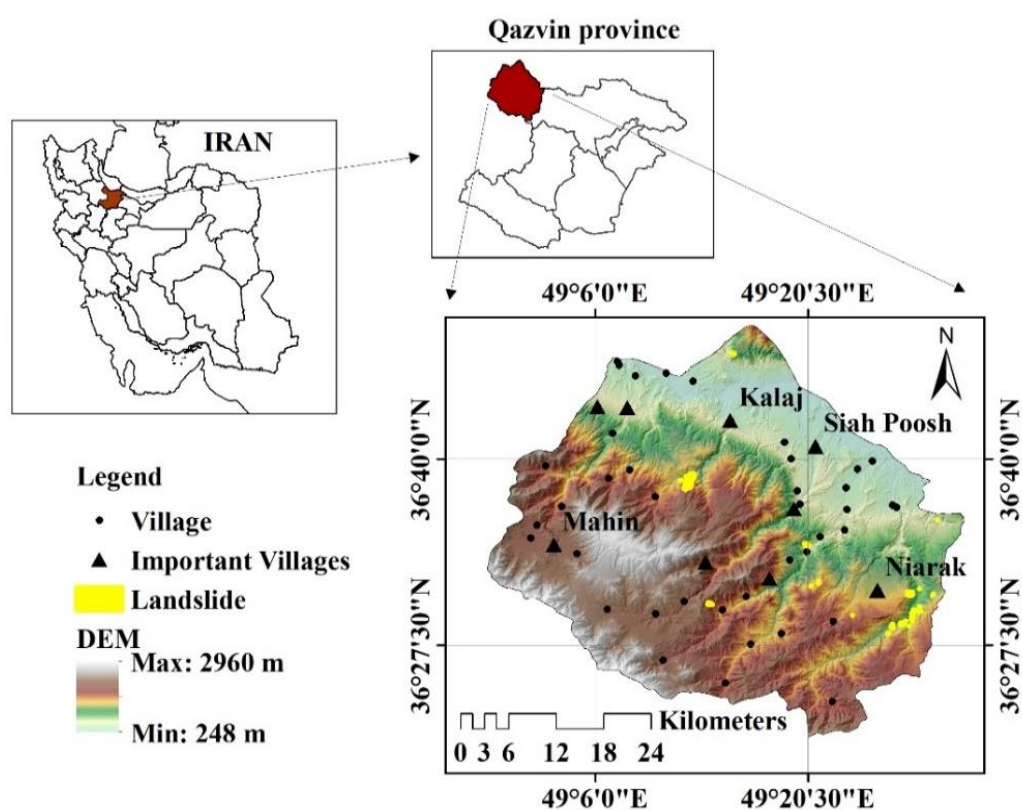
4- Analytic Hierarchy Process

5- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

6 - Viekriterijumsko Kompromisno Rangiranje

تولید محصولات زراعی دیم شامل گندم، جو و حبوبات (به‌طور خاص عدس) و یونجه آبی (کشت آبی) و نیز باغات زیتون، انار و گردو است. همچنین، صنایع منطقه به صورت محدود شامل صنایع تبدیلی، کارخانه سیمان و صنایع تولید انرژی پاک (توربین‌های بادی) است.

پراکنش یافته‌اند. روستاهای آلتین‌کش، کلج، سیاه‌پوش، شاهوران، نیارک، حسین‌آباد، سنگان علیا، پلنگه و ماهین از جمله روستاهای مهم این منطقه هستند (شکل ۱). همچنین در این حوضه، اراضی کشاورزی بیشتر در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن توسعه یافته‌اند. در این ارتباط، منابع درآمدی بخش کشاورزی و باغی روستاهای حوضه، مربوط به کشت و



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قزل‌اوزن در کشور و استان قزوین

Figure 1- The location of Qezel Owzan watershed in the country and Qazvin Province

ایجاد لایه‌های علی

در این مطالعه عوامل علی به دو دسته تقسیم شدند: (۱) عوامل علی با مقادیر اولیه. این نقشه‌ها که با مقادیر اولیه خویش در تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده شدند، شامل نقشه‌های بارش، زاویه شیب، جهت شیب و نقشه‌های فاصله‌ای هستند؛ (۲) عوامل

روش تحقیق

در این مطالعه از پرکاربردترین روش‌های ترکیبی MADM شامل AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای نگاشت حساسیت زمین‌لغزش استفاده شد. بدین منظور فرایندی مشتمل بر مراحل ذیل به انجام رسید:

علی با مقادیر ثانویه. این عوامل مشتمل بر نقشه‌های موضوعی طبقه‌بندی شده‌ای هستند که با مقادیر ثانویه حاصل از روش AHP در نگاشت حساسیت زمین‌لغزش مشارکت نموده‌اند و شامل نقشه‌های سنگ‌شناسی، ارتفاع و کاربری اراضی بودند. در این مطالعه، لایه‌های موضوعی و پیکسل‌های مربوطه به-ترتیب به‌عنوان شاخص‌ها و گزینه‌های روش‌های ترکیبی MADM در نظر گرفته شدند.

لایه‌های زاویه و جهت شیب

لایه‌های زاویه و جهت از جمله لایه‌های پرکاربرد در نگاشت حساسیت زمین‌لغزش هستند (Katz et al., 2024; Mao et al., 2014) و نقش مهمی در تحلیل پایداری شیب دارند (Zakaria et al., 2018). در این راستا نقشه‌های زاویه شیب و جهت شیب به‌صورت جداگانه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و لایه DEM با تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه‌شده از سازمان نقشه‌برداری کشور ایجاد شد (شکل ۳).

لایه بارندگی

این لایه یکی از لایه‌های مهم در فرآیند تولید نقشه حساسیت به زمین‌لغزش است (Pourghasemi et al., 2013; Mao et al., 2024). لایه بارندگی متوسط سالانه با استفاده از لایه DEM و معادله گرادیان بارندگی مربوطه توسط ماشین حساب رستری نرم‌افزار ArcGIS 10.8 ایجاد شد (شکل ۴). گرادیان بارندگی در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۴۰۰ با استفاده از داده‌های آماری بارندگی متوسط سالانه ۱۶ ایستگاه هواشناسی سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو پس از بازسازی نواقص آماری، ایجاد شد (رابطه ۱).

$$Y = 0.094 X + 186.25 \quad (1)$$

به‌طوری‌که: X ارتفاع بر حسب متر و Y بارندگی متوسط سالانه بر حسب میلی‌متر است.

لایه‌های فاصله از جاده، گسل و آبراهه

این لایه‌ها نقش مهمی در مطالعات نگاشت حساسیت زمین‌لغزش دارند (Zhu et al., 2019; Mao et al., 2024).

لایه طبقه‌بندی شده سنگ‌شناسی منطقه

نقشه سنگ‌شناسی دارای نقشی کلیدی در فرآیند نگاشت حساسیت زمین‌لغزش است (Meena et al., 2021; Pourghasemi et al., 2019). در این مطالعه از نقشه‌های برداری زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. سپس، نقشه طبقه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش واحدهای سنگی بر اساس امتیاز به دست آمده از طبقه‌بندی انجام‌شده توسط Shariat Jafari و Peyrowan (۲۰۱۳) ایجاد شد. این نقشه موضوعی طبقه‌بندی شده، دارای مقادیری از ۱ تا ۵ است که به‌ترتیب نشان‌دهنده حساسیت به رخداد زمین‌لغزش از خیلی کم تا خیلی زیاد است (شکل ۴).

لایه‌های طبقات ارتفاعی و کاربری اراضی

لایه‌های ارتفاعی و کاربری اراضی از دیگر نقشه‌های مهم در مطالعات حساسیت زمین‌لغزش هستند (Hong et al., 2018; Mao et al., 2024). کاربری‌های اراضی ارزش‌های متفاوتی از حساسیت به زمین‌لغزش دارند و معمولاً با استفاده از روش AHP وزن‌دهی می‌شوند (Achu & Reghunath, 2017). در این راستا از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۴ استفاده شد، به‌طوری‌که وزن‌دهی به انواع کاربری‌های حوضه شامل زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع، جنگل و اراضی لخت (فاقد پوشش) با استفاده

گروه خبرگان (۱۲ خبره)، نسبت سازگاری قضاوت‌ها بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد (Saaty & Peniwati, 2013). سپس، تجمیع قضاوت‌ها با استفاده از میانگین هندسی مقادیر نظیر در ماتریس‌های تصمیم، بررسی سازگاری قضاوت‌ها برای ماتریس تجمیعی تصمیم و همچنین، محاسبه اوزان شاخص‌ها انجام شد (Saaty, 2012).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

که در آن RI:، نمایه ناسازگاری تصادفی قابل اکتساب از جدول ۱ و CI، نمایه سازگاری است که مبتنی بر رابطه ۳ محاسبه شد (Saaty, 2012).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

که در آن:

n، تعداد گزینه‌های ماتریس تصمیم و λ_{max} ، میانگین مقادیر بردار سازگاری است.

از روش AHP انجام شد (شکل ۳ و جدول ۲). همچنین، با توجه به ارتباط بین بارندگی و ارتفاع از سطح دریا و وجود یخبندان در ارتفاعات حوضه، طبقات ارتفاعی حساسیت متفاوتی نسبت به زمین‌لغزش دارند که معمولاً بر اساس روش AHP وزن‌دهی می‌شوند (Ozdemir, 2020; Salehpour, 2021). در این مطالعه، شش طبقه ارتفاعی شامل ۰-۵۰۰، ۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰۰-۲۵۰۰ و ۲۵۰۰-۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴)؛ بنابراین، تعیین مقادیر ثانویه برای انواع طبقات ارتفاعی و کاربری‌های اراضی با استفاده از روش AHP انجام شد که بزرگی مقادیر مربوطه، نشانه اهمیت آن‌ها در رخداد زمین‌لغزش است.

بدین منظور پس از ایجاد ماتریس مقایسات زوجی به صورت پرسشنامه AHP و تکمیل آن‌ها توسط کار

جدول ۱- نمایه‌های سازگاری تصادفی (Saaty, 2012)

Table 1- Random consistency index (Saaty, 2012)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، تصاویر تاریخی گوگل ارث (Landsat/Copernicus)، نقشه زمین‌شناسی و درنهایت بررسی‌های میدانی استفاده شد. با توجه به وسعت زیاد حوضه، بررسی‌های میدانی یکی از دشوارترین مراحل مطالعه بود که ۷ ماه به طول انجامید. لایه پراکنش زمین‌لغزش در شکل ۱ ارائه شده است. در این راستا، حداقل و حداکثر مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده در این حوضه، به ترتیب ۰/۶۷ و ۱۰۸/۸۵ هکتار است. در شکل ۲، نمونه‌هایی از زمین‌لغزش رخ داده در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

لایه پراکنش زمین‌لغزش

لایه پراکنش زمین‌لغزش از جمله لایه‌های مهمی است که در فرایند صحت‌سنجی خروجی مدل‌ها دخالت داده می‌شود (Sharma et al., 2024). با توجه به اینکه بیشتر زمین‌لغزش‌های رخ داده در این حوضه، از نوع چرخشی هستند، بنابراین در این تحقیق زمین‌لغزش‌های چرخشی در نظر گرفته شد. در این مطالعه، دو ویژگی زمین‌لغزش شامل مساحت و مکان، مدنظر قرار گرفت و در صحت‌سنجی نهایی حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه این لایه از نقشه پراکنش زمین‌لغزش ایجاد شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، تفسیر



شکل ۲- نمونه‌هایی از زمین لغزش رخ داده در مجاورت روستای سیردان
Figure 2- Examples of landslides that occurred near Sirdan village

$$N_{ij} = \frac{\text{Max } x_{ij} - x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}} \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (6)$$

$$N_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (7)$$

که در آن: P_{ij} ، مقادیر نرمال شده شاخص‌های مثبت، N_{ij} ، مقادیر نرمال شده شاخص‌های منفی و X_{ij} ، مقدار هر شاخص برای هر گزینه است.

محاسبه اوزان شاخص‌ها

در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری گروهی با کاربرد AHP برای تعیین اوزان شاخص‌ها استفاده شد. بدین منظور از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با مشارکت ۱۲ کارشناس خبره به شرح مراحل ذکر شده پیشین و روابط (۲) و (۳) استفاده شد.

محاسبه نمایه SAW

نمایه SAW، یک نمایه نرمال شده وزنی برای اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس شاخص‌ها است (رابطه ۸). این نمایه، نمایه‌ای یکپارچه است که با روش میانگین وزنی با استفاده از مقادیر نرمال شده حاصل از

فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه

در این مطالعه اقدام به تولید نقشه حساسیت زمین لغزش مبتنی بر متداول‌ترین فنون MADM مشتمل بر AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP- VIKOR شد. بدین منظور، پس از محاسبه شاخص‌ها، اقدام به ایجاد ماتریس تصمیم مبتنی بر فرایندی سلول مینا با هدف نگاشت زمین لغزش گردید. این ماتریس شامل مقادیر شاخص‌ها برای گزینه‌های مختلف (پیکسل‌ها) است. در این مطالعه، نگاشت حساسیت زمین لغزش مبتنی بر فنون MADM به قرار مراحل ذیل انجام شد:

نرمال‌سازی شاخص‌ها

نرمال‌سازی شاخص‌ها به منظور مقایسه مقادیر آن‌ها با یکدیگر مبتنی بر ماهیت بدون بعد داده‌های نرمال شده، ضروری است (Papathanasiou & Ploskas, 2018). در این مطالعه از دو روش نرمال‌سازی شامل روش نرمال‌سازی Min-Max برای روش SAW (معادلات ۴ و ۵) و روش نرمال‌سازی برداری برای روش‌های TOPSIS و VIKOR (معادلات ۶ و ۷) استفاده شد.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min } x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}} \quad (4)$$

محاسبه نمایه TOPSIS

به منظور محاسبه نمایه TOPSIS ابتدا راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (A^+) و منفی (A^-) به ترتیب بر اساس روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شد (Hwang & Yoon, 1981).

$$A^+ = \{(v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+)\} = \{(\max_i v_{ij} | j \in S_B), (\min_i v_{ij} | j \in S_C)\} \quad (9)$$

$$A^- = \{(v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-)\} = \{(\min_i v_{ij} | j \in S_B), (\max_i v_{ij} | j \in S_C)\} \quad (10)$$

که در آن: f_{ij} ارزش گزینه مورد نظر برای هر شاخص در ماتریس نرمال موزون است. سپس، مقادیر سودمندی (S_j) و تاسف (R_j) شاخص‌ها بر اساس روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه شد.

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (16)$$

$$R_j = \max \left[W_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (17)$$

که در آن f_i^* و f_i^- به ترتیب، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال موزون برای هر ستون است.

در نهایت، نمایه VIKOR (Q_j) مبتنی بر رابطه (۱۸) محاسبه شد.

$$Q_j = V \times \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1 - V) \times \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-} \quad (18)$$

که در آن: S^- ، بیشینه میزان S_j ؛ S^* ، کمینه میزان S_j ؛ R^- ، بیشینه میزان R_j ؛ R^* ، کمینه میزان R_j و V ، برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

صحت‌سنجی مدل‌ها

به منظور ارزیابی مدل‌های نگاشت حساسیت زمین‌لغزش، از یک‌سو، اقدام به محاسبه شاخص‌های نسبت تراکم (Dr) و مجموع کیفیت (Qs) شد و از سوی دیگر، از روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده

روش نرمال‌سازی Min-Max و اوزان شاخص‌های حاصل از روش AHP قابل محاسبه است (Papathanasiou & Ploskas, 2018).

$$V_{ij} = \sum_{i=1}^n W_j \cdot X_{ij} \quad (8)$$

که در آن: V_{ij} ، نمایه SAW؛ W_j ، وزن شاخص j ام و X_{ij} ، مقدار نرمال‌شده شاخص j ام برای گزینه i ام است.

به طوری که S_B و S_C به ترتیب مجموعه معیارهای سود و هزینه را نشان می‌دهند.

سپس، فاصله اقلیدسی هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (di^+) و منفی (di^-) محاسبه شد (روابط ۱۱ و ۱۲). در نهایت، نمایه TOPSIS (R_i) به عنوان مقدار نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل محاسبه شد (رابطه ۱۳).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \forall i \in I. \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \forall i \in I. \quad (12)$$

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \text{ For } i \in I. \quad (13)$$

محاسبه نمایه VIKOR

به منظور محاسبه شاخص VIKOR ابتدا راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (fi^*) و منفی (fi^-) به ترتیب بر اساس روابط ۱۴ و ۱۵ تعیین شد (Opricovic, 1998).

$$f_i^* = \max f_{ij} . j = 1. 2. \dots . m \quad (14)$$

$$f_i^- = \min f_{ij} . j = 1. 2. \dots . m \quad (15)$$

دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۴۲۷/۲ متر از دیگر لایه‌های علی‌تهیه شده در این پژوهش هستند (شکل ۴). به‌طور کلی، در فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه، شاخص‌ها و گزینه‌ها سازنده جدول ماتریس تصمیم هستند (Papathanasiou & Ploskas, 2018). در این ارتباط، گزینه‌ها می‌توانند به‌صورت واحدهای کاری حاصل از رویهم‌اندازی و تقاطع دو یا چند لایه منتخب (Karimpour Reyhan et al., 2007)، یک لایه شبکه‌ای منظم دارای ابعاد سلولی مشخص به‌منظور استخراج ارزش‌های مرتبط با هر شاخص (Salehpour Jam et al., 2021) و یا پیکسل یا سلول‌های نظیر عوامل علی دارای ساختار رستری (Salehpour Jam et al., 2023) تعریف شوند. در این مطالعه، مبتنی بر ارزش‌های سلول‌های لایه‌های علی اقدام به تولید لایه خطر زمین‌لغزش مبتنی بر فرایندی رستمینا با کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه شد. ماتریس مقایسات زوجی و مقادیر CR به دست آمده از روش AHP در جدول ۲ ارائه شده است. در این ارتباط، مقادیر CR حاصل از تصمیم‌گیری گروهی در AHP برای ماتریس‌های تصمیم مربوط به کاربری‌های اراضی، طبقات ارتفاعی و عوامل علی به‌ترتیب برابر با ۰/۰۸۹، ۰/۰۵۸ و ۰/۰۵۱ به دست آمد. با توجه به اینکه نسبت سازگاری ماتریس مقایسات کمتر از ۰/۱ است، سازگاری قضاوت‌ها و به‌تبع آن، اوزان به دست آمده، قابل قبول است (Saaty, 2012). یکی از معایب استفاده از مدل‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه، محاسبه دقیق اوزان عوامل علی مبتنی بر دیدگاه کارشناسی توسط روش AHP است (Basu & Pal, 2020)، به‌طوری‌که اوزان به دست آمده قویاً بستگی به دیدگاه کارشناس نظر دهنده دارد. در این مطالعه به‌منظور بهبود دقت در محاسبه اوزان معیارها، از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP با استفاده از فرمول‌نویسی در نرم‌افزار Excel استفاده شد. این روش قویاً برای تعیین اوزان معیارها مورد تأکید قرار گرفته است (Saaty, 2012).

(ROC) استفاده شد. شاخص‌های Dr و Qs توسط Gee (۱۹۹۲) پیشنهاد شده است که به‌ترتیب از طریق معادلات ۱۹ و ۲۰ قابل محاسبه هستند.

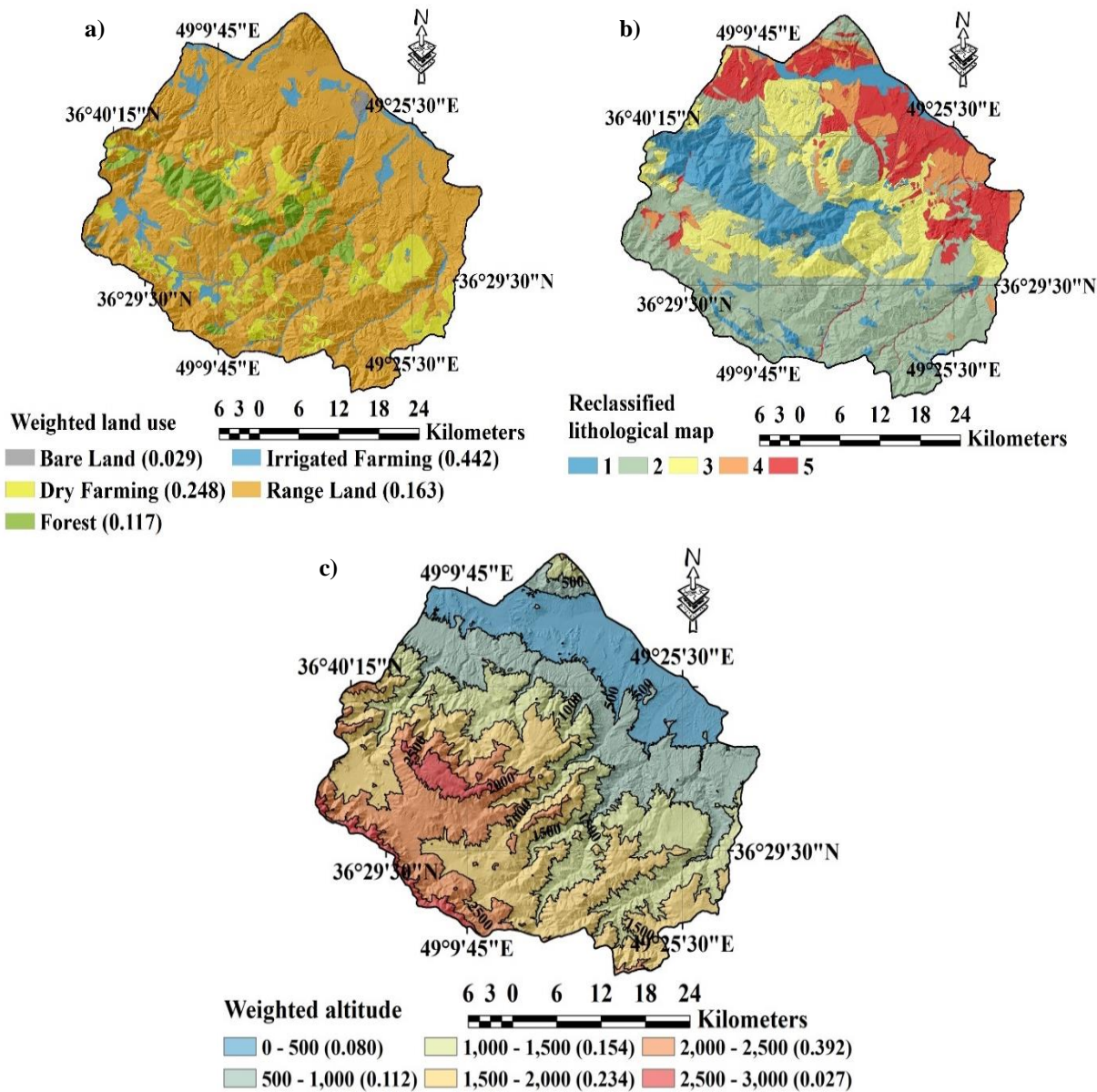
$$Dr = \frac{\frac{S_i}{A_i}}{\frac{\sum_i^n S_i}{\sum_i^n A_i}} \quad (19)$$

$$Qs = \sum_1^n ((Dr - 1)^2 \times S) \quad (20)$$

که در آن: S_i ، مساحت کل زمین‌لغزش‌ها در هر منطقه خطر، A_i ، مساحت هر منطقه خطر در نقشه حساسیت زمین‌لغزش، n ، تعداد منطقه خطر و S ، نسبت مساحت زمین‌لغزش در هر منطقه خطر به مساحت کل است. همچنین، منحنی‌های ROC و مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های MADM توسط ترسیم نرخ مثبت کاذب (FPR) در برابر نرخ مثبت واقعی (TPR) استفاده شد (Pourghasemi et al., 2013; Bui et al., 2020). این نمودار گرافیکی و مقادیر AUC مربوطه، از طریق نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 22 به دست آمد.

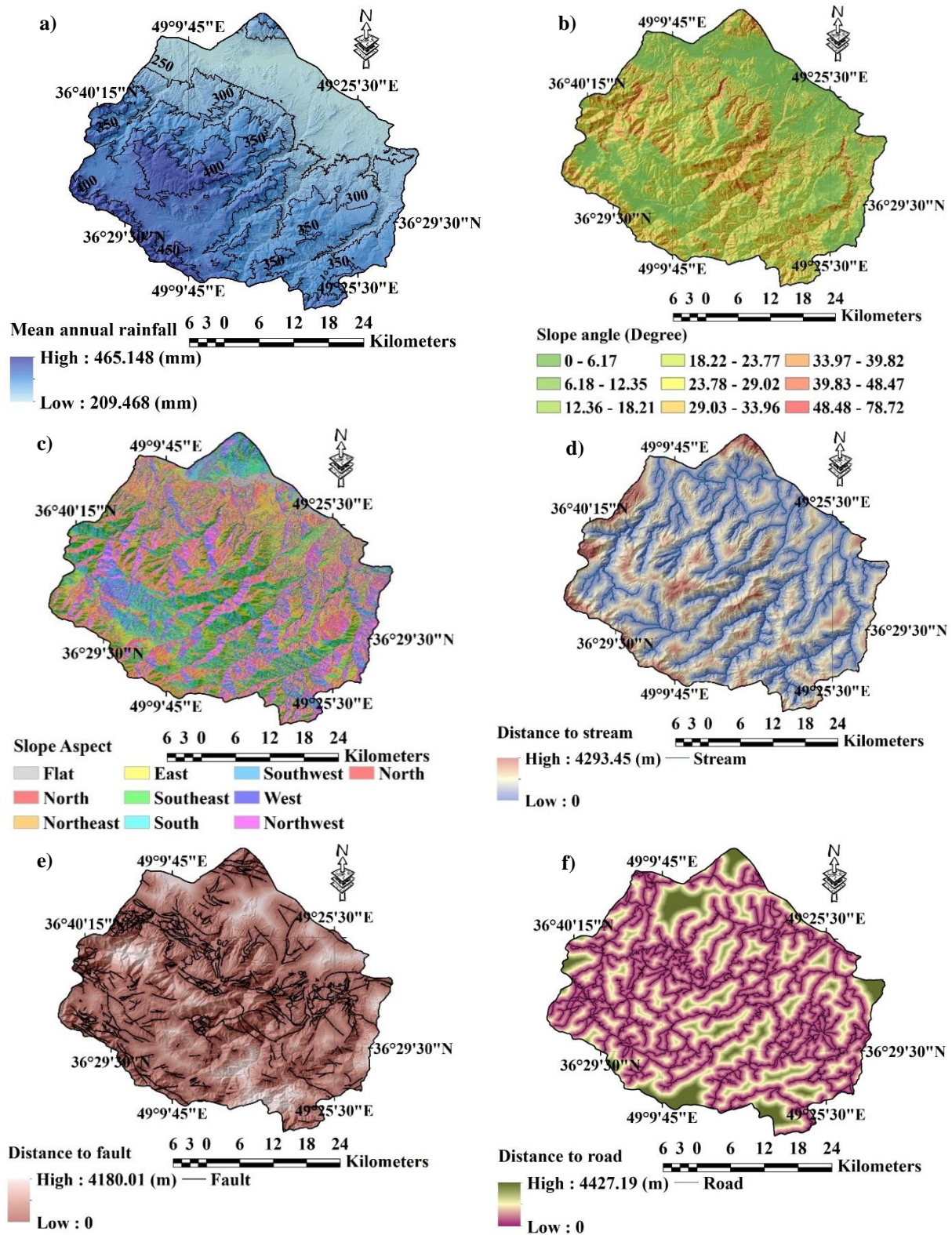
نتایج و بحث

انواع لایه‌های علی مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. لایه‌های کاربری اراضی و طبقات ارتفاعی توسط روش AHP با مجموع اوزان برابر یک در هر لایه و لایه زمین‌شناسی، توسط روش Peyrowan و Shariat Jafari (۲۰۱۳) از حساسیت به رخداد زمین‌لغزش خیلی کم (ارزش یک) تا خیلی زیاد (۵) امتیازدهی شدند (شکل ۳). همچنین، لایه بارندگی متوسط سالانه با دامنه مقادیر ۲۰۹/۵ تا ۴۶۵/۲ میلی‌متر، لایه زاویه شیب با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۷۸/۷ درجه، لایه جهت شیب شامل انواع جهات شیب، لایه فاصله تا آبراهه با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۲۹۳/۵ متر، لایه فاصله تا گسل با دامنه مقادیر ۰/۰ تا ۴۱۸۰/۰ متر و لایه فاصله تا جاده با



شکل ۳- لایه‌های موضوعی مرتبط با عوامل علی دارای مقادیر ثانویه (طبقه‌بندی شده): (الف) کاربری اراضی طبقه‌بندی شده، (ب) زمین‌شناسی طبقه‌بندی شده و (ج) طبقات ارتفاعی موزون

Figure 3- The schematic layers related to causal factors with secondary values (classified): (a) Reclassified land use, (b) Reclassified lithological map, and (c) Reclassified altitude



شکل ۴- لایه‌های موضوعی مرتبط با عوامل علی دارای مقادیر اولیه (طبقه‌بندی نشده): (الف) بارندگی متوسط سالانه، (ب) زاویه شیب، (ج) جهت شیب، (د) فاصله تا آبراهه، (ه) فاصله تا گسل و (و) فاصله تا جاده

Figure 4- The schematic layers related to causal factors with primary values (unclassified): (a) Mean annual rainfall, (b) Slope angle, (c) Slope aspect, (d) Distance to stream, (e) Distance to fault, and (f) Distance to road

جدول ۲- ماتریس مقایسات زوجی، اوزان شاخص‌ها و نسبت سازگاری قضاوت‌ها

Table 2- The pairwise comparison matrix, the weights of the attributes, and the consistency ratio of judgments

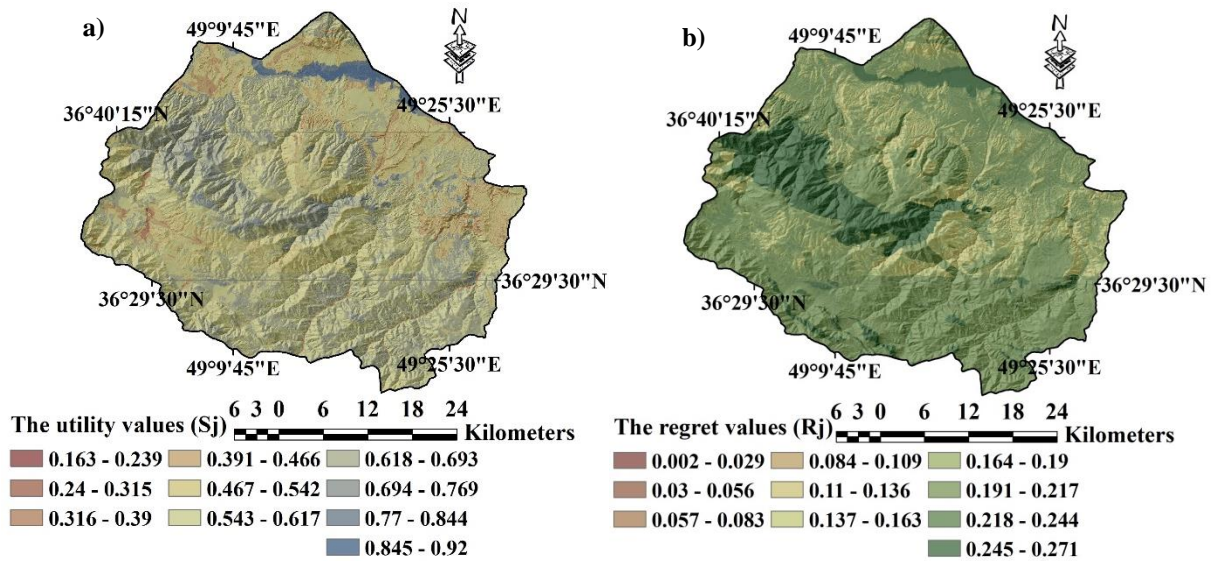
شاخص (کاربری اراضی) Attribute (Land Use)		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
نوع (Type)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
کشت آبی	1	0.442							
کشت دیم	0.31 1	0.248							
اراضی لخت (اراضی صخره‌ای)	0.12 0.12 1	0.029		0.098		1.110		0.089	
جنگل	0.27 0.34 7.47 1	0.117							
اراضی مرتعی	0.29 0.38 7.91 2.26 1	0.163							
شاخص (ارتفاع) Attribute (Elevation)		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
طبقه / Class (m)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
0-500	1	0.080							
500-1000	2.29 1	0.112							
1000-1500	2.09 2.21 1	0.154		0.073		1.250		0.058	
1500-2000	2.19 2.62 2.39 1	0.234							
2000-2500	3.86 3.37 2.92 2.27 1	0.392							
2500-3000	0.17 0.16 0.16 0.15 0.13 1	0.027							
شاخص‌ها Attributes		وزن Weight		نمایه سازگاری CI		نمایه ناسازگاری تصادفی RI		نسبت سازگاری CR	
نام (Name)	ماتریس تصمیم (Decision matrix)								
سنگ‌شناسی	1	0.271							
درجه شیب	0.42 1	0.226							
جهت شیب	0.35 0.36 1	0.100		0.073		1.450		0.051	
بارندگی	0.25 0.30 0.46 1	0.082							
فاصله تا گسل	0.16 0.15 0.30 0.30 1	0.030		0.073		1.450		0.051	
فاصله تا آبراهه	0.16 0.16 0.33 0.31 2.11 1	0.037							
فاصله تا جاده	0.15 0.13 0.27 0.27 0.46 0.46 1	0.024		0.073		1.450		0.051	
ارتفاع	0.23 0.17 0.38 0.34 3.47 2.37 3.27 1	0.058							
کاربری اراضی	0.41 0.42 2.61 3.29 5.82 6.14 4.96 4.37 1	0.170							

همخوان با این نتایج، این عوامل به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در نگاشت خطر زمین‌لغزش در دیگر مطالعات نیز معرفی شده‌اند (Pourghasemi et al., 2012; Bahrami et al., 2020; Salehpour Jam et al., 2023).

مقادیر سودمندی (S_j) و تاسف (R_j) شاخص‌ها و نیز، نزدیکی نسبی به راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (di^+) و منفی (di^-) به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده

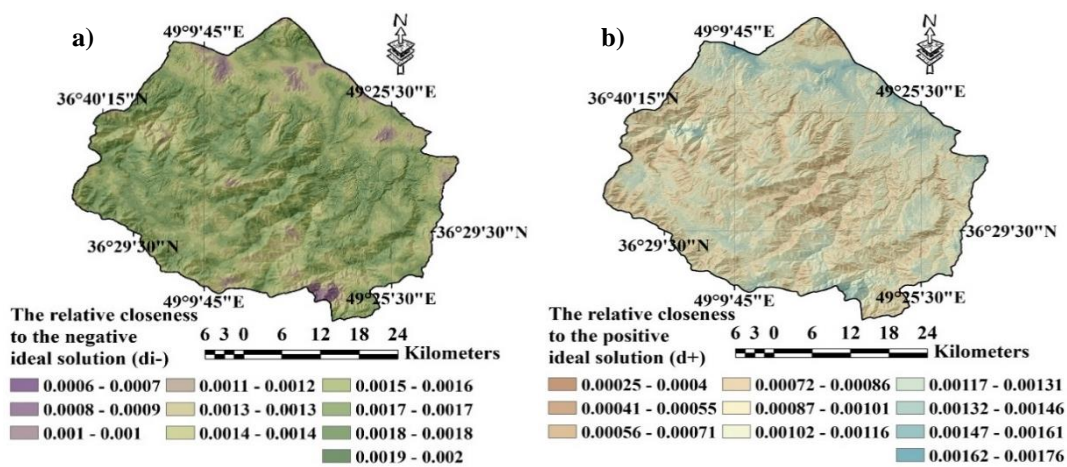
نتایج نشان می‌دهد که کشت آبی و دیم به ترتیب مهم‌ترین کاربری‌هایی هستند که باعث وقوع زمین‌لغزش می‌شوند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که از بین نه شاخص منتخب برای تولید نقشه خطر زمین‌لغزش، شاخص‌های سنگ‌شناسی و فاصله تا جاده بیشترین و کمترین وزن را از دیدگاه کارشناسان دارند. همچنین شاخص‌های سنگ‌شناسی، درجه شیب، کاربری اراضی و جهت شیب به ترتیب اهمیت اول تا چهارم را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲).

است. همچنین، مقادیر حدی آن‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- مقادیر سودمندی و تاسف شاخص‌ها: (الف) مقادیر سودمند (S_j) و (ب) مقادیر تاسف (R_j) (نقشه‌ها بدون بعد هستند)

Figure 5- The utility and regret values of the indicators: (a) the utility values (S_j) and (b) the regret values (R_j) (maps are dimensionless)

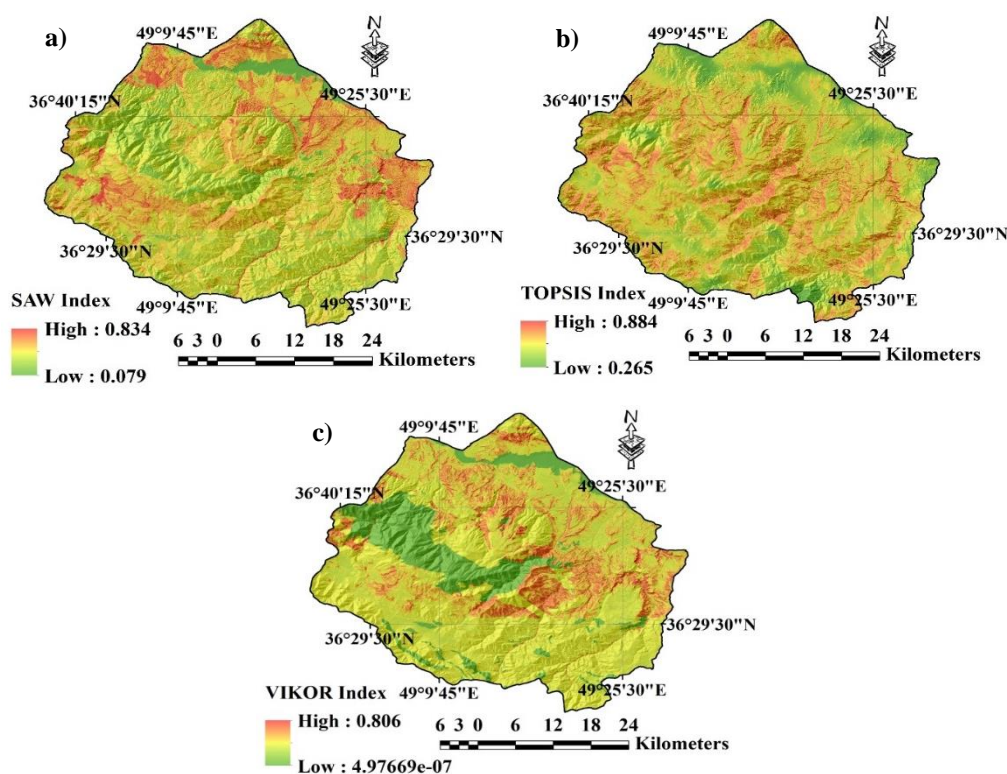


شکل ۶- نزدیکی نسبی به راه‌حل‌های ایده‌آل منفی و مثبت: (الف) راه‌حل ایده‌آل منفی (d_i^-) و (ب) راه‌حل ایده‌آل مثبت (d_i^+) (نقشه‌ها بدون بعد هستند)

Figure 6- The relative closeness to the negative and positive ideal solutions: (a) the negative ideal solution (d_i^-) and (b) the positive ideal solution (d_i^+) (maps are dimensionless)

مقادیر هر یک از شاخص‌ها از صفر تا یک متغیر است. همچنین، مقدار بالاتر هر شاخص به معنای حساسیت بیشتر در برابر وقوع زمین لغزش است.

نقشه‌های خطر زمین لغزش تولیدشده توسط روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه شامل AHP-TOPSIS، AHP-SAW و AHP-VIKOR در شکل ۷ ارائه شده است. لازم به توضیح است که دامنه



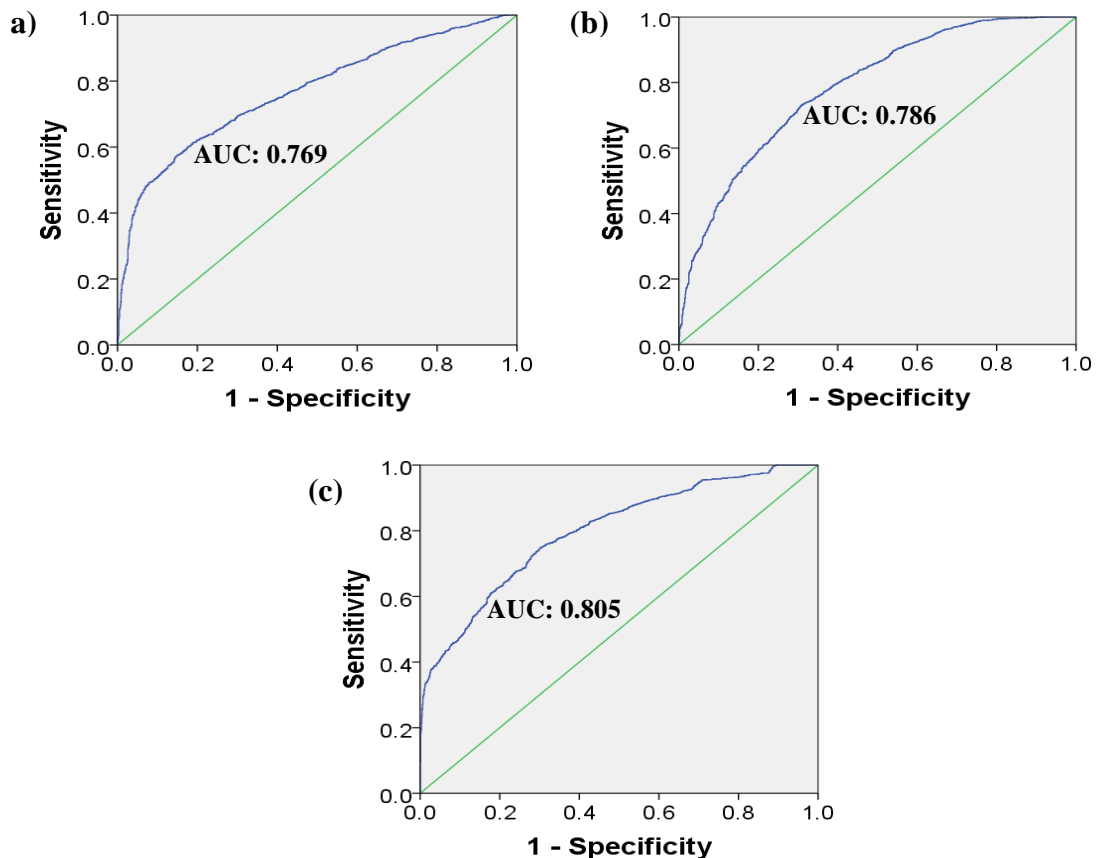
شکل ۷- لایه‌های خطر زمین‌لغزش تولید شده توسط روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه: (الف) روش SAW، (ب) روش

VIKOR و (ج) روش

Figure 7- Landslide hazard layers produced by MADM methods: (a) SAW method, (b) TOPSIS method, and (c), VIKOR method

محدوده پذیرش قابل قبول و عالی قرار دارند، به طوری که صحت روش‌های MADM برای SAW و TOPSIS، قابل قبول و برای روش VIKOR، عالی است؛ بنابراین، در این مطالعه، روش VIKOR به عنوان بهترین روش تولید نقشه خطر زمین‌لغزش معرفی می‌شود. همخوان با این نتایج، Salehpour و Jam و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که روش VIKOR مبتنی بر شاخص صحت‌سنجی AUC، از دقت بسیار بالایی (عالی) در تولید نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در آبخیز الموت برخوردار است. علاوه بر این، این روش به عنوان روشی مناسب برای تولید سایر نقشه‌های خطر نیز معرفی شده است (Sari, 2021; Ma et al., 2022).

منحنی‌های ROC و مقادیر AUC مربوط به روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر AUC روش SAW، ۰/۷۶۹، روش TOPSIS، ۰/۷۸۶ و روش VIKOR، ۰/۸۰۵ است. بر این اساس، روش‌های SAW و VIKOR به ترتیب دارای کمینه (۰/۷۶۹) و بیشینه (۰/۸۰۵) مقادیر AUC هستند (شکل ۸). بر اساس حدود قابل قبول ارائه شده توسط Hosmer و همکاران (۲۰۱۳)، محدوده مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۰/۷، ۰/۷ تا ۰/۸، ۰/۸ تا ۰/۹، و مساوی یا بزرگ‌تر از ۰/۹، به ترتیب نشان‌دهنده حدود پذیرش ضعیف، قابل قبول، عالی و کاملاً عالی در تائید صحت روش‌ها هستند. بر این اساس، تمامی نقشه‌های مشتق شده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه، در



شکل ۸- منحنی‌های ROC و مقادیر AUC روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه: (الف) SAW، (ب) TOPSIS و (ج) VIKOR

Figure 8- ROC curves and AUC values of MADM methods: (a) SAW, (b) TOPSIS, and (c) VIKOR

چندشاخصه در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین، مقادیر شاخص Qs و پارامترهای محاسباتی مربوطه در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر Qs به دست آمده برای روش SAW، ۰/۲۴۱، روش TOPSIS، ۰/۲۶۲ و روش VIKOR، ۰/۶۲۶ است (جدول ۳). در این ارتباط، روش‌های SAW و VIKOR به ترتیب دارای حداقل و حداکثر مقدار Qs هستند؛ بنابراین، مبتنی بر شاخص Qs، روش VIKOR به عنوان بهترین روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای تولید نقشه خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، مقادیر Dr طبقات مختلف خطر زمین لغزش محاسبه شده برای روش VIKOR، دارای یک روندی تقریباً صعودی از مناطق با خطر بسیار پایین به زمین لغزش (طبقه I) به سمت مناطق با خطر بسیار زیاد به

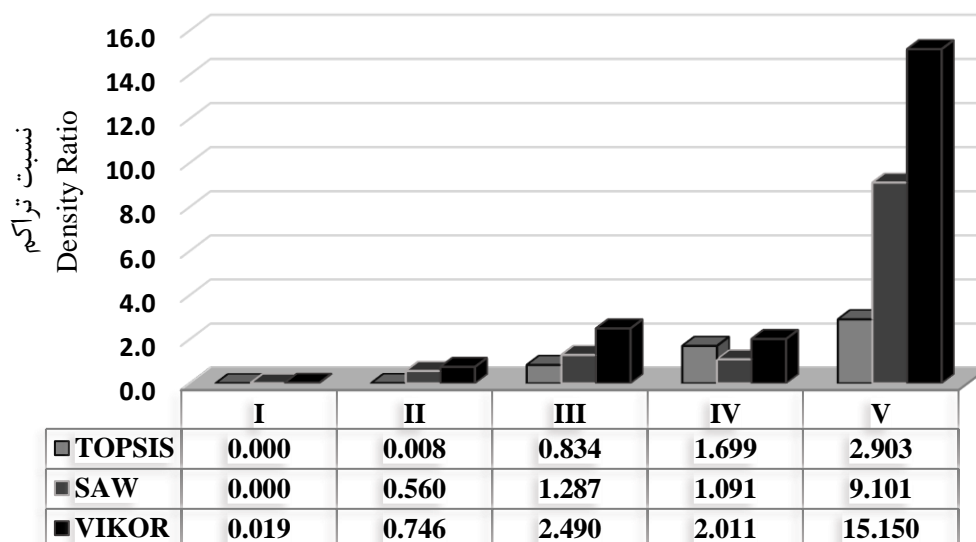
اعتبارسنجی روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه در این پژوهش نشان می‌دهد که این روش‌ها مانند سایر روش‌های کمی استفاده شده در نگاشت خطر زمین لغزش از قبیل رگرسیون لجستیک (Nhu *et al.*, 2020)، شبکه عصبی مصنوعی (Moayedi *et al.*, 2024)، منطق فازی (Nwazelibe *et al.*, 2023) و نسبت فراوانی (Asmare, 2023) از اعتبار قابل قبول و عالی در نگاشت خطر زمین لغزش برخوردارند. همچنین، در این مطالعه از شاخص‌های نسبت تراکم (Dr) و مجموع کیفیت (Qs) نیز برای مقایسه دقت روش‌ها استفاده شد. این شاخص‌ها از جمله شاخص‌های پرکاربرد برای تعیین صحت روش‌ها هستند (Roy *et al.*, 2019; Salehpour Jam *et al.*, 2023). مقادیر Dr طبقات مختلف حساسیت به زمین لغزش به دست آمده از روش‌های تصمیم‌گیری

زمین لغزش (طبقه V) هستند (شکل ۹). این روند نشان‌دهنده قابلیت بالای روش VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است (Pradhan & Lee, 2010).

جدول ۳- شاخص Qs و پارامترهای محاسباتی آن

Table 3- The Qs index and its computational parameters

روش Method	طبقه Class	مساحت کل زمین لغزش‌ها در هر منطقه خطر (هکتار) Si (ha)	مساحت منطقه خطر (هکتار) Ai (ha)	نسبت تراکم Dr	نسبت مساحت زمین لغزش در هر منطقه خطر به مساحت کل S	مجموع کیفیت Qs
SAW	I	0.000	2912.400	0.000	0.019	0.241
	II	53.402	54130.041	0.560	0.357	
	III	186.081	82102.141	1.287	0.541	
	IV	23.490	12233.490	1.091	0.081	
	V	3.970	247.760	9.101	0.002	
TOPSIS	I	0.000	583.190	0.000	0.004	0.262
	II	0.210	14031.510	0.008	0.093	
	III	139.750	95151.429	0.834	0.628	
	IV	123.244	41127.923	1.699	0.271	
	V	3.740	731.780	2.903	0.005	
VIKOR	I	0.781	23515.881	0.019	0.155	0.626
	II	122.818	93495.417	0.746	0.617	
	III	107.171	24451.320	2.490	0.161	
	IV	35.960	10155.296	2.011	0.067	
	V	0.213	7.980	15.150	0.000	



شکل ۹- نسبت تراکم (Dr) طبقات مختلف خطر زمین لغزش محاسبه شده برای روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه

Figure 9- The density ratio (Dr) of different landslide hazard classes calculated for MADM methods

مطالعات نیز، به‌عنوان روشی ساده و کارآمد برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش معرفی شده است (Ashournejad, 2019; Ercanoglu et al., 2021).

باید توجه داشت که روش SAW به کار رفته در این مطالعه که از صحت قابل‌قبولی در تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش برخوردار است (شکل ۸)، در دیگر

به‌طور کلی، نتایج ارزیابی روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی عملکرد، نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول (AHP-SAW و AHP-TOPSIS) و عالی (AHP-VIKOR) روش‌ها برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش است، به طوری که روش AHP-VIKOR به‌عنوان بهترین روش برای تولید نقشه خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

عدم وجود نقشه به‌روز پراکنش زمین لغزش، مهمترین چالش پژوهش جاری است، به طوری که به‌روزرسانی این نقشه، زمان بسیاری را به خود اختصاص داد.

اگرچه نقشه پراکنش زمین لغزش در ارزیابی روش‌های MADM مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما عدم نیاز به استفاده از این نقشه‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری چندشاخصه به‌منظور تهیه نقشه‌های خطر زمین لغزش از نقاط قوت روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. با این حال، تعیین صحیح اوزان شاخص‌های علی از جمله چالش‌های مطرح در کاربست این روش‌ها است که برای بهبود فرایند محاسبه اوزان، استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی در AHP توصیه می‌شود. علاوه بر این، با توجه به حضور پهنه‌های با پتانسیل خطر زیاد تا خیلی زیاد زمین لغزش در این منطقه، برنامه‌ریزی با هدف مدیریت ریسک زمین لغزش قویاً پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، کاربست نقشه خطر زمین لغزش در برنامه‌ریزی برای آمایش سرزمین پیشنهاد می‌شود. همچنین، ارزیابی این روش‌ها همگام با ارزیابی دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه و نیز سایر روش‌های کمی نگاشت خطر زمین لغزش پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب پروژه تحقیقاتی با شناسه‌ی ۰-۱۵۸-۹۷۰-۰۰۸-۲۹-۲۹-۴ با حمایت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین و نیز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به انجام رسیده است.

همچنین، اگرچه روش SAW، یک روش وزن‌دهی ساده مبتنی بر نرمال‌سازی داده‌های ماتریس تصمیم، تعیین اوزان شاخص‌ها و جمع‌بندی شاخص‌ها بر اساس روش میانگین وزنی است (Papathanasiou & Ploskas, 2018)، اما از کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی‌های زیست‌محیطی نیز برخوردار است (Mosaffaie et al., 2021).

با توجه به اینکه روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بر اساس ویژگی‌های مناطق مختلف ممکن است در طبقات مختلفی از حدود قابل قبول AUC در مرحله اعتبارسنجی قرار گیرند (Akay, 2021; Khalil et al., 2022; Salehpour Jam et al., 2023)، اعتبارسنجی هم‌زمان آن‌ها در مناطق دیگر برای انتخاب بهترین روش توصیه می‌شود. همچنین، اعتبارسنجی هم‌زمان این روش‌ها همگام با سایر روش‌های نگاشت زمین لغزش به‌منظور انتخاب بهترین روش، پیشنهاد می‌شود.

نقشه خطر زمین لغزش به دست آمده از روش VIKOR نشان می‌دهد که ۱۱۷۰۱۱/۳۰ هکتار (۷۷/۱۷ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر خیلی کم تا کم، ۲۴۴۵۱/۳۲ هکتار (۱۶/۱۳ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر متوسط و ۱۰۱۶۳/۲۸ هکتار (۶/۷۰ درصد) از منطقه دارای پتانسیل خطر زیاد تا خیلی زیاد است (جدول ۳). همچنین، با توجه به حضور پهنه‌های با خطر زیاد تا خیلی زیاد در منطقه مورد مطالعه، برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک زمین لغزش قویاً برای منطقه توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه از پرکاربردترین روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه مشتمل بر AHP-SAW، AHP-TOPSIS و AHP-VIKOR برای تولید نقشه‌های خطر زمین لغزش مبتنی بر تحلیل‌های رستمینا استفاده شد.

همکار در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، صمیمانه سپاسگزاری و قدردانی می‌کنند.

نویسندگان بدین‌وسیله از کارشناسان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین و نیز کارکنان

References

- Abella, E. A. C., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94(3-4), 453-466. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.038>
- Achu, A. L., Aju, C. D., Di Napoli, M., Prakash, P., Gopinath, G., Shaji, E., & Chandra, V. (2023). Machine-learning based landslide susceptibility modelling with emphasis on uncertainty analysis. *Geoscience Frontiers*, 14(6), 101657. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101657>
- Achu, A. L., & Reghunath, R. (2017). Application of analytical hierarchy process (AHP) for Landslide Susceptibility Mapping: A study from southern Western Ghats, Kerala, India. In Proceedings of the 3rd Disaster, Risk and Vulnerability Conference (pp. 33-41).
- Akay, H. (2021). Flood hazards susceptibility mapping using statistical, fuzzy logic, and MCDM methods. *Soft Computing*, 25(14), 9325-9346. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05903-1>
- Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*, 9(1), 93-106. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0283-7>
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58, 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Andriani, A., Adji, B. M., Putri, E. E., & Safira, L. F. (2024). Assessment of factors causing landslides using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, 4(1), 51-64. <https://doi.org/10.51662/jiae.v4i1.127>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Sohrabi, M., & Kalantari, Z. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using numerical risk factor bivariate model and its ensemble with linear multivariate regression and boosted regression tree algorithms. *Journal of Mountain Science*, 16(3), 595-618. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5168-y>
- Ashournejad, Q., Hosseini, A., Pradhan, B., & Hosseini, S. J. (2019). Hazard zoning for spatial planning using GIS-based landslide susceptibility assessment: a new hybrid integrated data-driven and knowledge-based model. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4236-0>
- Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern ethiopia. *Scientific African*, 19, e01470. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470>
- Basu, T., & Pal, S. (2020). A GIS-based factor clustering and landslide susceptibility analysis using AHP for Gish River Basin, India. *Environment, development and sustainability*, 22, 4787-4819. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00406-4>
- Bhagya, S. B., Sumi, A. S., Balaji, S., Danumah, J. H., Costache, R., Rajaneesh, A., Gokul, A., Chandrasenan, C. P., Quevedo, R. P., Johny, A., & Sajinkumar, K. S. (2023). Landslide susceptibility assessment of a part of the Western Ghats (India) employing the AHP and F-AHP models and comparison with existing susceptibility maps. *Land*, 12(2), 468. <https://doi.org/10.3390/land12020468>
- Bragagnolo, L., Da Silva, R. V., & Grzybowski, J. M. V. (2020). Artificial

- neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. *Catena*, 184, 104240. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104240>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., Van Liem, N., & Trinh, P. T. (2020). Comparing the prediction performance of a Deep Learning Neural Network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. *Catena*, 188, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426>
- Chen, W., Li, W., Chai, H., Hou, E., Li, X., & Ding, X. (2016). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4795-7>
- Chen, W., Peng, J., Hong, H., Shahabi, H., Pradhan, B., Liu, J., & Duan, Z. (2018). Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Science of the total environment*, 626, 1121-1135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.124>
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, 64(1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Díaz, S. R., Cadena, E., Adame, S., & Dávila, N. (2020). Landslides in Mexico: their occurrence and social impact since 1935. *Landslides*, 17(2), 379-394. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01285-6>
- Ercanoglu, M., Balcılar, M., Aydın, F., Aydemir, S., Deveci, G., & Çintimur, B. (2021). ARAS: a web-based landslide susceptibility and hazard mapping system. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Volume 5 Catastrophic Landslides and Frontiers of Landslide Science* 5th, 301-307. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60319-9_33
- GEE, M. D. (1992). *Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability*. In International symposium on landslides (pp. 947-952).
- Hong, H., Liu, J., Bui, D. T., Pradhan, B., Acharya, T. D., Pham, B. T., ..., & Ahmad, B. B. (2018). Landslide susceptibility mapping using J48 Decision Tree with AdaBoost, Bagging and Rotation Forest ensembles in the Guangchang area (China). *Catena*, 163, 399-413. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.005>
- Hosmer Jr, D.W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R.X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Huang, J., Wu, X., Ling, S., Li, X., Wu, Y., Peng, L., & He, Z. (2022). A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 86954-86993. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23732-z>
- Hwang, C.L., & Yoon, K., (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making*, 58-191. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Jena, R., & Pradhan, B. (2020). Integrated ANN-cross-validation and AHP-TOPSIS model to improve earthquake risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101723. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101723>
- Karimpour Reyhan, M., Salehpour Jam, A., Kianian, M. K., & Jahani, D. (2007). Investigation of pedological criterion on land degradation in quaternary rock units (case study: Rude-Shoor watershed area). *DESERT*, 12(1), 77-84.
- Khalil, U., Imtiaz, I., Aslam, B., Ullah, I., Tariq, A., & Qin, S. (2022). Comparative analysis of machine learning and multi-criteria decision making techniques for landslide susceptibility mapping of Muzaffarabad district. *Frontiers in*

- Environmental Science*, 10, 1028373. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1028373>
- Khan, A. N., Collins, A. E., & Qazi, F. (2011). Causes and extent of environmental impacts of landslide hazard in the Himalayan region: a case study of Murree, Pakistan. *Natural Hazards*, 57, 413-434. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9621-7>
- Ma, Y., Guga, S., Xu, J., Liu, X., Tong, Z., & Zhang, J. (2022). Assessment of maize drought risk in Midwestern Jilin Province: A comparative analysis of TOPSIS and VIKOR models. *Remote Sensing*, 14(10), 2399. <https://doi.org/10.3390/rs14102399>
- Mao, Y., Li, Y., Teng, F., Sabonchi, A. K., Azarafza, M., & Zhang, M. (2024). Utilizing hybrid machine learning and soft computing techniques for landslide susceptibility mapping in a Drainage Basin. *Water*, 16(3), 380. <https://doi.org/10.3390/w16030380>
- Meena, S. R., Mishra, B. K., & Tavakkoli Piralilou, S. (2019). A hybrid spatial multi-criteria evaluation method for mapping landslide susceptible areas in kullu valley, himalayas. *Geosciences*, 9(4), 156. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040156>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>
- Miao, F., Zhao, F., Wu, Y., Li, L., & Török, Á. (2023). Landslide susceptibility mapping in Three Gorges Reservoir area based on GIS and boosting decision tree model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02394-4>
- Moayedi, H., Xu, M., Naderian, P., Dehrashid, A. A., & Thi, Q. T. (2024). Validation of four optimization evolutionary algorithms combined with artificial neural network (ANN) for landslide susceptibility mapping: A case study of Gilan, Iran. *Ecological Engineering*, 201, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107214>
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., & Sarfaraz, F. (2023). Landslide risk assessment based on susceptibility and vulnerability. *Environment, Development and Sustainability*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03093-4>
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R., & Kousari, M. R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land use policy*, 100, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>
- Naceur, H. A., Abdo, H. G., Igmoullan, B., Namous, M., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., & Al-Mutiry, M. (2022). Performance assessment of the landslide susceptibility modelling using the support vector machine, radial basis function network, and weight of evidence models in the N'fis river basin, Morocco. *Geoscience Letters*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00249-4>
- Nhu, V.H., Shirzadi, A., Shahabi, H., Singh, S. K., Al-Ansari, N., Clague, J.J., ..., & Ahmad, B. B. (2020). Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2749. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082749>
- Nwazelibie, V. E., Unigwe, C. O., & Egbueri, J. C. (2023). Testing the performances of different fuzzy overlay methods in GIS-based landslide susceptibility mapping of Udi Province, SE Nigeria. *Catena*, 220, 106654.

- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106654>
- Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of civil engineering, Belgrade, 2(1), 5-21.
- Ozdemir, A. (2020). A comparative study of the frequency ratio, analytical hierarchy process, artificial neural networks and fuzzy logic methods for landslide susceptibility mapping: Taşkent (Konya), Turkey. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4129-4157. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01284-8>
- Ozioko, O. H., & Igwe, O. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping using heuristic and bivariate statistical methods for Iva Valley and environs Southeast Nigeria. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7951-9>
- Papathanasiou, J., & Ploskas, N. (2018). *Multiple criteria decision aid. In Methods, Examples and Python Implementations*, Vol. 136. Springer.
- Parkash, S. (2023). Lessons learned from landslides of socio-economic and environmental significance in India. *In Progress in Landslide Research and Technology*, Volume 1 Issue 2, 2022 (pp. 309-315). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18471-0_23
- Peyrowan, H. R., & Shariat Jafari, M. (2013). Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2013.101843> (In Persian)
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., & Fatemi Aghda, S.M. (2013). Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69, 749-779. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0728-5>
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63, 965-996. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>
- Pourghasemi, H.R., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162, 177-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022>
- Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2017). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2), 609-633. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1919-2>
- Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Amiri, M., Eskandari, S., & Santosh, M. (2021). Landslide susceptibility assessment and mapping using state-of-the art machine learning techniques. *Natural Hazards*, 108(1), 1291-1316. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04732-7>
- Pourghasemi, H. R., Teimoori Yansari, Z., Panagos, P., & Pradhan, B. (2018). Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3531-5>
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 747-759. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016>
- Roy, J., Saha, S., Arabameri, A., Blaschke, T., & Bui, D. T. (2019). A novel ensemble approach for landslide susceptibility mapping (LSM) in Darjeeling and

- Kalimpong districts, West Bengal, India. *Remote Sensing*, 11(23), 2866. <https://doi.org/10.3390/rs11232866>
- Saaty, T. L. (2012). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation*. RWS publications, USA.
- Saaty, T. L., & Peniwati, K. (2013). *Group decision making: drawing out and reconciling differences*. RWS publications.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Sarfaraz, F., Shadfar, S., & Akhtari, R. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Natural Hazards*, 108, 1025-1046. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04718-5>
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., & Tabatabaei, M. R. (2023). Raster-based landslide susceptibility mapping using compensatory MADM methods. *Environmental Modelling & Software*, 159, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105567>
- Salehpour Jam, A., Peyrowan, H. R., Tabatabaei, M. R., Sarreshtehdari, A., & Mosaffaie, J. (2019). An assessment of the land degradation potential using the TOPSIS method (Case study: rangelands overlooking the city of Eshtehard, the province of Alborz). *Watershed Management Research Journal*, 32(4), 79-93. <https://doi.org/10.22092/WMEJ.2019.126535.1227> (In Persian)
- Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644>
- Sharma, N., Saharia, M., & Ramana, G. V. (2024). High resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning and geospatial big data. *Catena*, 235, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107653>
- Sheikh, V., Kornejady, A., & Ownegh, M. (2019). Application of the coupled TOPSIS–Mahalanobis distance for multi-hazard-based management of the target districts of the Golestan Province, Iran. *Natural Hazards*, 96, 1335-1365. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03617-0>
- Thakur, D. A., & Mohanty, M. P. (2023). A synergistic approach towards understanding flood risks over coastal multi-hazard environments: Appraisal of bivariate flood risk mapping through flood hazard, and socio-economic-cum-physical vulnerability dimensions. *Science of the Total Environment*, 901, 166423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166423>
- Tomashevskii, I., & Tomashevskii, D. (2021). A non-heuristic multicriteria decision-making method with verifiable accuracy and reliability. *Journal of the Operational Research Society*, 72(1), 78-92. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1650621>
- Triantaphyllou, E., Shu, B., Sanchez, S.N., & Ray, T. (1998). Multi-criteria decision making: an operations research approach. *Encyclopedia of electrical and electronics engineering*, 15(1998), 175-186.
- Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Nikolakopoulos, K., Angelitsa, V., & Iliia, I. (2018). Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7548-6>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30, 399-419.

- <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.00000007097.42735.9e>
- Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Pham, Q. B., Lee, S., Arshad, A., & Anh, D.T. (2021). Comparison of multi-criteria-analytical hierarchy process and machine learning-boosted tree models for regional flood susceptibility mapping: a case study from Slovakia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1153-1180. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1912835>
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>
- Zhu, A. X., Miao, Y., Liu, J., Bai, S., Zeng, C., Ma, T., & Hong, H. (2019). A similarity-based approach to sampling absence data for landslide susceptibility mapping using data-driven methods. *Catena*, 183, 104188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104188>

Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators

Sadaf Piri, Hamidreza Moradi*, Vahid Mousavi

Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding author: harmoradi@modares.ac.ir

(Received: 27 May 2024

Revised: 05 August 2024

Accepted: 30 November 2024)

Extended Abstract

Introduction: Dust storms are a consequence of desertification and land degradation, particularly in arid and hyper-arid regions worldwide. The factors influencing the spatial distribution of dust storms are largely dependent on altitude and latitude. Among natural disasters, droughts stand out as climatic anomalies that develop gradually and insidiously, exerting pressure on various societies. Drought can significantly affect the conditions and characteristics of dust storms. The primary objectives of this research are to examine the temporal and spatial distribution of dust storms in Ilam and Khuzestan provinces, and to explore the relationship between meteorological drought characteristics and the occurrence of dust storms in these regions.

Materials and Methods: This study investigates the temporal and spatial variations of dust storms and the impact of drought characteristics on them during the statistical period of 1989-2019. The characteristics of drought were identified using the Standardized Precipitation Index (SPI) method. Dust storm data were extracted from synoptic station records related to the horizontal visibility on dusty days. Monthly, seasonal, and annual distributions of dust storms were analyzed. The trends in dust storms, precipitation, and temperature changes were determined using the Mann-Kendall method and Sen's slope estimator. Additionally, satellite images from the MODIS sensor were analyzed for days associated with dust storms, and the Aerosol Optical Depth (AOD) and Normalized Difference Dust Index (NDDI) were derived. The relationship between drought characteristics and dust storm characteristics was then assessed using correlation and linear regression analyses, and the effects of drought on dust storm occurrences were examined.

Results and Discussion: The years 1990, 1995, 2007, 2008, 2010, 2011, and 2017 experienced widespread droughts, with 2008 recording the highest drought intensity and extent. Meteorological data indicated that January and August, as well as the winter and autumn seasons, had the highest and lowest incidences of dust storms, respectively. According to the AOD index, April and December, and the spring and autumn seasons, exhibited the highest and lowest dust storm occurrences, respectively. During the studied period, the frequency of dust storms increased at 11 stations and decreased at 8 stations. The trend of maximum temperature was upward at all stations, while minimum temperature trends were upward at most stations. Precipitation trends were generally decreasing across the studied stations. The NDDI index provided a good estimate of regional dustiness, although in some cases, the index data did not align with ground observations and contained significant errors. Statistical tests revealed correlations between maximum temperature, minimum temperature, and precipitation data. However, the AOD index generally showed no correlation with other variables.

Conclusion: The analysis of the relationship between drought characteristics and dust storms indicated that 2008 saw the most frequent and severe dust storms, as well as the most widespread drought, though this trend was not consistent in other years with widespread droughts. Comparing Ilam and Khuzestan provinces, it was observed that southwest Ilam, which borders Khuzestan, shares similar dust storm characteristics due to comparable topography and climatic conditions. Overall, there is a significant difference in the intensity and frequency of dust storms between the two provinces, largely due to Ilam's mountainous terrain, especially in its central and northern regions. Additionally, it appears that the primary source of dust storms in the region originates from neighboring countries southwest of Iran. The flatness of the Khuzestan plain also contributes significantly to the intensity of wind activity, leading to higher frequency and severity of dust storms.

Keywords: SPI index, NDDI index, AOD index, drought characteristics.

Citation: Piri, S., Moradi, H.R. & Mousavi, V. (2025). Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 25-50. doi= 10.22034/iwm.2024.2029264.1155

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>).





ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری

صدف پیری، حمیدرضا مرادی*، وحید موسوی

گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: hmradi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

چکیده مبسوط

مقدمه: طوفان‌های گردوغبار یکی از اثرات بیابان‌زایی و تخریب زمین به‌ویژه در مناطق خشک و فراخشک جهان می‌باشد. عوامل تأثیرگذار در توزیع مکانی پدیده طوفان گردوغبار اکثراً ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. از سوی دیگر، در میان بلایای طبیعی مؤثر بر جامعه انسانی، پدیده خشکسالی به‌عنوان یک ناهنجاری اقلیمی به‌صورت تدریجی و خزنده رخ داده و جوامع مختلف را تحت فشار قرار می‌دهد. این پدیده می‌تواند بر شرایط وقوع و مشخصات طوفان گردوغبار نقش موثری داشته باشد. لذا مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از بررسی توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان و بررسی ارتباط بین مشخصات خشکسالی هواشناسی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر، تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار و اثر مشخصات خشکسالی روی آن‌ها طی دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، مشخصات خشکسالی با استفاده از روش SPI استخراج شد. سپس از طریق داده‌های ایستگاه‌های هم‌دید مربوط به دید افقی، روزهای همراه با گردوغبار استخراج شد. توزیع زمانی طوفان گردوغبار به صورت ماهانه، فصلی و سالانه انجام شد. تعیین روند تغییرات طوفان گردوغبار، بارش و دما با استفاده از روش من کندال و شیب Sen انجام شد. در ادامه تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنجنده MODIS برای روزهای همراه با وقوع طوفان گردوغبار دریافت و شاخص‌های شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) و شاخص اختلاف نرمال شده‌ی گردوغبار (NDDI) که مربوط به طوفان‌های گردوغبار هستند، استخراج گردید. سپس ارتباط بین مشخصات خشکسالی و ویژگی‌های طوفان گردوغبار با روش‌های آماری همبستگی و رگرسیون خطی بررسی و اثرات مشخصات خشکسالی بر وقوع این طوفان‌ها تحلیل شد.

نتایج و بحث: سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ دارای خشکسالی فراگیر بوده‌اند که در این میان سال ۲۰۰۸ با بیشترین میزان شدت و سطح گسترش خشکسالی روبرو بوده است. بر اساس داده‌های هواشناسی ماه‌های ژانویه و آگوست و فصل‌های زمستان و پاییز به‌ترتیب بیشترین و کمترین وقوع طوفان گردوغبار را داشته‌اند. بر اساس شاخص AOD ماه‌های آوریل و دسامبر و فصل‌های بهار و پاییز به‌ترتیب بیشترین و کمترین وقوع طوفان گردوغبار را داشته‌اند. روند فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در طی دوره آماری مورد مطالعه در ۱۱ ایستگاه صعودی و در ۸ ایستگاه نزولی بوده است. روند دمای بیشینه در تمام ایستگاه‌ها و دمای کمینه در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه صعودی است. در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه روند بارش به صورت کاهشی می‌باشد. شاخص NDDI نیز برآورد خوبی از وضعیت کلی غبارآلودی منطقه دارد؛ اما در پاره‌ای از موارد داده‌های حاصل از این شاخص، با واقعیت زمینی هم‌خوانی ندارد و با خطاهای فاحشی همراه است. در نهایت آزمون‌های آماری نشان دادند که بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش همبستگی وجود دارد. شاخص AOD در اکثر موارد با سایر متغیرها فاقد همبستگی است.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از ارتباط مشخصات خشکسالی با طوفان گردوغبار نشان داد بیشترین وقوع طوفان گردوغبار و همچنین شدیدترین خشکسالی فراگیر در سال ۲۰۰۸ رخ داده است، اما این موضوع در خصوص دیگر سال‌های همراه با خشکسالی فراگیر صدق نمی‌کند. در مقایسه دو استان ایلام و خوزستان، ملاحظه می‌گردد که جنوب‌غرب ایلام که در همسایگی با استان خوزستان است به دلیل همگنی شرایط توپوگرافی و وضعیت اقلیمی از مشخصات طوفان‌های گردوغبار استان خوزستان بیشتر تبعیت می‌کند. در مجموع بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در هر دو استان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت فاحش به شرایط کوهستانی بودن استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه، از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. علاوه بر این، هموار بودن دشت خوزستان بر شدت فعالیت باد و در نتیجه فراوانی و شدت وقوع طوفان گردوغبار در این منطقه تأثیر فراوانی می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: شاخص SPI، شاخص NDDI، شاخص AOD، مشخصات خشکسالی.

استناد: پیری، ص؛ مرادی، ح. ر؛ موسوی، و. (۱۴۰۴). ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، (۲)۵، ۵۰-۲۵.

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 قابل دسترس است.

مقدمه

خشکسالی^۱ به عنوان بلای طبیعی و پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر، از دیرباز در پهنه وسیع کشورهای مختلف به خصوص کشورهای واقع در مناطق گرم و خشک به دفعات وقوع یافته و می‌یابد (Heim, 2002). ویژگی‌های خشکسالی در اقلیم‌های مختلف، متفاوت و یک معضل موقت است. خشکسالی نتیجه کاهش طبیعی میزان بارش در مدت زمانی طولانی و معمولاً در یک فصل یا بیشتر است. به طور مسلم یکی از زمینه‌هایی که خشکسالی در آن تأثیر اساسی می‌گذارد، منابع آب سطحی و زیرزمینی هر کشوری است (Nohegara et al., 2016).

وقوع خشکسالی منجر به افزایش پدیده گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است. طوفان‌های گردوغبار^۲ ناشی از مناطق فرسایش‌پذیر سطحی مانند بیابان‌ها در سال‌های اخیر از اصلی‌ترین بلایای طبیعی هستند که کشورهای منطقه خاورمیانه از جمله ایران با آن درگیر می‌باشند (Soleimani et al., 2022).

سنجش‌ازدور^۳، فرآیند گردآوری اطلاعات مربوط به سطح زمین از فاصله دور با استفاده از تصاویر هوایی یا ماهواره‌ای است. یکی از مزایای اصلی سنجش‌ازدور این است که امکان پوشش گسترده و به‌هنگام را فراهم می‌کند. ماهواره‌ها و هواپیماها می‌توانند تصاویری از مناطق بزرگ را ثبت کنند و دید جامعی از سطح زمین فراهم آورند که با روش‌های سنتی زمینی امکان‌پذیر نیست. همچنین راهی غیرمخرب برای جمع‌آوری اطلاعات محسوب می‌شود. این بدان معنی است که نیازی به دسترسی فیزیکی به سطح زمین ندارد و ابزاری مفید برای پایش نواحی حساس یا صعب‌العبور به شمار می‌آید. شاخص عمق نوری آئروسول^۴ (AOD) و شاخص اختلاف نرمال شده‌ی گردوغبار^۵ (NDDI)

نیز بر اساس مشاهدات حاصل از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌گردند. این شاخص‌ها به ارزیابی وضعیت ذرات گردوغبار موجود در جو می‌پردازند. AOD یک اندازه‌گیری یکپارچه ستونی از ضریب خاموشی می‌باشد که تضعیف تابش خورشیدی توسط پراکندگی و جذب آئروسول‌ها از جمله گردوغبار را نشان می‌دهد (Namdari et al., 2017). این شاخص یک کمیّت بدون بعد است و عبارت است از مقدار جلوگیری از گذر پرتو نور در جو به خاطر جذب و انتشار حاصل از وجود گردوغبار در مسیر عبور نور (Arjmand et al., 2018). بیشتر بودن مقادیر AOD از یک مقدار معین بیانگر تراکم گردوغبار در امتداد ستون عمودی هوا بوده و به عبارتی دید در امتداد آن ستون پایین می‌باشد. همچنین این شاخص از نظر دقت در تشخیص و محدوده زمانی و مکانی، امکان پایش زمانی و مکانی را در گستره‌ی زیاد و در بسیاری از مناطق فراهم می‌کند (Pan et al., 2010). اولین گام در شناسایی طوفان‌های گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، جداسازی آنها از دیگر پدیده‌های جوی مانند ابر است (Mehrabi et al., 2015). شاخص NDDI برای شناسایی ذرات گردوغبار در مناطقی با سطوح روشن استفاده می‌شود که محصولات عمق نوری گردوغبار MODIS در دسترس نیستند (John et al., 2006).

در سال‌های اخیر، فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در سطح جهانی و همچنین منطقه‌ای، به خصوص در غرب و جنوب‌غرب کشور ایران رو به افزایش بوده است. طوفان‌های گردوغبار از پدیده‌های هواشناسی هستند که معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک با بارش سالانه کمتر از ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در مواقع وزش تندبادهایی با سرعت بیش از سرعت آستانه فرسایش بادی رخ می‌دهند (Alipour et al., 2018). رخ دادن

4- Aerosol Optical Depth

5- Normalized Difference Dust Index

1- Drought

2- Dust storms

3- Remote sensing

(۲۰۲۲) فعالیت طوفان ماسه و گردوغبار و عوامل اقلیمی و زمینی آن در منطقه دریاچه آرال را با استفاده از شاخص EDI⁷ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که با خشکسالی منطقه‌ای، فعالیت‌های طوفان گردوغبار در طول ۲۰ سال گذشته افزایش یافته است (Wang *et al.*, 2022).

Ahmadi و Ali Mohammadi (۲۰۲۱) نیز برای پهنه‌بندی مناطق حساس به خشکسالی در استان کردستان با استفاده از ترکیب شاخص‌های EVI⁸ و SPI نشان دادند که خشکسالی ناشی از تغییرات بارشی دارای راستای غرب به شرق است و پدیده خشکسالی در مناطق شرقی شدت بیشتری دارد و مناطق جنوبی حساسیت بالاتری نشان داده‌اند که در مجموع، مناطق جنوبی، به‌ویژه جنوب‌شرق استان، بیشترین آسیب‌پذیری را از پدیده خشکسالی داشته‌اند (Ahmadi & Ali Mohammadi, 2021).

هر منطقه دارای مشخصات اقلیمی، هیدرولوژی و توپوگرافی خاص خود بوده که این مشخصات بر شرایط وقوع طوفان گردوغبار تأثیر دارد. به دلیل اثرات منفی که طوفان‌های گردوغبار بر بوم‌سازگان و سلامتی انسان دارند، بررسی مشخصات خشکسالی هواشناسی بر تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار از اهمیت زیادی برخوردار است و نقش مهمی در مدیریت و ساماندهی پدیده گردوغبار دارد. همچنین تحقیقی که بر اساس مشخصات خشکسالی و شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات زمانی و مکانی پدیده طوفان گردوغبار را بررسی نماید، در سطح ایران و جهان بسیار محدود می‌باشد. استان ایلام به دلیل نزدیکی به بیابان‌های کشورهای همسایه همواره در معرض نفوذ گردوغبار قرار دارد. هرچند تاکنون تلاش‌های فراوانی برای کنترل و کاهش ورود گردوغبارها انجام شده است؛ اما با نتیجه رضایت‌بخشی همراه نبوده و هر سال این پدیده خطرناک در مقیاس

این پدیده، تحت تأثیر سامانه‌های زمین و اتمسفر می‌باشد. به‌طوری که دلایل اصلی وقوع آن سرعت زیاد باد، کمبود رطوبت خاک و اراضی لخت بدون پوشش می‌باشد (Shamshiri *et al.*, 2014). مطالعات زیادی در استفاده از داده‌ها و روش‌های متنوع در زمینه ارزیابی روند تغییرات گردوغبار انجام پذیرفته است. به طور مثال Zucca و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی شواهد علمی در مورد سهم فعالیت‌های انسانی در تولید طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای در سطح جهانی بیان داشتند که فعالیت‌های انسانی در تغییر اقلیم اثرگذار هستند و می‌توانند به عنوان محرک‌های غیرمستقیم طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای در نظر گرفته شوند (Zucca *et al.*, 2022). همچنین Awadh (۲۰۲۳)، به بررسی تعیین علل افزایش فراوانی طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای و شناسایی منابع و راهکارهای کاهش آنها پرداخت. داده‌های اقلیمی دوره زمانی ۶۰ سال (۲۰۲۲-۱۹۶۰) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که افزایش دمای هوا در عراق (به طور متوسط ۲ درجه سانتی‌گراد)، طی ۶۰ سال گذشته موجب افزایش طوفان‌های گردوغبار از ۷۵ به ۲۰۰ واقعه در سال شده است (Awadh, 2023).

در مورد ارتباط پدیده خشکسالی و پدیده طوفان گردوغبار نیز مطالعاتی انجام شده است. Labban و Butt (۲۰۲۱) به تجزیه و تحلیل طوفان ماسه و گردوغبار در عربستان سعودی در رابطه با مؤلفه‌های هواشناسی و ENSO⁶ پرداختند. برای این منظور، داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴) از سازمان‌های مربوطه گردآوری و تحلیل شد. نتایج حاکی از تحلیل رویدادهای طوفان گردوغبار (SDS) در رابطه با دما، بارش و سرعت باد، نشان داد که SDS بیشترین همبستگی را با دما و کمترین همبستگی را با بارش دارند (Labban & butt., 2021). Wang و همکاران

8- Enhanced Vegetation Index

6- El Niño Southern Oscillation

7- Effective Drought Index

مناطق مختلف سردسیری، گرمسیری و معتدل را می‌توان در این استان مشاهده کرد (Statistical Yearbook of Ilam Province, 2011).

استان خوزستان در جنوب غرب ایران و در موقعیت جغرافیایی بین $29^{\circ}58'$ تا $33^{\circ}4'$ عرض شمالی از خط استوا و $47^{\circ}31'$ تا $50^{\circ}39'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. مساحت این استان 64057 کیلومتر مربع می‌باشد که در جنوب غربی ایران قرار دارد. شمال و شرق استان خوزستان را سلسله کوه‌های زاگرس فراگرفته است که به سمت جنوب غربی از ارتفاع آن کاسته شده تا نواحی جنوبی تر به صورت تپه‌ماهورهایی ظاهر می‌شود. مناطق کوهستانی عمدتاً در شمال و شرق استان قرار دارند و حدود دو پنجم مساحت کل استان را شامل می‌شوند. منطقه جلگه‌ای در استان خوزستان از جنوب دزفول، مسجدسلیمان، رامهرمز و بهبهان آغاز شده تا کرانه‌های خلیج فارس و اروندرود ادامه دارد (Statistical Yearbook of Khuzestan Province, 2014). موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. برای به دست آوردن تغییرات زمانی و مکانی رخداد طوفان‌های گردوغبار در دو استان مذکور، از داده‌های دید افقی و بارش ایستگاه‌های هم‌دید منطقه برای طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹) استفاده گردید. داده‌های دید به صورت روزانه و داده‌های بارش به صورت ماهانه تهیه شد. داده‌های مربوط به دید که برای تعیین طوفان گردوغبار در منطقه مورد استفاده قرار گرفته است بر اساس میانگین دید روزانه از طرف سازمان هواشناسی کشور در اختیار قرار گرفت؛ بنابراین در تعیین دید از کدهای هواشناسی استفاده نشده است. در این پژوهش همه ایستگاه‌های هم‌دید موجود در استان‌های ایلام و خوزستان مورد بررسی قرار گرفتند. ایستگاه‌هایی که دارای طول دوره آماری کوتاه‌مدت و داده‌های ناقص بودند، حذف شدند و در نهایت ۱۹ ایستگاه که دارای طول دوره آماری مناسبی بودند، مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). مراحل اجرای پژوهش

وسیع و با خطرات بیشتر تکرار می‌شود. همچنین استان خوزستان نیز به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص خود در معرض فرسایش بادی قرار دارد. بخش وسیعی از این استان را نهشته‌های آبرفتی جوان تشکیل می‌دهند که عمدتاً مربوط به دوره کواترنری است. بسیاری از رودخانه‌های این استان که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرند، عمدتاً دارای بار رسوبی زیادی هستند. در سال‌های اخیر با مهار گسترده این رودخانه‌ها و احداث سدهای متعدد بر روی آنها، آب رودخانه در پایین دست سد به طور طبیعی کاهش یافته و بخش زیادی از رودخانه خشک شده است. این شرایط سطح زمین را برای فرسایش بادی مستعد می‌کند و باد به راحتی می‌تواند رسوبات آبرفتی رودخانه‌های مختلف در خوزستان را برداشت و حمل کند (Pourali & Taghizadeh, 2011). از جمله عوامل موثر و تشدید کننده شرایط ذکر شده عامل خشکسالی است؛ بنابراین بررسی تأثیر خصوصیات خشکسالی بر وقوع طوفان گردوغبار می‌تواند بسیار کارا و برای مدیریت این پدیده ضروری باشد؛ لذا مهمترین اهداف پژوهش حاضر شامل ۱. بررسی توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان ۲. بررسی ارتباط بین مشخصات خشکسالی هواشناسی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

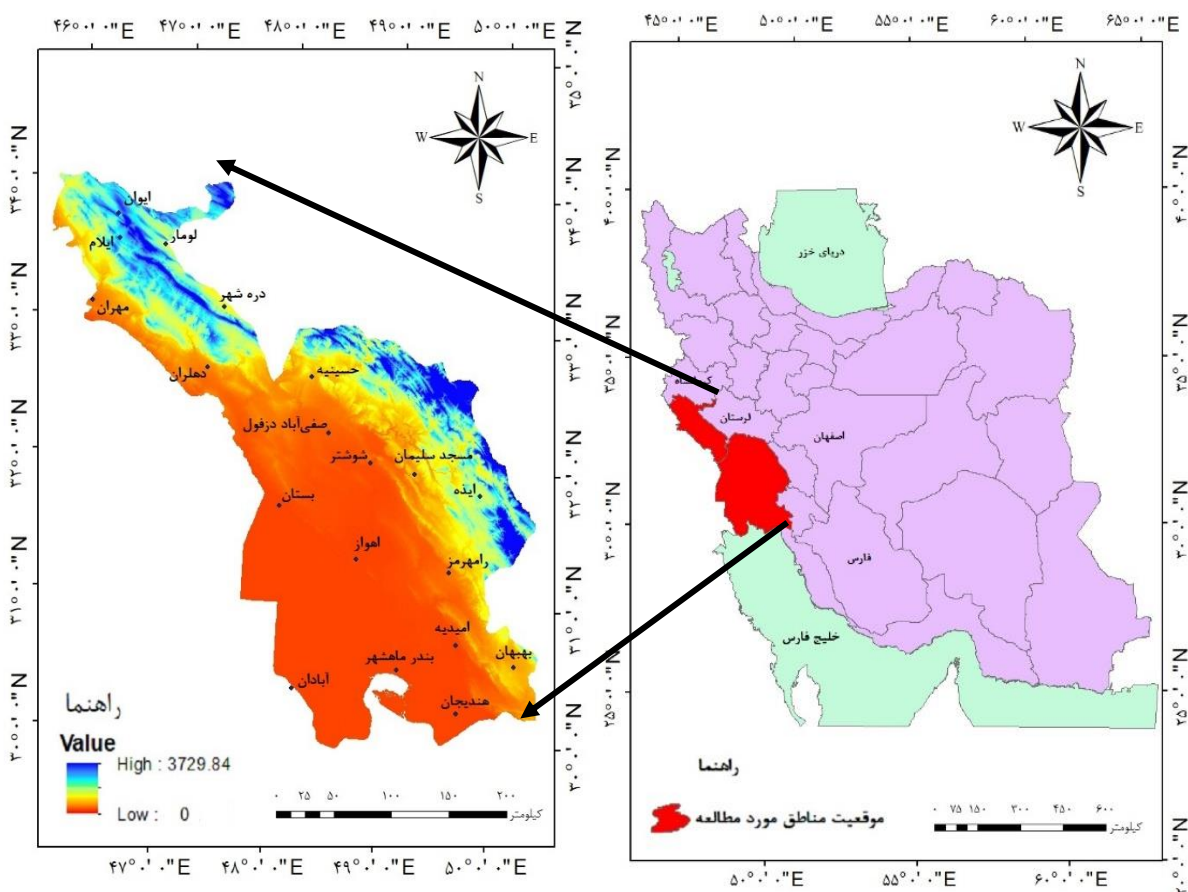
استان ایلام در غرب سلسله کوه‌های زاگرس بین $31^{\circ}58'$ تا $34^{\circ}15'$ عرض شمالی از خط استوا و $45^{\circ}44'$ تا $48^{\circ}10'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ در گوشه‌ی غربی کشور واقع شده است. از لحاظ زمین‌شناسی، این منطقه در بخشی از زاگرس چین‌خورده قرار دارد که روند کلی آن هم‌راستا با زون روآندگی هاست. مرز شمال شرقی آن محدود به زاگرس روآنده، و مرز جنوب غربی آن محدود به استان خوزستان و کشور عراق است. از نظر شرایط اقلیمی،

سنجنده که روی دو ماهواره اکوا و ترا نصب شده است، به منظور تعیین ویژگی‌های رخداد گردوغبار و پایش آن استفاده می‌شود (Zhao, 2012). سنجنده MODIS با در اختیار داشتن ۳۶ باند طیفی مختلف از محدوده ۰/۴۱۵ میکرومتر مرئی تا ۱۴/۲۳۵ میکرومتر مادون قرمز، داده‌هایی با سه قدرت تفکیک مکانی شامل ۲۵۰، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر دارند. تصویربرداری ۴ بار در روز از یک منطقه صورت می‌گیرد و تصاویر تنوع تفکیک مکانی دارند، لذا در تحلیل رخداد گردوغبار مفید است (Sehatkashani et al., 2016). روزهای همراه با طوفان، طبق عامل دید که بر اساس طبقه‌بندی طوفان گردوغبار ذکر شده در جدول (۱) تعیین گردید.

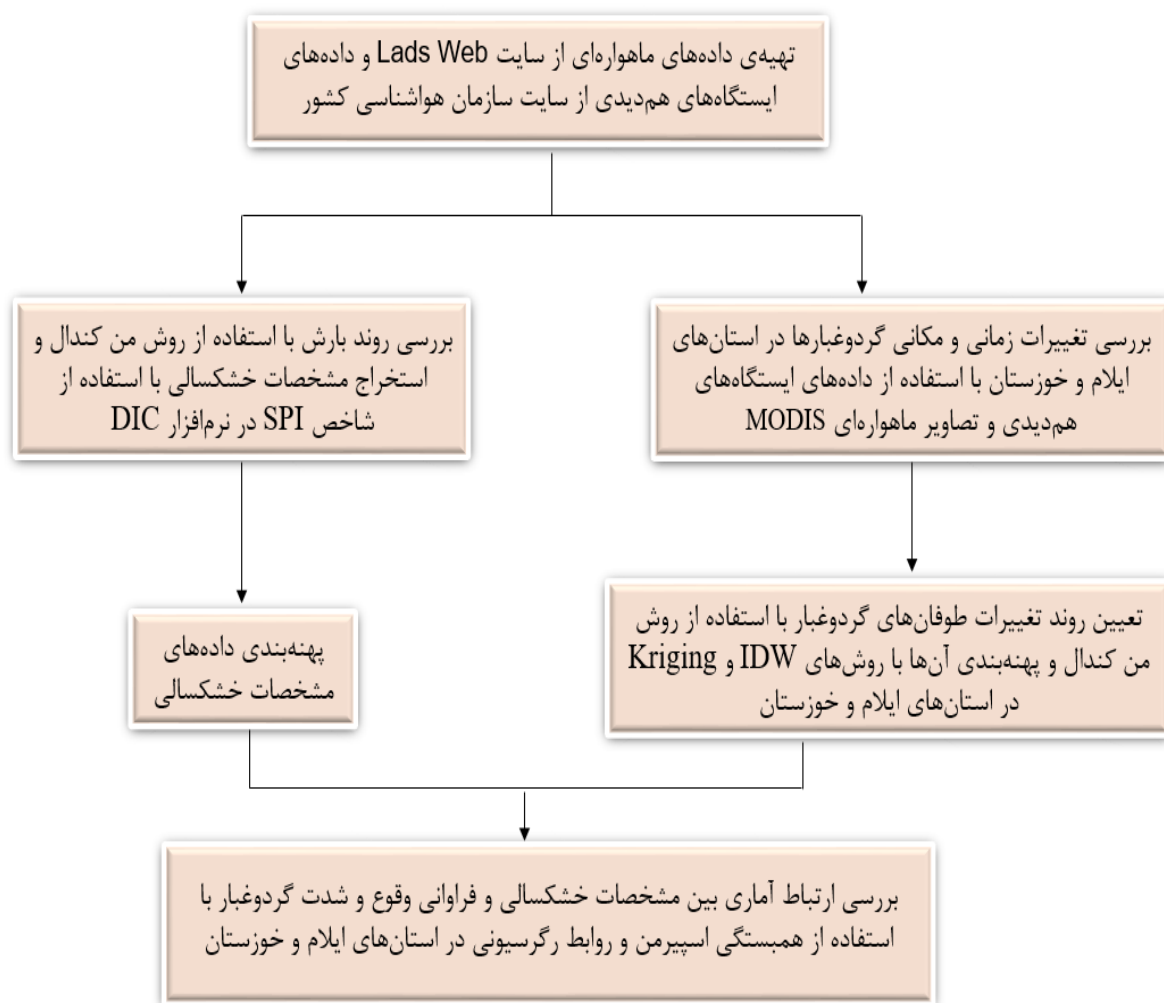
حاضر بر اساس نمودار جریانی ارائه شده در شکل ۲ تنظیم و اجرا شده است.

روش تحقیق

برای به دست آوردن تغییرات زمانی و مکانی رخداد طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان، از داده‌های دید افقی و بارش ایستگاه‌های هم‌دید منطقه برای طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹) استفاده شد. سپس به بررسی ارتباط مشخصات خشکسالی با تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) پرداخته شد. در سایت Lads Web، از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. این



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های هم‌دید
Figure 1- The location of the studied areas and distribution of synoptic stations



شکل ۲- نمودار جریان‌ی پژوهش
Figure 2- Flow chart of the research

گردید. در این پژوهش از شاخص SPI ۱۲ ماهه که با استفاده از توزیع گاما اندازه‌گیری شده و سپس شدت خشکسالی منطقه تعیین شد. در ادامه با استفاده از داده‌های مربوط به دید و ایستگاه‌های هم‌دیدگی منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۳۰ ساله، وقایع مربوط به طوفان گردوغبار به دست آمد. تحلیل روند دما، بارش و خشکسالی و نیز پدیده دید با استفاده از روش‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب Sen مورد بررسی قرار گرفت. (Heydari Alamdarloo *et al.*, 2021).

در این پژوهش برای پهنه‌بندی از روش‌های درون‌یابی Kriging و روش معکوس وزنی فاصله (IDW) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. روش Kriging از

جدول ۱- طبقه‌بندی طوفان‌های گردوغبار با دید افقی
(Beroghani *et al.*, 2019)

Table 1- Horizontal visibility classification of dust storms (Beroghani *et al.*, 2019)

دید افقی Horizontal visibility	شدت طوفان گردوغبار Dust storms intensity
200<	طوفان خیلی شدید
200-1000	طوفان شدید
1000-2000	طوفان متوسط

تصویرهای ماهواره‌ای روزهای همراه با طوفان گردوغبار برای پژوهش نیز از سایت Lads Web تهیه شد. در گام بعدی تغییرات زمانی و مکانی طوفان گردوغبار در استان ایلام با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بررسی

و نیمه‌خشک) از خشکسالی سالانه (۱۲ ماهه) استفاده و با استفاده از نرم‌افزار DIC شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی محاسبه شد. شاخص SPI از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$SPI = \frac{Pi \pm \bar{p}}{S} \quad (7)$$

Pi مقدار بارش موردنظر، \bar{p} میانگین درازمدت بارش برای دوره موردنظر و S انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. درنهایت، به منظور تعیین شدت خشکسالی و یا ترسالی‌ها از جدول (۲) استفاده می‌شود.

جدول ۲- طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی بر اساس

مقادیر SPI

Table 2- Different classes of dry and wet years based on SPI values

SPI	طبقه		طبقات ترسالی
	خشکسالی	SPI	
0_-0.99	خشکسالی ملایم	2<	ترسالی خیلی شدید
-1_-1.49	خشکسالی متوسط	1.5_1.99	ترسالی شدید
-1.5_-1.99	خشکسالی شدید	1_1.49	ترسالی ملایم
>-2	خشکسالی خیلی شدید	0.99_0	نرمال

شاخص عمق نوری گردوغبار^۹ (AOD)

به منظور بررسی طوفان گردوغبار در مناطق مورد مطالعه از شاخص عمق نوری گردوغبار (AOD) همراه با داده‌های ایستگاه‌های هم‌دیدگی استفاده شد.

این شاخص با استفاده از نرم‌افزار Google Earth Engine استخراج شد. این کمیت وابسته به طول موج بوده و به صورت کاهش نور در واحد طول روی یک مسیر مشخص عنوان می‌شود. شاخص AOD شاخص عمق نوری (هواویز/گردوغبار) به لحاظ دقت در تشخیص و گستره زمانی و مکانی، امکان پایش زمانی و مکانی را در گستره‌ی زیادی در اختیار می‌گذارد.

پراکندگی بیشترین روش‌های درون‌یابی است که سطح سلولی تولیدشده از آن دقیق و معتبر است. در این روش فرض بر این است که فاصله و جهت بین نقاط نمونه روی همبستگی مکانی تأثیر می‌گذارد (Ghafari et al., 2018). روش IDW از روش‌های متداول برای درون‌یابی به شمار می‌آید. در پیش‌بینی با استفاده از این روش، عامل وزن براساس فاصله نقاط از همدیگر تعیین می‌گردد. به نقاط نزدیک محل نمونه وزن بیش‌تر و به نقاط دورتر وزن کم‌تری اختصاص می‌یابد. رابطه (۵) بیانگر معادله کریجینگ می‌باشد.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

که در آن: Z^* مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه x_i و λ_i وزن آماری که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه x_i در برآورد است. رابطه (۶) معادله روش معکوس وزنی فاصله (IDW) را نشان می‌دهد.

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^a}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a}} \quad (6)$$

که در آن: d_i فاصله میان نقطه مشاهداتی و محاسباتی، a توان (عدد صحیح)، Z^* مقدار محاسباتی و n تعداد نقاط مشاهداتی هستند.

شاخص SPI

برای استخراج و تحلیل مشخصات خشکسالی از شاخص SPI استفاده گردید. مقادیر SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه قابل محاسبه است (McKee et al., 1993). سه مقیاس اول به عنوان مقاطع کوتاه‌مدت و سه مقطع آخر، به عنوان شاخصی برای تعیین خشکسالی‌های بلندمدت در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌های خشکسالی کوتاه‌مدت (۳، ۶، ۹ ماهه) معمولاً برای مناطق مرطوب کاربرد دارد در حالی‌که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک از شاخص سالانه و نیز شاخص‌های بلندمدت (۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) استفاده می‌شود (Moradi et al., 2011). بر این اساس در پژوهش حاضر به دلیل شرایط اقلیم منطقه (خشک

شاخص NDDI

در این تحقیق، برای شناسایی طوفان‌های گردوغبار از شاخص NDDI استفاده شد. در این خصوص، تصاویر ماهواره‌ای مربوط به روزهایی که همراه با طوفان گردوغبار فراگیر (وقوع رویداد طوفان گردوغبار در بیشتر از نصف ایستگاه‌ها) بوده‌اند استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$NDDI = (p2.13 - p0.469) / (p2.13 + p0.469) \quad (8)$$

که در آن: $p2.13$ و $p0.469$ به ترتیب مقادیر بازتابندگی در بالای جو، در طول موج‌های $2/13$ میکرومتر (باند ۷ MODIS) و $0/469$ میکرومتر (باند ۳ MODIS) می‌باشند.

شیب Sen

برای تعیین مقدار شیب روند از روش Sen استفاده می‌گردد. این روش برای محاسبه شیب واقعی (میزان تغییر در واحد زمان)، از روش ناپارامتری ساده‌ی Sen (Sen, 1968) استفاده می‌کند. شیب Sen در جایی استفاده می‌شود که فرض خطی بودن روند پذیرفته شود. در این روش مقادیر موجود در سری زمانی، در تعیین شیب اثر کمی دارند که این حالت باعث برتری اصلی این روش نسبت به رگرسیون خطی می‌باشد (Ahmadi & Radmanesh, 2014).

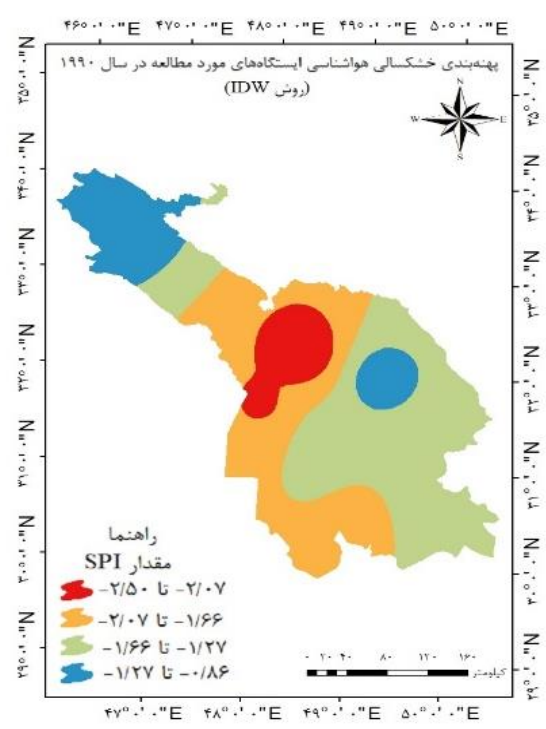
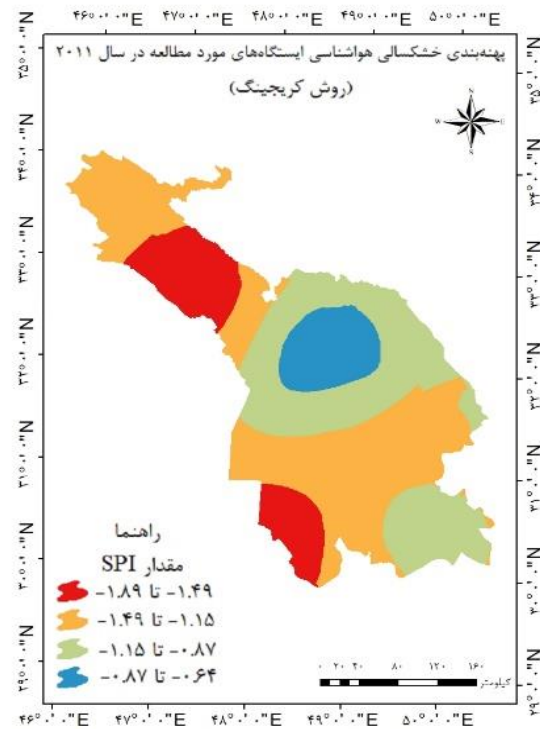
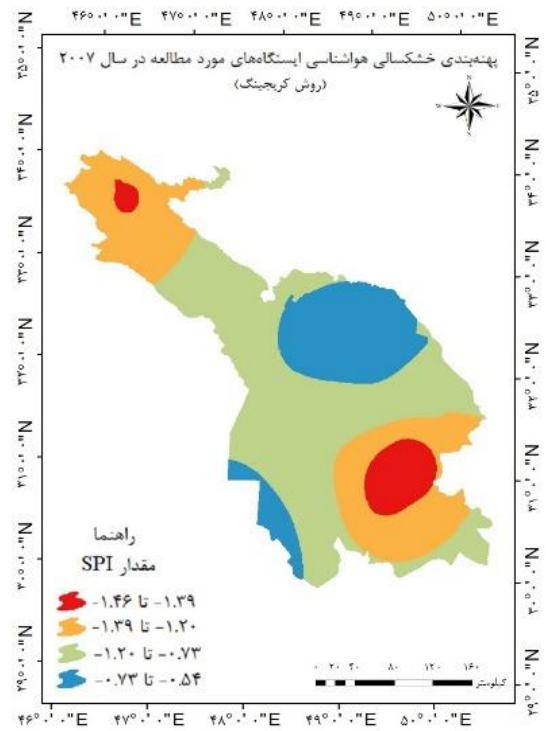
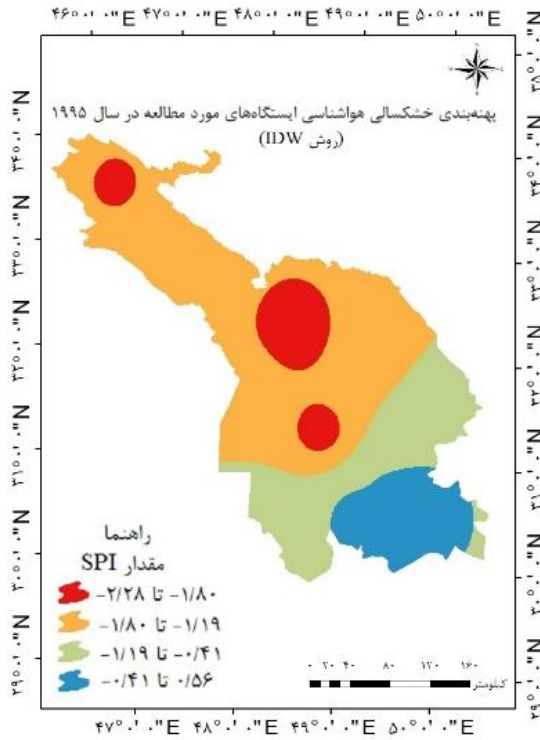
اگر آماره‌ی روند سری داده‌ها مثبت باشد افزایشی و در صورت منفی بودن آن، روند کاهشی می‌باشد. اندازه‌گیری میزان روند را می‌توان با محاسبه شیب تخمینی β از رابطه‌ای که توسط Sen ارائه و Hirsch و همکاران (۱۹۸۲) آن را توسعه دادند، به دست آورد. شیب Sen طبق رابطه (۹) محاسبه گردید.

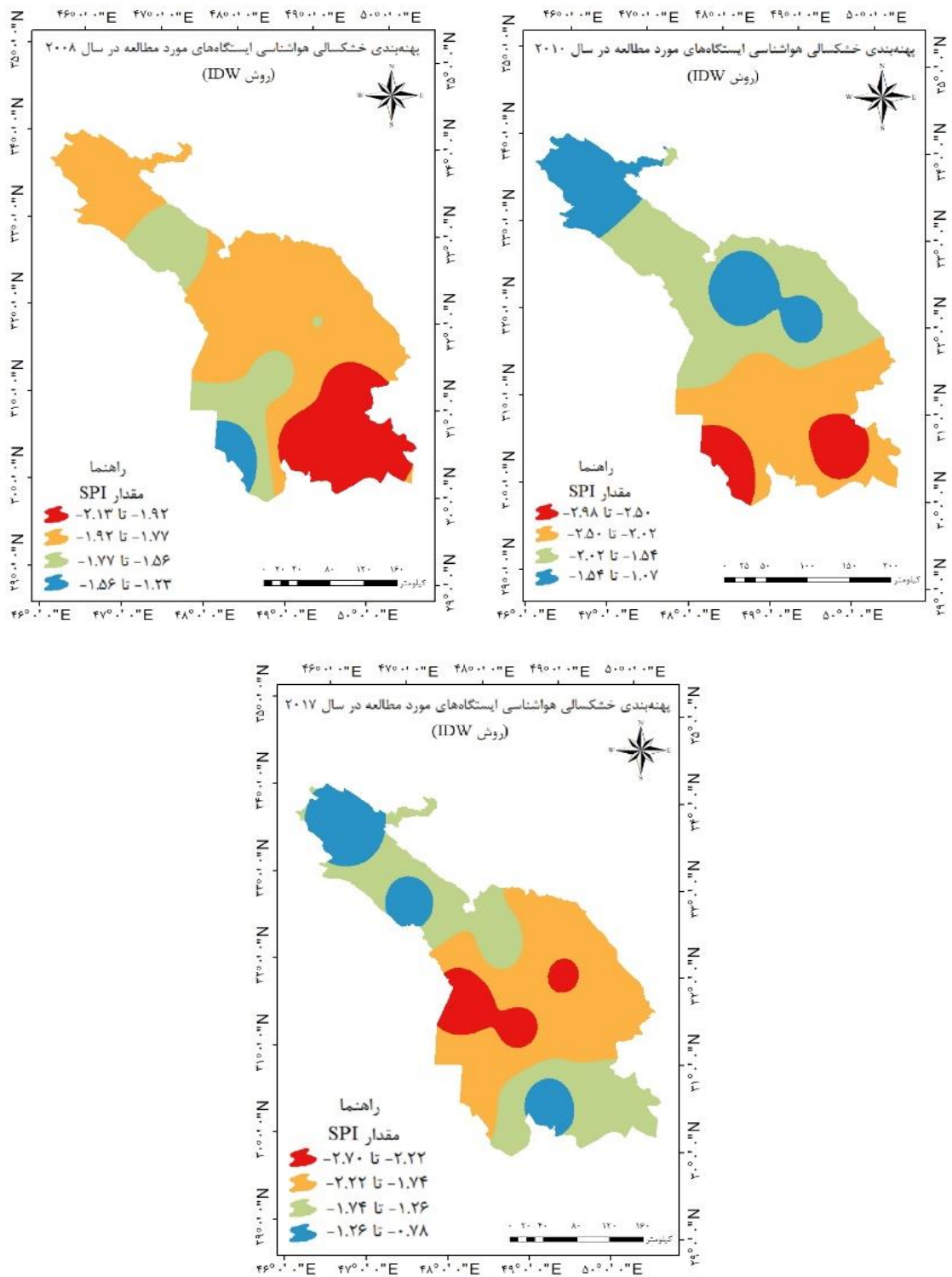
$$\beta = \frac{X_t - X_s}{t - s} \quad (9)$$

که در آن: X_t داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و X_s داده‌های مشاهده‌ای در زمان s ، به طوری که t یک واحد زمانی بعد از s است، می‌باشد. با اعمال رابطه (۹) یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه‌شده به دست می‌آید که شیب‌خط روند (β_{med}) از محاسبه‌ی میانه‌ی این سری زمانی به وجود می‌آید. مقدار منفی (β_{med}) حاکی از نزولی بودن روند و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده‌ی صعودی بودن روند داده‌ها می‌باشد (Vafakhah et al., 2012). برای بررسی ارتباط آماری میان مشخصات خشکسالی با تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان، از آزمون‌های آماری همبستگی اسپیرمن و رگرسیون خطی استفاده شد. برای انجام تحلیل‌های آماری، پس از گردآوری داده‌های موردنیاز، از محیط نرم‌افزار SPSS برای محاسبات آماری از قبیل همبستگی بین داده‌ها و تحلیل واریانس انجام پذیرفت.

نتایج**نتایج مربوط به خشکسالی و شاخص SPI**

برای محاسبه این شاخص، از ایستگاه‌های با طول دوره آماری کامل (۲۰۱۹-۱۹۸۹) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ دارای خشکسالی فراگیر و سال ۲۰۰۸ با بیشترین میزان خشکسالی فراگیر روبرو بوده است (شکل ۳). نتایج پهنه‌بندی سال‌های همراه با خشکسالی فراگیر در دو استان نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در پهنه خشکسالی‌ها از نوع خشکسالی شدید و متوسط می‌باشد.





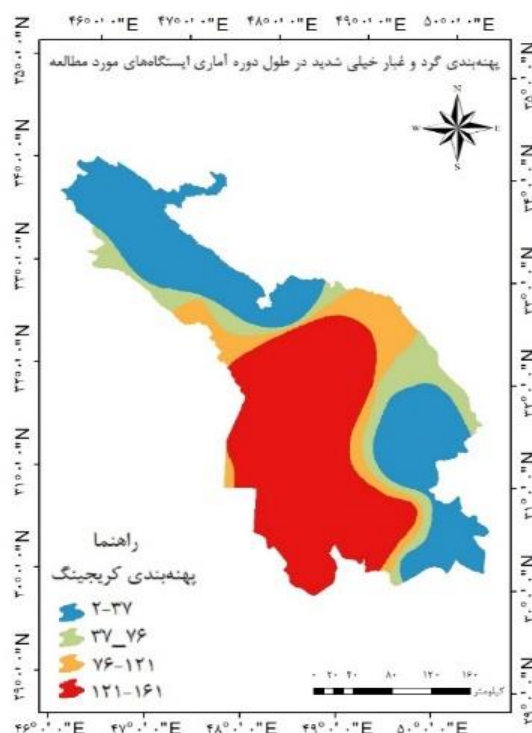
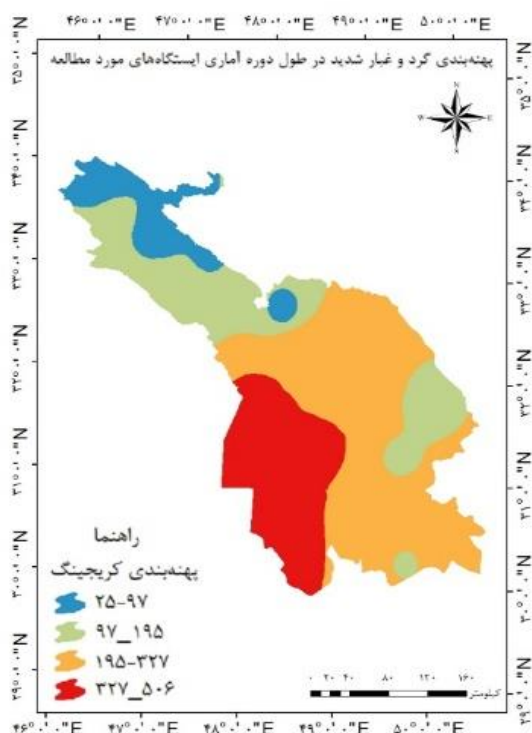
شکل ۳- پهنه‌بندی خشکسالی‌های فراگیر در طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه

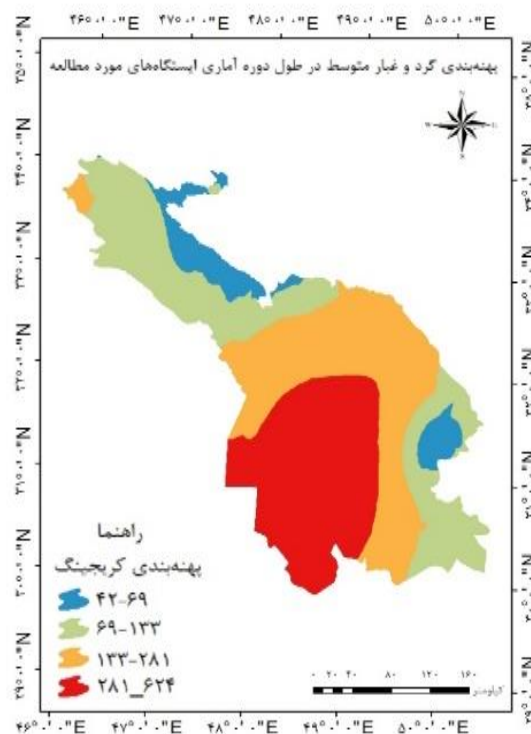
Figure 3- Zoning of widespread dry years during the statistical period of the studied stations

توزیع زمانی طوفان‌های گردوغبار

پس از استخراج داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های همدیدی استان‌های ایلام و خوزستان، نتایج شدت وقوع روزهای غبارآلود ناشی از طوفان گردوغبار در طی دوره مورد مطالعه قرار گرفت. منظور از تعداد طوفان گردوغبار، تعداد روزهای با دید افقی کمتر از ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در طول دوره‌ی آماری ۳۰ ساله با توجه به اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه و معیارهای شناسایی و تفکیک روزهای همراه با طوفان گردوغبار در این پژوهش در طول دوره آماری مشترک ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹، ایستگاه اهواز به طور متوسط با ثبت بیش از ۴۵ وقوع در سال و در مجموع ۱۲ سال با ۵۵۸ وقوع، بیشترین میزان طوفان‌های گرد و غبار را به همراه داشته است. لذا ایستگاه ایوان به طور متوسط با ثبت سالانه حدود ۵ وقوع و در مجموع ۱۲ سال با ۵۷ واقعه،

کمترین تعداد وقوع طوفان گردوغبار را داشته است (شکل ۴). همچنین طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه یکسان نمی‌باشد؛ بنابراین به منظور مقایسه باید ایستگاه‌هایی با یکدیگر مقایسه گردد که دارای طول دوره آماری مشترک باشد. به عنوان مثال ایستگاه مهران با مجموع ۲۷۵ مورد طوفان طی دوره آماری ۱۴ ساله (۲۰۰۵-۲۰۱۹) در مقایسه با ایستگاه ایلام با مجموع ۳۷۰ واقعه طوفان در طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۹) در ظاهر دارای واقعه طوفان کمتری است و این در حالی است که طول دوره آماری ایستگاه مهران کمتر از نصف طول دوره آماری ایستگاه ایلام است؛ بنابراین نتیجه کلی آن است که واقعه طوفان گردوغبار در ایستگاه مهران فراوانی وقوع خیلی بیشتری نسبت به ایستگاه ایلام دارد.





شکل ۴- پهنه‌بندی شدت گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 4- Dust intensity zoning of the studied stations

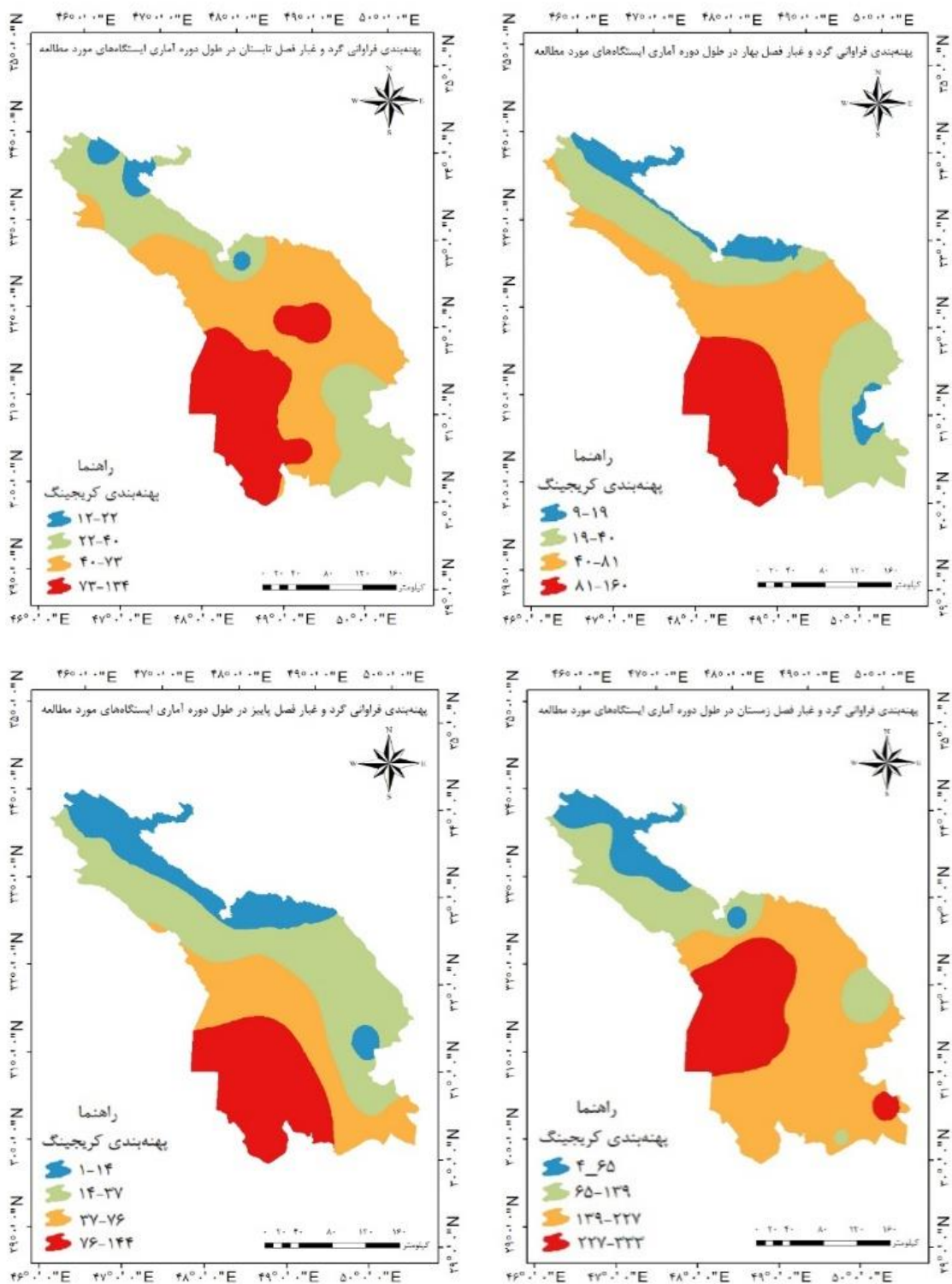
سالانه نشان داد که در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ میلادی بالاترین تعداد وقوع طوفان گردوغبار ثبت شده است و این ارقام، به ترتیب شامل ۷۰۷، ۵۶۷ و ۵۴۸ عدد می‌باشد. رویدادهای طوفان گردوغباری که دارای تداوم یک روزه و دو روزه بوده نسبت به سایر تداوم‌ها، دارای فراوانی وقوع بیشتری می‌باشد.

توزیع مکانی طوفان‌های گردوغبار

نتایج حاصل از فراوانی وقوع فصلی و ماهانه طوفان‌های گردوغبار به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده از پهنه‌بندی تغییرات وقوع طوفان‌های گردوغبار، هرچه از غرب استان‌های ایلام و خوزستان به سمت شرق آنها حرکت کنیم، فراوانی و شدت وقوع طوفان‌های گردوغبار کاهش پیدا می‌کند.

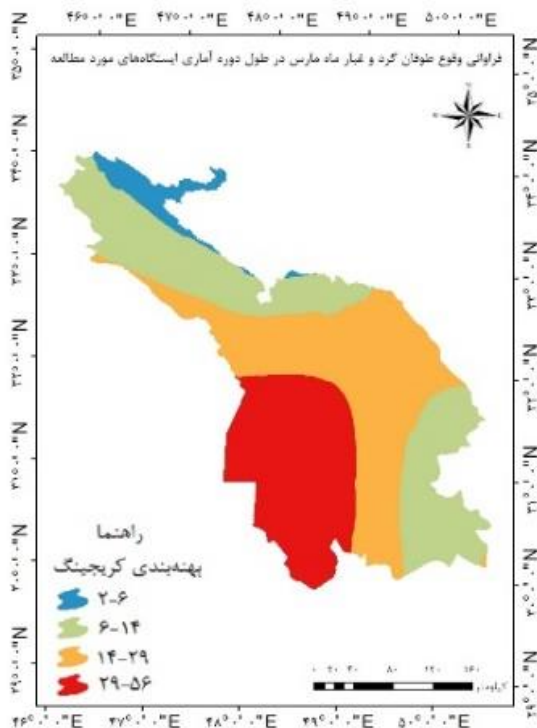
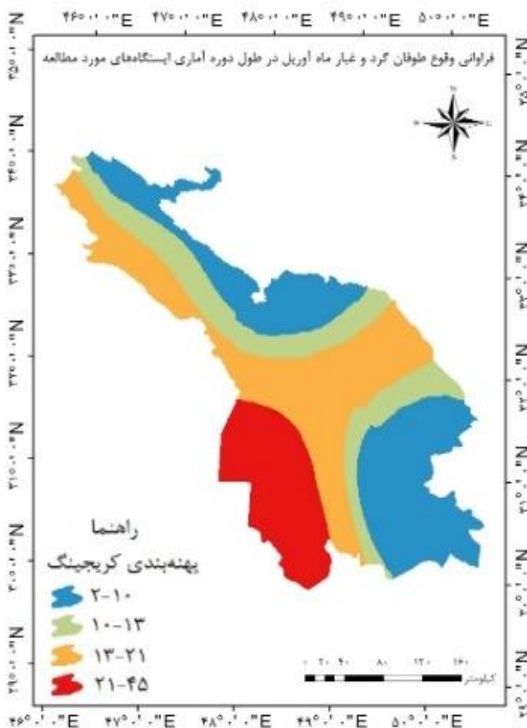
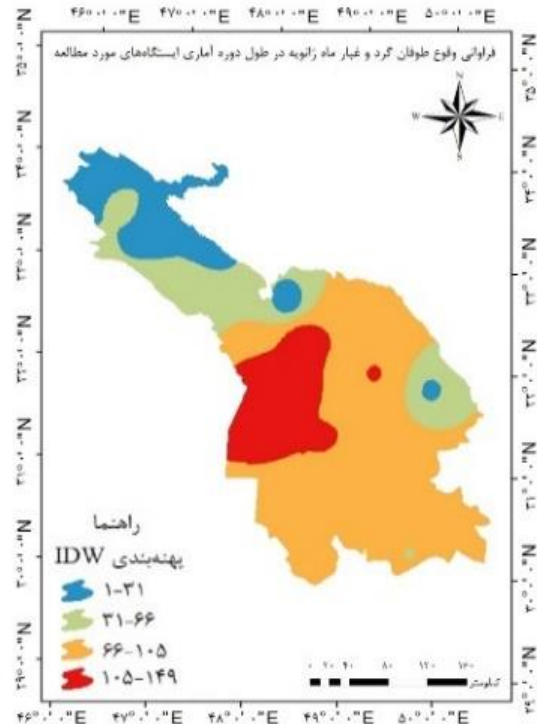
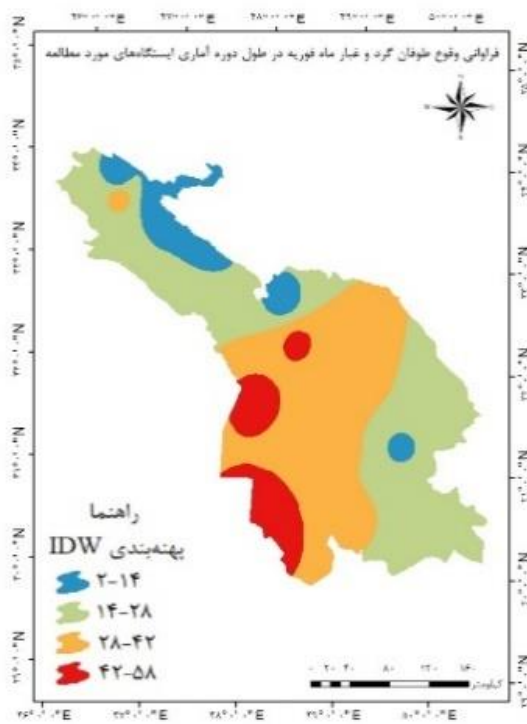
نتایج توزیع ماهانه تعداد روزهای گردوغبار ناشی از طوفان گردوغبار نیز حاکی از آن بود که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، ماه ژانویه با ثبت ۱۲۸۷ روز همراه با طوفان گردوغبار دارای بیشترین و ماه آگوست با ۱۵۸ روز ثبت این پدیده، دارای کمترین وقوع پدیده گردوغبار می‌باشد. همچنین پراکنش فصلی روزهای همراه با طوفان گردوغبار در فصل زمستان با ۲۹۵۶ روز بیشترین و فصل پاییز با ۷۷۸ روز کمترین وقوع پدیده گردوغبار را داشته‌اند.

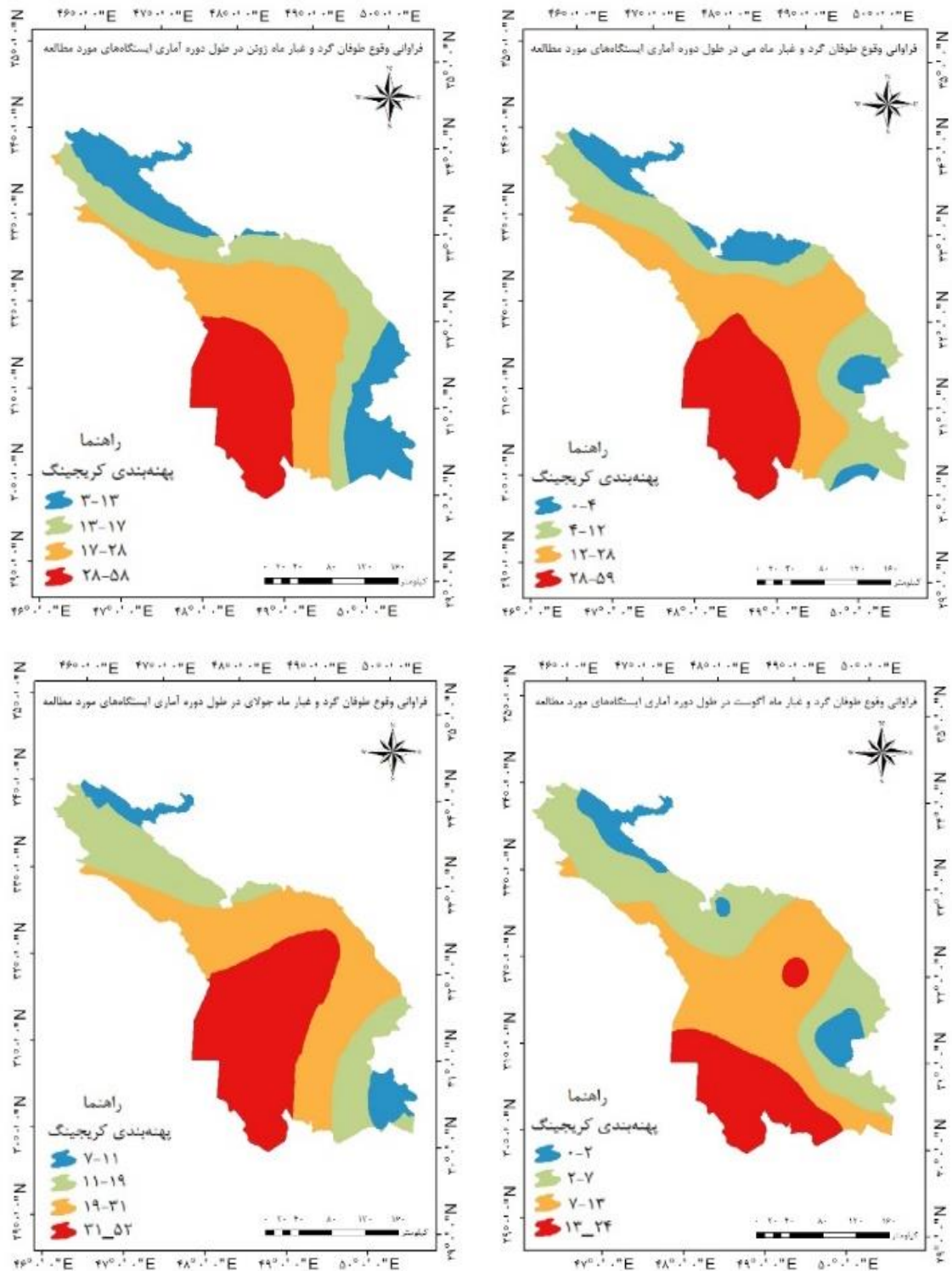
بررسی نتایج توزیع سالانه طوفان‌های گردوغبار در مناطق مورد مطالعه در دو استان ایلام و خوزستان، نشانگر آن است که در تمامی مناطق بیش‌ترین فراوانی این رویداد در سال ۲۰۰۸ به وقوع پیوسته است. کمترین فراوانی طوفان گردوغبار متعلق به سال ۱۹۹۰ می‌باشد. به طور کلی نتایج به دست آمده از توزیع

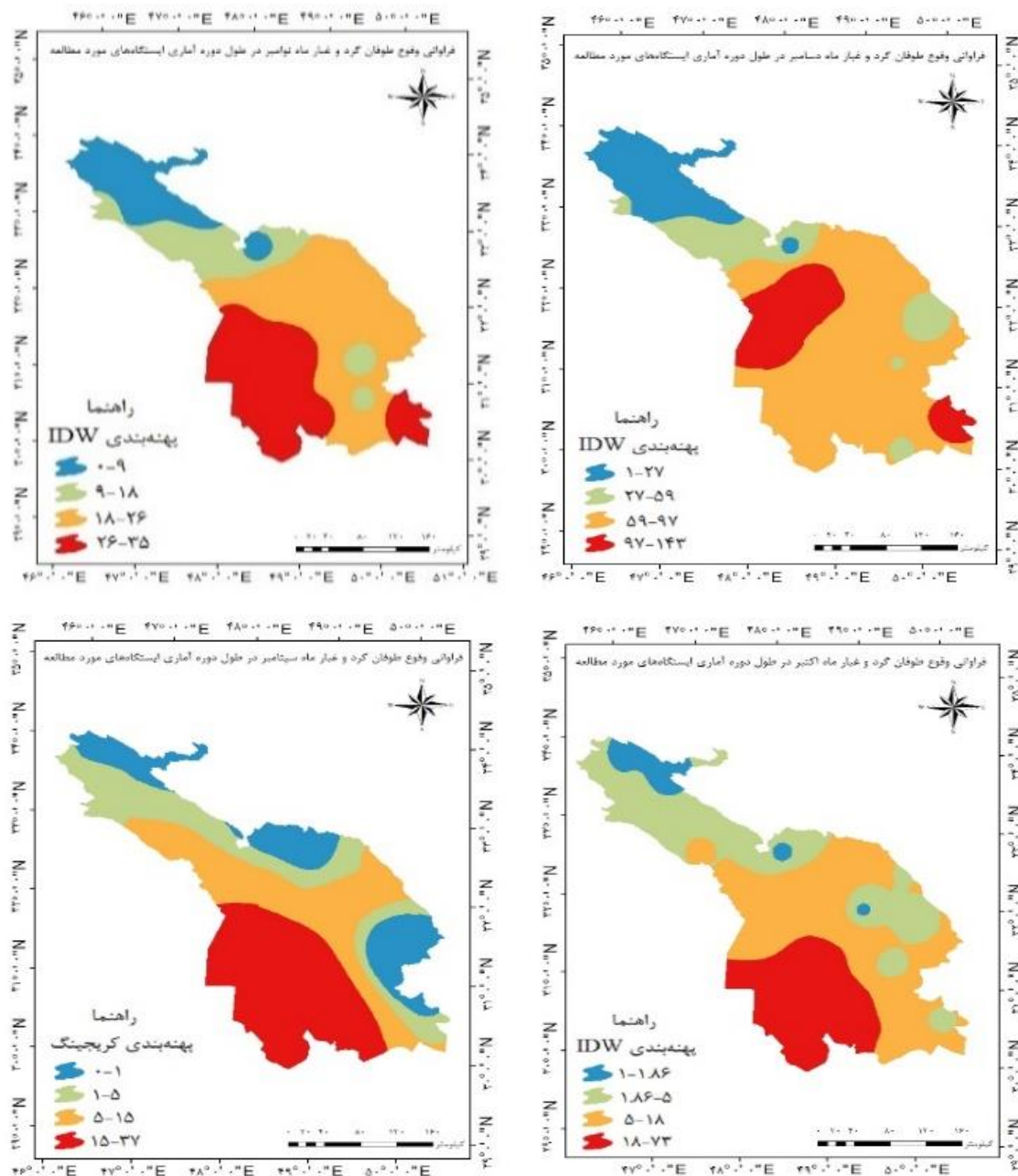


شکل ۴- بهمنبندی فصلی گردوغبار ایستگاههای مورد مطالعه

Figure 4- Seasonal dust zoning of the studied stations







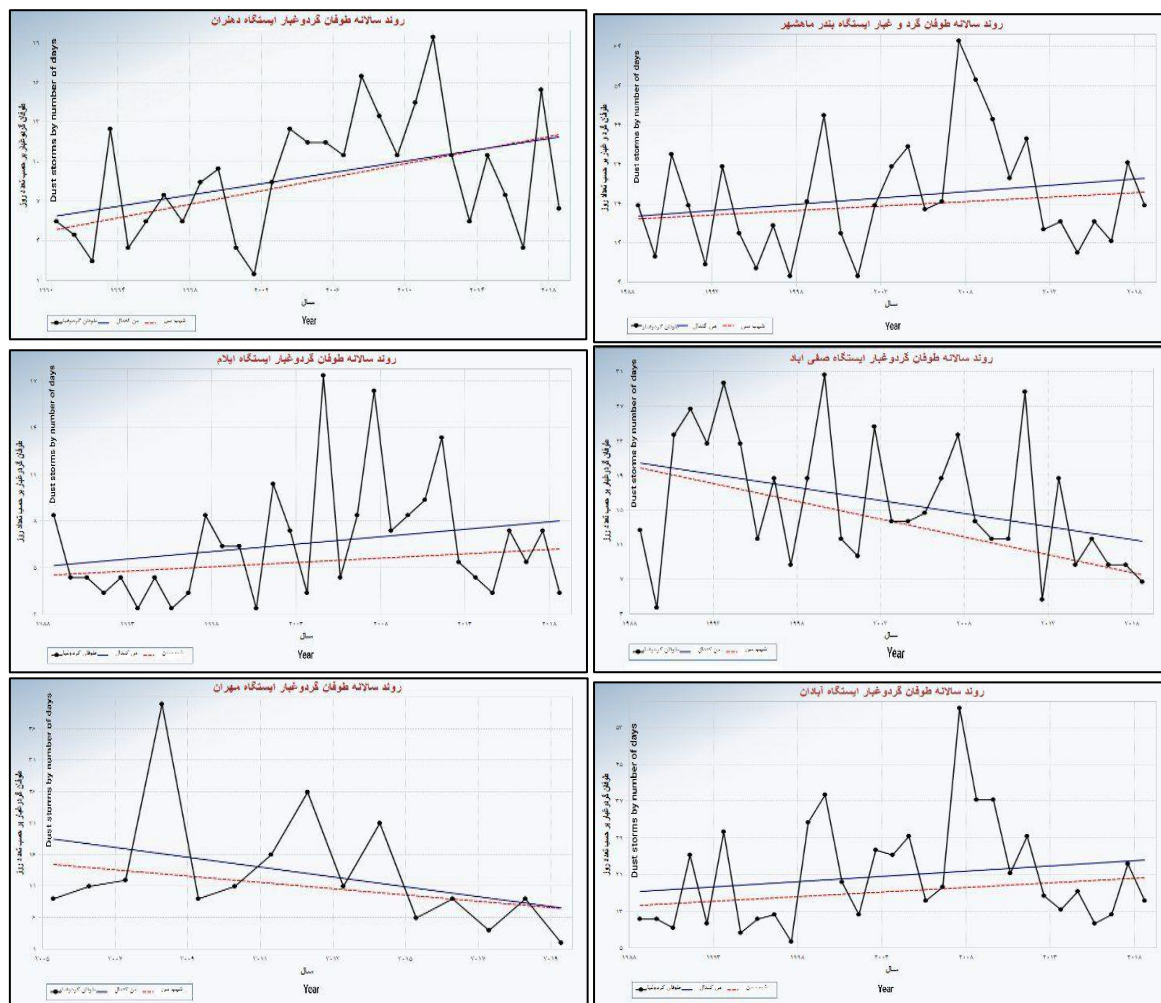
شکل ۵- پهنه‌بندی ماهانه گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 5- Monthly dust zoning of the studied stations

گردوغبار بود. همچنین ایستگاه‌های آبادان، بندر ماهشهر و صفی‌آباد دزفول در استان خوزستان به ترتیب با ۱۰۹۷، ۸۱۳ و ۸۰۸ روز و ایستگاه‌های ایلام، دهلران و مهران به ترتیب با ۳۷۰، ۳۲۲، ۲۷۵ روز در استان ایلام، همراه با طوفان گردوغبار و دید کمتر از ۲۰۰۰ متر بوده‌اند.

روند تغییرات فراوانی وقوع طوفان گردوغبار و دیگر متغیرهای اقلیمی

نتایج به دست آمده از روند تغییرات زمانی متغیرهای دمای کمینه و بیشینه، بارش و طوفان گردوغبار بر اساس آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب Sen گزارش شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که ایستگاه اهواز با ثبت ۱۱۳۵ روز دارای بیشترین روز همراه با طوفان



شکل ۶- نمودارهای مربوط به روند طوفان گردوغبار برخی از ایستگاه‌ها در دو استان مورد مطالعه
 Figure 6 - Graphs of dust storm trends for selected stations in the two studied provinces

نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین ایستگاه‌های مورد مطالعه برای داده‌های دمای بیشینه و کمینه و بارش در اغلب ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌داری را در سطح ۱ یا ۵ درصد نشان داد. همچنین نتایج همبستگی طوفان گردوغبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شد که نتایج بیانگر آن بود که بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش همبستگی بالایی وجود دارد. همچنین در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، میان طوفان گردوغبار و شاخص AOD همبستگی وجود دارد. جدول (۳) نتایج همبستگی طوفان گردوغبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD در ایستگاه ایلام را نشان می‌دهد.

روند بارش در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه استان خوزستان دارای شیب نزولی گزارش شد. در حالی که ایستگاه‌های هندیجان و حسینیه دارای شیب صعودی بودند. در استان ایلام نیز ایستگاه‌های ایوان، دره‌شهر، مهران و لومار با روند صعودی بارش و ایستگاه‌های ایلام و دهلران با روند کاهشی همراه بوده‌اند. روند تغییرات دمای بیشینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌گر روند صعودی در تمام ایستگاه‌ها بود. روند تغییرات دمای کمینه در همه ایستگاه‌های استان خوزستان صعودی بوده و تنها در ایستگاه‌های ایلام، ایوان و لومار شیب صعودی داشت.

جدول ۳- نتایج همبستگی طوفان گرد و غبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD ایستگاه ایلام

Table 3 - Correlation results of dust storms, maximum and minimum temperatures, precipitation, and AOD index at Ilam station

AOD	بارش Precipitation	دمای کمینه Minimum temperatures	دمای بیشینه Maximum temperatures	طوفان گردوغبار Dust storms	متغیر Variable
*0.581	-0.366	**0.534	0.268	1.000	طوفان گردوغبار
-0.032	-0.166	**0.752	1.000	0.268	دمای بیشینه
0.072	-0.279	1.000	**0.752	**0.534	دمای کمینه
-0.350	1.000	-0.279	-0.166	-0.366	بارش
1.000	-0.350	0.072	-0.032	*0.581	AOD

معنی داری در سطح 0.05 * معنی داری در سطح 0.01 **

صعودی می‌باشند. نتایج توزیع فصلی مقدار شاخص AOD نیز بیانگر آن بود که بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص در فصول بهار و پاییز مشاهده می‌شود. توزیع ماهانه شاخص AOD نیز نشان داد بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص مربوط به ماه آوریل و دسامبر می‌باشد.

روند تغییرات عمق نوری گردوغبار (AOD) روند تغییرات AOD به صورت توزیع سالانه و ماهانه در ایستگاه‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج جدول (۴) مقدار AOD برای ۶ سال از سال‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های بهبهان، ایذه، مسجدسلیمان و رامهرمز دارای شیب نزولی و بقیه ایستگاه‌ها دارای شیب

جدول ۴- توزیع سالانه روند AOD در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 4- Annual distribution of AOD trends in the studied stations

شرایط روند Trends process	آماره من کندال Mann_Kendall statistic	آماره شیب سن Sen slope statistic	سال Year	ایستگاه Stations
صعودی	1.03	0.00289	1989-2019	صفی‌آباد دزفول
صعودی	1.395	0.00779	1989-2019	بستان
نزولی	-0.412	-0.00063	1994-2019	بهبهان
صعودی	1.237	0.0069	2001-2019	هندیجان
صعودی	1.03	0.00289	2005-2019	حسینیه
صعودی	1.03	0.00289	1994-2019	شوشتر
نزولی	-1.122	-0.00258	1993-2019	ایذه
صعودی	1.237	0.00669	1989-2019	امیدیه
نزولی	-1.979	-0.00483	1989-2019	مسجدسلیمان
صعودی	1.237	0.00669	1989-2019	بندر ماهشهر
نزولی	-0.989	-0.00209	1989-2019	رامهرمز
صعودی	1.359	0.00779	1989-2019	اهواز
صعودی	1.857	0.00337	1989-2019	ایلام
صعودی	1.112	0.00093	1991-2019	دهلران
صعودی	1.857	0.00337	1999-2019	ایوان
صعودی	1.114	0.00235	2003-2019	دره شهر
صعودی	1.857	0.00337	2005-2019	مهران
صعودی	1.857	0.00337	2008-2019	لومار
صعودی	0.783	0.004	1989-2019	آبادان

روابط رگرسیونی

در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ رابطه رگرسیونی بین داده‌های مربوطه ایستگاه‌های مورد مطالعه برقرار شد. روابط رگرسیونی مربوط به برخی از ایستگاه‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی روابط بین پدیده گردوغبار با دمای بیشینه و کمینه و بارش و شاخص AOD ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۵- روابط رگرسیونی دمای بیشینه و کمینه و بارش و شاخص AOD در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه
Table 5 - Regression relationships of maximum and minimum temperatures, precipitation, and AOD index for selected studied stations

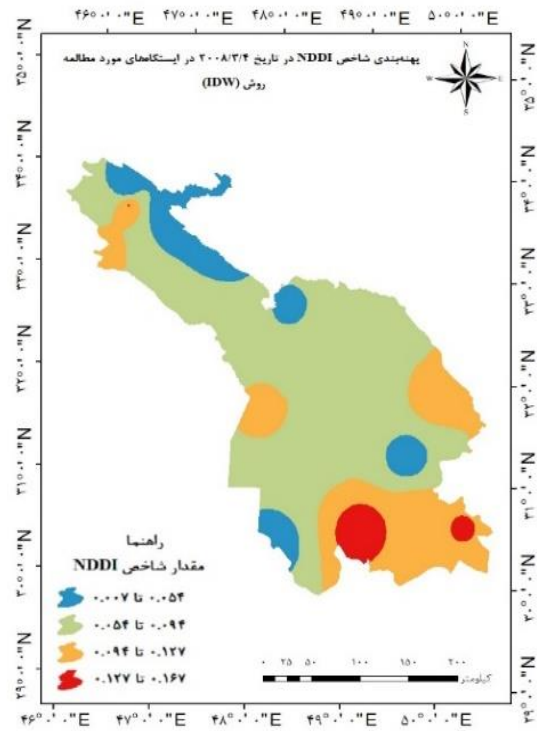
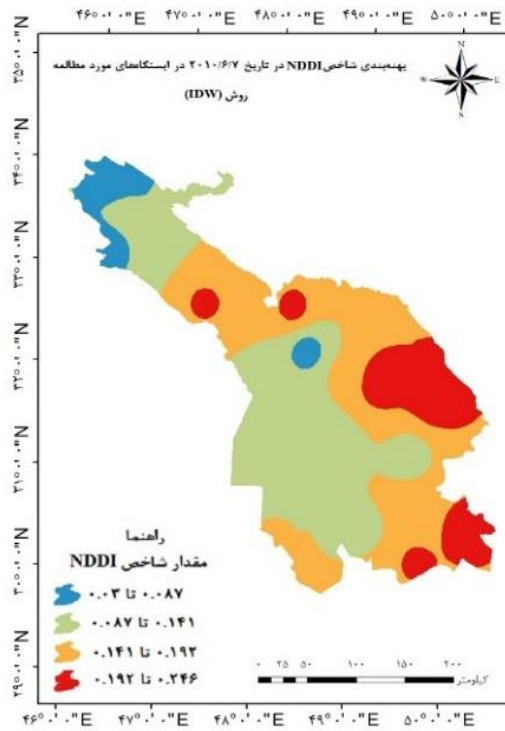
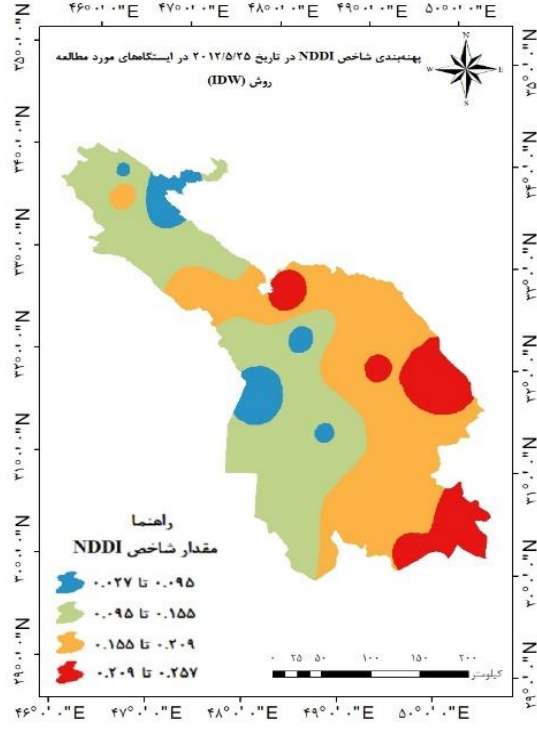
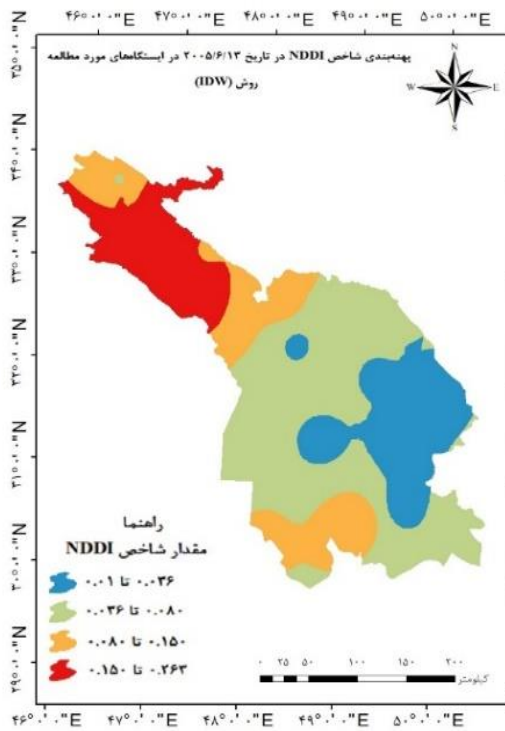
R ²	R	روابط رگرسیونی Regression relationships	ایستگاه Stations
0.475	0.690	$y = 278.87 - 9.52\text{Max} + 1.37\text{Min} - 0.026R + 92.35A$	صفی آباد دزفول
0.629	0.793	$y = 77.72 + 1.21\text{Max} - 11.46\text{Min} - 0.3R + 232.19A$	آبادان
0.781	0.884	$y = 28.46 + 10.33\text{Max} - 22.16\text{Min} + 0.027R + 139.36A$	بندر ماهشهر
0.316	0.562	$y = 46.18 - 5.79\text{Max} + 7.1\text{Min} + 0.002R + 31.5A$	رامهرمز
0.368	0.606	$y = 94.37 - 3.84\text{Max} - 1.54\text{Min} - 0.013R + 120.36A$	ایلام
0.489	0.699	$y = 11.29 - 3.75\text{Max} + 4.86\text{Min} - 0.029R + 60.77A$	دهلران
0.204	0.452	$y = 213.18 - 8.57\text{Max} + 3.46\text{Min} - 0.009R + 85.9A$	مهران

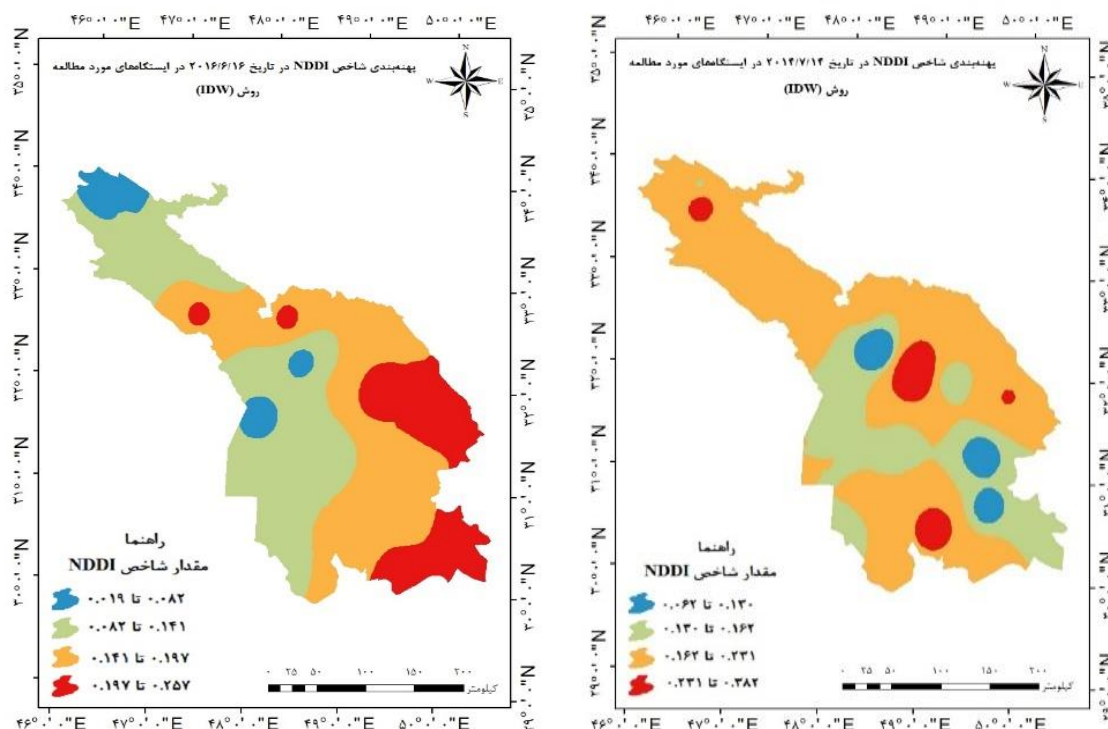
Y: تعداد طوفان گردوغبار، A: مقدار شاخص Aod، Max: مقدار دمای بیشینه، Min: مقدار دمای کمینه و R: مقدار بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. نتایج حاصله نشان داد که در اغلب ایستگاه‌ها روابط رگرسیونی دارای r و R² نسبتاً بالایی هستند.

نتایج شاخص NDDI

فراگیر را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از شاخص NDDI و داده‌های مربوط به دید افقی نشان داد که این شاخص توانسته است شرایط غبارآلودی منطقه را به طور کلی ترسیم نماید؛ اما همخوانی دقیقی در خصوص داده‌های دید افقی و شاخص NDDI مشاهده نمی‌گردد.

برای بررسی روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر در ایستگاه‌ها، تاریخ‌های مربوط به این روزها در طول سال‌های آماری مورد مطالعه استخراج شد. شکل (۷) پهنه‌بندی روزهای معرف همراه با طوفان گردوغبار





شکل ۷- پهنه‌بندی تعدادی از روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر بر اساس شاخص NDDI
Figure 7 - Zoning of the number of days with pervasive dust storms based on the NDDI index

مقایسه با استان ایلام هموارتر و از ارتفاع پایین‌تری برخوردار است. لذا می‌توان بیان داشت که فعالیت فرسایش بادی در مناطق هموارتر و با وسعت بیشتر و ارتفاع کمتر، از شدت بالاتری برخوردار می‌باشد. این نتایج با یافته‌های (Arami *et al.*, 2018) همسو می‌باشد. هر قدر از سمت غرب به شرق هر دو استان پیش برویم، از شدت، تداوم و فراوانی طوفان گردوغبار کاسته می‌شود؛ زیرا پیش‌روی از غرب به سمت شرق سبب افزایش ارتفاع منطقه شده و فرسایش بادی از شدت کمتری برخوردار است. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در دو استان، در مناطق غربی خارج از کشور واقع شده‌اند که هر چقدر از غرب به شرق استان می‌رویم، به دلیل دور شدن از منشأ و نقاط برداشت از میزان شدت، فراوانی وقوع و تداوم طوفان گردوغبار کاسته می‌شود. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات (Arami *et al.*, 2018) همخوانی دارد. نتایج بررسی همبستگی بارش و دمای بیشینه و دمای کمینه بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول (۳) نشان

بحث و نتیجه‌گیری

طوفان‌های گردوغبار و خشکسالی از جمله بلایای طبیعی کشور به شمار می‌آیند. تغییرات عملکرد طبیعی از جمله کاربری اراضی، تغییر رژیم آب رودخانه‌ها و تالاب‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی هم‌چون کاهش بارندگی و عملکرد انسانی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. این شرایط تأثیر به‌سزایی بر وقوع و شکل‌گیری گردوغبار و تشدید خشکسالی و به‌تبع آن پدید آمدن آسیب‌هایی بر جوامع بشری دارد. استان‌های ایلام و خوزستان از مناطقی هستند که به دلیل قرارگیری در غرب و جنوب‌غرب ایران و مجاورت با بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان، درگیر این پدیده شده‌اند.

نتایج بررسی طوفان‌های گردوغبار در دو استان مورد مطالعه بیانگر آن است که ایستگاه‌های واقع در استان خوزستان از نظر شدت و فراوانی وقوع و تداوم در مقایسه با استان ایلام از شرایط نامناسب‌تری برخوردارند. زیرا از نظر توپوگرافی، استان خوزستان در

می‌باشد که این نشانگر آن است که میزان وقوع گردوغبار در فصل سرد سال روبه‌فزونی است که علت احتمالی آن می‌تواند خشک شدن هورها و کمی دبی جریان رودهای دجله و فرات باشد که موجب شده تا سطح وسیع‌تری از پهنه‌های مناطق با بافت دانه‌ریز به عنوان منشأ طوفان گردوغبار به منابع قبلی افزوده شود و به این ترتیب فراوانی وقوع و شدت طوفان گردوغبار را در منطقه بیشتر کند. اگرچه شرایط تغییر اقلیم و افزایش معنی‌دار دماهای بیشینه و کمینه در وقوع این نتایج می‌تواند موثر باشد (جدول ۴). عوامل مختلفی باعث تغییرات مکانی-زمانی AOD در فصل زمستان می‌شود و طوفان گردوغبار و دینامیک (پویایی) هواشناسی مرتبط با آن، نقش محوری در تغییرات AOD در فصل زمستان دارند (Yousefi et al., 2023). بر اساس نتایج حاصله در جدول (۳) بین طوفان گردوغبار و شاخص AOD در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌دار دیده می‌شود و این امر بیانگر آن است که این شاخص می‌تواند معیار خوبی برای نشان دادن شرایط طوفان گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه باشد. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات (Zheng & Singh, 2018) هم‌خوانی دارد. همچنین بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش با پدیده گردوغبار در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه همبستگی معنی‌دار دیده می‌شود و این امر بیانگر آن است که شرایط بارشی و دمایی می‌تواند در تعدیل و یا تشدید فراوانی وقوع طوفان گردوغبار مورد مطالعه موثر باشد. لازم به ذکر است که همبستگی بین طوفان گردوغبار و داده‌های بارش و دمای بیشینه در ایستگاه‌هایی که دارای ارتباط معنی‌داری بودند، عموماً به صورت منفی می‌باشد؛ یعنی انتظار می‌رود که با افزایش بارش، وقوع طوفان گردوغبار کاهش یابد و برعکس. از سوی دیگر علت آن که بین دمای بیشینه و طوفان گردوغبار رابطه معنی‌دار منفی دیده می‌شود، این است که همان‌طور که در نتایج قبلی دیده شد، بیشترین وقوع طوفان گردوغبار در فصل سرد سال

داد که اغلب ایستگاه‌ها دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشد که این امر بیانگر آن است که شرایط اقلیمی به‌ویژه در مناطق هموار غربی، مرکزی و جنوبی دو استان مورد مطالعه دارای شرایط همگن و یکنواختی می‌باشد. در حالی که ایستگاه‌های واقع در مناطق کوهستانی از شرایط اقلیمی با ناپایداری بیشتر برخوردار هستند.

نتایج پهنه‌بندی فراوانی وقوع و شدت طوفان گردوغبار (شکل ۴) نیز نشان داد هر قدر از جنوب‌غرب منطقه مورد مطالعه به سمت شرق و شمال‌شرق می‌رویم، از شدت و فراوانی وقوع این طوفان‌ها کاسته می‌شود. در مقایسه دو استان ایلام و خوزستان نیز ملاحظه می‌گردد که جنوب‌غرب ایلام که در همسایگی با استان خوزستان است به دلیل همگنی شرایط توپوگرافی و وضعیت اقلیمی از مشخصات طوفان‌های گردوغبار استان خوزستان بیشتر تبعیت می‌کند. در مجموع بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در دو استان ایلام و خوزستان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت فاحش به شرایط کوهستانی استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه، از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. علاوه بر این، هموار بودن دشت خوزستان نیز بر شدت فعالیت باد و در نتیجه فراوانی و شدت وقوع طوفان گردوغبار تأثیر فراوانی می‌گذارد.

همان‌طور که در نتایج ارائه شده در شکل (۳) مشاهده گردید، رخداد خشکسالی در منطقه مورد مطالعه از الگوی مشخصی تبعیت نمی‌کند و در مجموع تعداد سال‌های فراگیر خشک و مرطوب در دوره مورد مطالعه در منطقه نسبتاً محدود می‌باشد و بیشترین رویداد مربوط به شرایط نرمال است. توزیع روند ماهانه AOD در ایستگاه‌های مورد مطالعه بیانگر آن است که در ایستگاه‌های مختلف شرایط یکسان نیست؛ ولی در مجموع می‌توان گفت که مقدار AOD برای ماه‌های گرم عموماً منفی و برای ماه‌های سرد عمدتاً مثبت

این شاخص را با ویژگی‌های سطح زمین از جمله تفاوت‌های توپوگرافی، کاربری، پوشش اراضی و خصوصیات شیمیایی کانی‌های گردوغبار مرتبط دانسته‌اند.

به طور کلی نتایج حاصل از پژوهش حاضر بیانگر آن است بررسی رابطه و روند تغییرات طوفان گردوغبار، بارش، دما و بررسی شاخص‌های سنجش‌ازدوری از جمله AOD و NDDI می‌تواند دید وسیع‌تری در مدیریت بهینه و صحیح به مسئولان بدهد؛ اما شاخص‌های سنجش‌ازدوری به تنهایی نمی‌تواند معیار خوبی برای نشان دادن شرایط طوفان گردوغبار باشد. همچنین بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در دو استان ایلام و خوزستان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت به شرایط کوهستانی بودن استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد و به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. به‌طور کلی در هر دو استان مورد مطالعه از سمت غرب به شرق از شدت، تداوم و فراوانی طوفان گردوغبار کاسته می‌شود. وقوع خشکسالی در منطقه مورد مطالعه نیز از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و عموماً تعداد کل سال‌های خشک و مرطوب در دوره مورد مطالعه نسبتاً محدود بوده و اکثر رویدادها مربوط به شرایط نرمال است.

اتفاق می‌افتد. در حالی که بیشینه دما معمولاً مربوط به فصل گرم سال می‌باشد. به همین دلیل رابطه معکوس بین بیشینه دما و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار می‌تواند قابل تفسیر و توجیه‌پذیر باشد. این یافته‌ها با نتایج (Yang et al., 2007; Mohammadkhan, 2017) هم‌خوانی دارد.

طبق نتایج جدول (۵)، در اغلب ایستگاه‌ها معادلات رگرسیونی با ضریب تبیین نسبتاً بالا به دست آمده است که نشانگر ارتباط نزدیک بین پارامترهای مستقل مورد مطالعه در این تحقیق با طوفان گردوغبار به عنوان متغیر پاسخ می‌باشد.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی تعدادی از روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر بر اساس شاخص NDDI بیانگر پایین بودن مقدار این شاخص است که برآورد خوبی از وضعیت کلی غبارآلودی منطقه دارد. در پاره‌ای از موارد ملاحظه می‌گردد داده‌های حاصل از شاخص NDDI با واقعیت زمینی هم‌خوانی ندارد که این بیانگر آن است که شاخص مذکور در پاره‌ای موارد با خطاهای فاحشی همراه می‌باشد؛ بنابراین صرف اتکا به شاخص NDDI برای تعیین شرایط غبارآلودی یک منطقه نمی‌تواند از صحت و دقت قابل قبولی برخوردار باشد (شکل ۷). یافته‌های (Mehrabi et al., 2015) مبنی بر دقت نسبتاً پایین NDDI در تعیین غبارآلودی مناطق مورد مطالعه با پژوهش حاضر هم‌سو می‌باشد. آنها علت کارایی پایین

References

- Ahmadi, F. & Radmanesh, F. (2014). Trend Analysis of Monthly and Annual Mean Temperature of the Northern Half of Iran Over the Last 50 Years. *Water and Soil*, 28(4), 855-865. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29721> (In Persian)
- Ahmadi, V. & Alimohamadi, A. (2021). Combination of EVI and SPI Indices for Mapping of Drought-Prone Areas (Case Study: Kurdistan Province). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13(2), 1-22. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.2.1> (In Persian)
- Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A. & Jafari, M. (2018). Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces. *Geography (Regional Planning)*, 8(30), 59-68. <https://doi.org/20.1001.1.22286462.1397.8.2.4.3> (In Persian)
- Arami, S. A., Ownegh, M., Mohammadian Behbahani, A., Akbari, M. & Zarasvandi, A. (2018). Statistical Analysis of Spatio-Temporal Pattern of Dust Storms in West and Southwest of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 61-83. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14107.2883> (In Persian)
- Arjmand, M., Rashki, A. & Sargazi, H. (2018). Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun

- e Jazmurian, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106), 153-168. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32339> (In Persian)
- Awadh, S. M. (2023). Impact of North African sand and dust storms on the Middle East using Iraq as an example: Causes, sources, and mitigation. *Atmosphere*, 14(1), 180. <https://doi.org/10.3390/atmos14010180>
- Beroghani, M., Moradi, H.R., Zanganeh Asadi, M.A. & Pour Hashemi, S. (2019). Evaluation of the role of drought in frequency of dust in Khorasan Razavi province. *Journal of Environmental Science and Technology*. 21(5), 109-121. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.10464> (In Persian)
- Ghafari, S., Moradi, H. & Modares, R. (2018). Comparison of Temporal and Spatial Changes of Groundwater Level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan Plains. *Physical Geography Research*, 50(1), 141-160. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.226430.1006999> (In Persian)
- John, J., Qu., Xianjun, H., Menas, K. & Lingli, W. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB Measurements. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 3(4), 484 – 486. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Heim Jr, R.R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
- Heydari Alamdarloo, E., Moradi, E., Abdolshahnejad, M., Fatahi, Y., Khosravi, H. & da Silva, A.M. (2021). Analyzing WSTP trend: a new method for global warming assessment. *Environmental monitoring and assessment*, 193, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09600-2>
- Labban, A. H. & Butt, M. J. (2021). Analysis of sand and dust storm events over Saudi Arabia in relation with meteorological parameters and ENSO. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06291-w>
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183.
- Mehrabi, S., Soltani, S. & Jafari, R. (2015). Investigating the relationship between climatic parameters and the occurrence of dust storm (case study: Khuzestan province). *Journal of Soil and Water Sciences*, 71(19), 69-80. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.69> (In Persian)
- Mohammadkhan, S. (2017). Status and trends of dust storms in Iran from 1364 to 1384. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(2), 495-514. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.123300.867> (In Persian)
- Moradi, H.R., Rajabi, M. & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*, 84(1-2), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.016>
- Namdari, S., Karimi, N. K. & Mohammadi, G. (2017). Pattern analysis of dust storms in the west and southwest provinces of Iran and its relation to the Middle East dust storms. *Journal of Climate Research*, 1396(31), 103-122. (In Persian)
- Nohegar, A., Heydarzadeh, M., Eydoon, M. & Pannahi, M. (2016). Assessment of drought and its impact on surface and groundwater resources (Case study: River basin Minab). *Researches in Earth Sciences*, 7(3), 28-43. <https://doi.org/20.1001.1.20088299.1395.7.3.2.7> (In Persian)
- Pan, L., Che, H., Geng, F., Xia, X., Wang, Y., Zhu, C., Chen, M., Gao, M. & Guo, J. (2010). Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region. *Atmospheric Environment*, 44(21-22), 2587-2596.

- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.013>
- Pourali, M. & Taghizadeh, A. (2011). Source and causes of dust in Khuzestan Province. *Geography Education Journal*, 25(3), 8-13. (In Persian)
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486. <http://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Sehatkashani, S., Kamali, A., Vazifedoust, M. & A. Bidokhti, A. (2016). Study of air quality over west and south west iran using aerosol optical thickness products of MODIS. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32(1-2), 91-97. <https://doi.org/dor/20.1001.1.26764768.1395.322.12.10.3> (In Persian)
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shamshiri, S., Jafari, R., Soltani, S. & Ramezani, N. (2014). Dust detection and mapping in Kermanshah province using MODIS satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(8), 29-42. <http://doi.org/20.1001.1.24763128.1393.38.3.3> (In Persian)
- Soleimani Sardoo, F., Hosein Hamzeh, N., Karami, S., Nateghi, S. & Hashemi nezhad, M. (2022). Emission and transport of dust particles in Jazmourian basin (Case study: Dust storm 24 to 26 November 2016). *Journal of Climate Research*, 1400(48), 41-54. (In Persian)
- Statistical Yearbook of Ilam Province, Publications of Program and Budget Organization, (2011).
- Statistical Yearbook of Khuzestan Province, Publications of Program and Budget Organization, (2014).
- Vafakhah, M, Bakhshi Tiragani, M. & Khazaei, M. (2012). Analysis of rainfall and discharge trend in Kashafrood Watershed. *Geography and Development*, 10(29), 77-90. <https://doi.org/22111/GDIJ.2013.123>
- Samat, A., Abuduwaili, J., Ge, Y., De Maeyer, P. & Van de Voorde, T. (2022). Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region. *Atmospheric Research*, 275, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106242>
- Yang, B., Bräuning, A., Zhang, Z., Dong, Z. & Esper, J. (2007). Dust storm frequency and its relation to climate changes in Northern China during the past 1000 years. *Atmospheric Environment*, 41(40), 9288-9299. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.025>
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A. & Kaskaoutis, D.G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. *Remote Sensing*, 15(4), 905. <https://doi.org/10.3390/rs15040905>
- Zhao, X. (2012). Asian dust detection from the satellite observations of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *Aerosol and Air Quality Research*, 12(6), 1073-1080. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.11.0206>
- Zheng, S. & Singh, R. P. (2018). Aerosol and meteorological parameters associated with the intense dust event of 15 April 2015 over Beijing, China. *Remote Sensing*, 10(6), 957. <https://doi.org/10.3390/rs10060957>
- Zucca, C., Fleiner, R., Bonaiuti, E. & Kang, U. (2022). Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms. *Catena*, 219, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106575>

The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todehsk watershed

GholamReza Shojaei¹, Mehdi Ghorbani¹, Arash Malekian^{1*}, Amir Alambeigi², Maryam Rostami³

1. Department of Arid and Mountain Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Department of the International Center for Urban Resilience Studies, Natural Disaster Research Institute, Tehran, Iran

* Corresponding author: malekian@ut.ac.ir

(Received: 24 September 2024

Revised: 30 October 2024

Accepted: 13 December 2024)

Extended Abstract:

Introduction: Climate change is considered one of the main and important threats to the environmental, economic and social. Climate change has been occurring all over the world without taking necessary measures to reduce greenhouse gas emissions and in recent years has left disastrous effects in many countries. The increase in greenhouse gases in the atmosphere due to the development of industry and increased use of fossil fuels and changes in land use in the last few decades has caused a constant eating of climate variables especially global warming. The negative consequences of this phenomenon for mankind can be destructive to the extent that among the ten threatening factors for mankind in the 21st century, the climate change phenomenon has taken the first place. This study aims to investigate the extreme temperature and precipitation changes using the Statistical Downscaling Model to downscale the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the GCM report under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for the next three periods of the near future, the average future and the far future in the Todehsk watershed in Isfahan.

Materials and methods: In this study, to evaluate the performance of the general circulation model of MPI-ESM1-2-HR in the downscaling of maximum and minimum temperature parameters and precipitation of the Naein synoptic station in Isfahan province during 1989-2014 were used as the base period. In this model, data from 1989 to 2006 were used as the calibration and data of 2007 to 2014 were used as model validation. First, using linear regression test in SPSS software, among 26 variables of ECMWF historical data, variables that had the highest correlation with dependent variables were extracted as independent variables. Also in order to evaluate the performance of the model, goodness of fit correlation coefficient, root mean square error, nash-sutcliffe, kling gupta efficiency and taylor diagrams were used.

Results and Discussion: The results of the goodness of fit coefficient R, RMSE, NSE and KGE in the calibration and validation of the MPI-ESM1-2-HR model with the SDSM downscaling model to estimate the precipitation variables, maximum temperature and the minimum temperature of the Naein synoptic station were 0.97, 0.42, 0.96 and 0.87 respectively, which implies the high performance and accuracy of the model in modeling of climatic variables. The results showed that the output of the MPI-ESM1-2-HR model and the SDSM statistical model have high and medium performance for downscaling of maximum and minimum temperature and precipitation variable in the Naein synoptic station, respectively, and the high and average conformity between the scenario of the maximum and minimum values of the maximum and minimum temperature and the precipitation variable under scenarios SSP1-2.6 and SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for the time periods 2015-2042, 2043-2070 and 2071-2100. The results also showed that in the MPI-ESM1-2-HR model, the average monthly precipitation amounts in the time periods 2015-2042, 2043-2070 and 2071-2100 have been reduced to 0.21, 0.22 and 0.24 mm, respectively, and the average maximum temperature values were 1.49, 1.5 and 1.52 °C and the mean temperature of minimum temperature will increase 0.51, 0.53 and 0.54 °C under scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 respectively.

Conclusion: Since the current conditions of the world show the spread of climate change in all countries and in all continents and risks of sustainable development, international community needs to move toward environmentally compatible environments, use of clean and non-renewable energy and implementation of international standards for sustainable development including reduction of greenhouse gases. Therefore, it seems reasonable that among the scenarios evaluated in this research, the average scenario SSP2-4.5 is considered as a decision criterion for planning in order to propose a solution to deal with climate change in policy agenda of policy makers and planners.

Keywords: Climate Change, Downscaling, Sixth Climate Model Intercomparison Project (CMIP6), SDSM model, MPI-ESM1-2-HR model, Todehsk watershed.

Citation: Shojaei, Gh., Ghorbani, M., Malekian, A., Alambeigi, A., & Rostami, M. (2025). The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todehsk watershed. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 51-73. doi= 10.22034/iwm.2024.2041835.1175

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>).



چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک

غلامرضا شجاعی^۱، مهدی قربانی^۱، آرش ملکیان^{۲*}، امیر علم بیگی^۳، مریم رستمی^۲

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

۲. گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. گروه مرکز بین‌المللی مطالعات تاب‌آوری شهری، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: malekian@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

چکیده مبسوط

مقدمه: یکی از تهدیدهای مهم و اصلی محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی برای جهان، تغییرات اقلیمی است. بدون انجام اقدامات لازم در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم در سرتاسر زمین در حال وقوع بوده و در سالین اخیر اثرات فاجعه باری را در بسیاری از کشورها از خود به جای گذاشته است. افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو در اثر گسترش صنعت و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی در چند دهه گذشته موجب به هم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی به خصوص دمای کره زمین شده است. تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدآمیز برای بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است. هدف این پژوهش پیش‌نگری تغییرات فرین‌های حدی دمای و بارش با استفاده از کاربست مدل Statistical Downscaling Model برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از مدل‌های GCM از گزارش CMIP6 تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 جهت سه دوره آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه در حوزه آبخیز تودشک اصفهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد خروجی‌های مدل گردش عمومی MPI-ESM1-2-HR در ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه با بهره‌گیری از مدل آماری SDSM، از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک ناین استان اصفهان در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره پایه استفاده شد. در این مدل، از داده‌های سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۶ به عنوان بخش واسنجی مدل و از داده‌های سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۴ به عنوان قسمت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در ابتدا با استفاده از آزمون رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS از بین ۲۶ متغیر داده‌های تاریخی ECMWF، متغیرهایی که بالاترین میزان همبستگی با متغیرهای وابسته را داشتند، به عنوان متغیر مستقل استخراج گردید. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد این مدل از شاخص‌های برازش نکویی ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا، نش ساتکلیف، کلینگ گوپتا و دیاگرام تیلور استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج شاخص‌های برازش نکویی R، RMSE، NSE و KGE در بخش واسنجی و اعتبارسنجی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR با مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM در برآورد متغیرهای بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه ایستگاه همدیدی ناین به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۴۲، ۰/۸۷ و ۰/۹۶ بوده که حاکی از کارایی و دقت نسبتاً بالای مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR و مدل آماری SDSM به ترتیب از کارایی بالا و متوسط جهت ریزمقیاس‌سازی پارامتر بیشینه و کمینه دما و متغیر بارش در ایستگاه سینوپتیک ناین برخوردار بوده و انطباق زیاد و متوسط بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی پارامتر بیشینه و کمینه دما و متغیر بارش تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۷۰، ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد به طور کلی در مدل MPI-ESM1-2-HR مقادیر میانگین بارش ماهیانه به ترتیب در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۷۰، ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به میزان ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ میلی‌متر کاهش و مقادیر میانگین دمای بیشینه به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۵ و ۱/۵۲ درجه سانتی‌گراد و مقادیر میانگین دمای کمینه به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۳ و ۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری: از آنجایی که شرایط کنونی جهان حاکی از گسترش تغییرات اقلیمی در همه کشورها و در همه قاره‌ها بوده و دستاوردهای توسعه پایدار را به خطر می‌اندازد، جامعه بین‌المللی نیازمند حرکت به سمت فناوری‌های سازگار با محیط زیست، استفاده از انرژی‌های پاک و غیرفسیلی و اجرای ضوابط بین‌المللی مبنی بر رعایت اصول زیست‌محیطی در راستای توسعه پایدار از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. لذا معقول به نظر می‌رسد که از میان سناریوهای مورد ارزیابی در این پژوهش، سناریوی متوسط SSP2-4.5 به عنوان ملاک تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی در جهت پیشنهاد راهکار جهت مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کشور قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6)، مدل SDSM، مدل MPI-ESM1-2-HR و حوزه آبخیز تودشک

استناد: شجاعی، غ.، قربانی، م.، ملکیان، الف.، علم‌بیگی، الف. و رستمی، م. (۱۴۰۴). چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۷۳-۵۱.

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 به صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

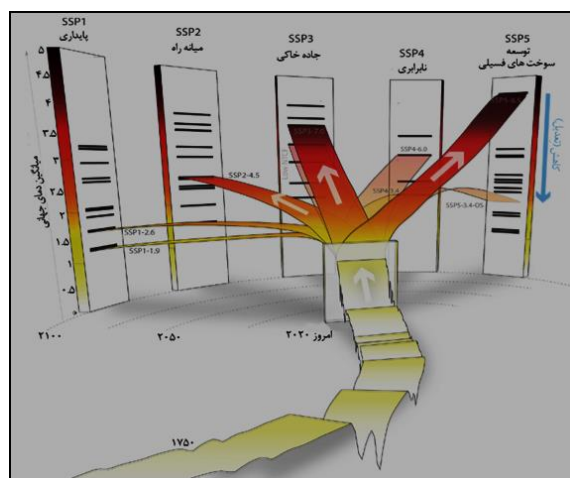
مانند ایران شده است. تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدید آمیز برای بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (IPCC, 2021). تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی^۵ و وضعیت اضطراری اقلیم^۶ اصطلاحاتی مترادف با بزرگترین چالش پایداری قرن بیست و یکم بوده است (IPCC, 2021) که پیامدهای آن به شدت مانع دستیابی به اهداف توسعه پایدار در همه‌جا و به‌ویژه در کشورهای با درآمد کم و متوسط است (IPCC, 2021). بنابراین در صورتی که فعالیت‌های مناسبی در جهت کاهش اثرات تغییر اقلیم و سازگاری با آن صورت نگیرد این پدیده می‌تواند بخش عمده‌ای از جهان را تحت تأثیر قرار دهد. مشخص است که در صورت اعمال مدیریت نادرست و بهره‌بردن از راهکارهای نامناسب، علاوه بر هدررفت منابع موجود، تشدید اثرات مخرب خشکسالی را موجب می‌شود. با توجه به وابستگی اثرات تغییر اقلیم به نتایج مدل‌های اقلیمی، دستیابی به تصویرسازی معتبر در دوره آتی با استفاده از مدل‌های اقلیمی ارائه شده امکان‌پذیر می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های گردش عمومی جو زمین به خوبی توانایی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مانند دما و بارش را در مقیاس جهانی در طول زمان و فضا دارند (Koukidis & Berg, 2009). تاکنون نسخه‌های گوناگونی از مدل‌های تغییر اقلیم ارائه شده است؛ از آن جمله می‌توان مدل اولین گزارش ارزیابی هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) با نام FAR، مدل دومین گزارش با نام SAR، مدل سومین گزارش با نام TAR، مدل چهارمین گزارش با نام AR4 (CMIP4)، مدل پنجمین گزارش با نام AR5 (CMIP5) و مدل ششمین گزارش با نام AR6 (CMIP6) اشاره کرد (Mirakbari et al., 2018). محدودیت‌ها و نقص‌های مدل‌های گزارش

در عصر حاضر نوسان و پویایی اقلیمی تاثیر فراوانی بر محیط‌زیست و توسعه اجتماعی دارد (Tubiello & Schmidhuber, 2007; Mishra et al., 2010) و بسیاری از چالش‌های جهانی مانند ناامنی غذایی، بحران آب، کاهش تنوع زیستی^۱ و مسائل سلامت، به تغییرات آب و هوایی وابسته است (Pachauri et al., 2014; Tang et al., 2015; Woznicki et al., 2016). هرچند نقش انسان‌ها در وقوع بسیاری از حوادث طبیعی غیرمترقبه با عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه است، اما آنچه مسلم است بشر در تشدید برخی بلایای طبیعی مانند پیامدهای ناشی از طوفان‌های گرد و غبار، بروز خشکسالی‌های ناشی از انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای^۲ و غیره به صورت مستقیم یا غیرمستقیم نقش دارد که این رخدادهای طبیعی سالانه هزینه‌های جانی و مالی هنگفتی را بر اقتصاد کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه و کمتر توسعه‌یافته تحمیل می‌کند (Marzi et al., 2019; Nurzaman et al., 2020). افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو در اثر گسترش صنعت و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی در چند دهه گذشته موجب به هم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی به خصوص دمای کره زمین شده که از آن به عنوان تغییر اقلیم^۳ تعبیر می‌شود (IPCC, 2021).^۴ افزایش دمای کره زمین به‌طور مستقیم باعث تغییر در فراوانی رخدادهایی نظیر خشکسالی، سیل و طوفان خواهد شد (Su-Yaun et al., 2020). تغییرات در متغیرهای اقلیمی دما و بارش، باعث تغییر در سیستم یکپارچه منابع آب شده و با ایجاد تحولاتی در شرایط منابع آب منجر به تغییرات در توزیع زمانی و مکانی منابع آب در مناطق مختلف، از جمله مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک

4- Intergovernmental Panel on Climate Change
5- Global Warming
6- Climate Emergency

1- Biodiversity
2- Greenhouse gaz
3- Climate chenge

بنابراین به‌منظور استفاده از داده‌های GCM از انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مانند LARS-WG و SDSM (Rakhimova *et al.*, 2020) در پیش‌بینی عناصر و متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. تحقیقات متعددی در ارتباط با اثر پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی در نقاط مختلف جهان و ایران صورت گرفته که بیانگر اهمیت و ضرورت مطالعه این پدیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سناریوی مسیره‌های مشترک اقتصادی - اجتماعی و مسیره‌های معرف غلظت در هر سناریو (Bjornaes, 2013)

Figure 1- Scenarios of common economic-social paths and representative paths of concentration in each scenario (Bjornaes, 2013)

در همین راستا Singh و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی تغییرات بارش را تحت سناریوهای SSP2، SSP5-8.5 و SSP1-2.6 و 4.5 در هند گزارش نمودند. براساس نتایج به‌دست آمده الگوی کاهش بارندگی سالانه در مقایسه با سناریوی کنونی (۲۰۰۵-۱۹۶۱) برای دوره (۲۰۴۰-۲۰۰۶) را به میزان ۱۸-۹ درصد، برای دوره (۲۰۷۰-۲۰۴۱) به میزان ۱۶-۱۲ درصد و افزایش روند برای دوره (۲۰۹۹-۲۰۷۱) را نشان می‌دهد. Pimonser و

پنجم (CMIP5) از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی همراه با خطاهای سیستماتیک، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هر یک از عملیات‌های کاهش به طور جداگانه و عدم تمرکز روی علوم خاص در مدل‌سازی (Stouffer *et al.*, 2017) منجر به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت شده درون مقایسه‌های CMIP6^۷ در گزارش ششم شد (O'Neil *et al.*, 2016).

در شکل ۱ سناریوهای گزارش ششم به‌صورت ترکیبی از خط سیره‌های اقتصادی-اجتماعی^۸ (SSP) شامل توسعه پایدار^۹ SSP1 و توسعه بر اساس سیاست‌های میانی^{۱۰} SSP2 و رقابت منطقه‌ای^{۱۱} SSP3 و نابرابری^{۱۲} SSP4 و توسعه سوخت‌های فسیلی^{۱۳} SSP5 و خط سیره‌های غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) نمایش داده شده؛ به‌طوریکه امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی- اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری را فراهم می‌آورند (Ansari Mahabadi *et al.*, 2022).

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو^{۱۴} (GCM) می‌باشد. مدل‌های گردش عمومی جو، یکی از معتبرترین روش‌ها جهت تولید سناریوهای اقلیمی بوده و برای ارزیابی تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند (Bessah *et al.*, 2020). با توجه به شرایط فیزیکی جو و زمین و تمامی فرآیندهای مابین آنها، کاربرد مدل‌های GCM به طور مداوم در مطالعات اقلیمی در حال افزایش است؛ اما به جهت اینکه مدل‌های GCM به لحاظ تفکیک مکانی و زمانی از گام‌های بزرگ استفاده می‌کنند داده‌های خروجی از آنها به صورت مستقیم قابلیت استفاده را ندارند؛

11- SSP3: Regional rivalry, A rocky road
12- SSP4: Inequality, A road divided
13- SSP5: Fossil-fueled development, Taking the
14- General Circulation Model

7- Coupled Model Inter Comparison Phase 6
8- Shared Socioeconomic Pathways
9- SSP1: Sustainability, Taking the green road
10- SSP2: Middle of the road

ایران) پرداختند. نتایج نشان از افزایش دما از ۱/۶۴ تا ۸/۹ درصد نسبت به دوره پایه تحت هر چهار سناریو در تمام ایستگاه‌ها است. این در حالی است که بارش در بعضی از ایستگاه‌ها و تحت برخی سناریوهای SSP کاهش و در برخی دیگر افزایشی است. افزایش در ایستگاه بوشهر تا ۱۴۰ درصد و کاهش تا بیشتر از ۱۰ درصد در ایستگاه کیش مورد انتظار است.

با توجه به توسعه مدل‌های جدید GCM و ارائه سناریوهای جدید گزارش ششم AR6 که بر پایه مسیرهای معرف غلظت و سناریوهای مسیرهای مشترک اقتصادی-اجتماعی می‌باشد و از سویی به جهت عدم قطعیت سناریوهای گزارش پنجم AR5 در آینده‌نگاری تغییرات اقلیمی و با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی منطقه شرق استان اصفهان و مستعد بودن آن جهت رخداد فرین‌های دمایی و بارش به ویژه تداوم دوره‌های گرم و بارش رگبارهای سیل‌آسا، در این پژوهش سعی شده است که بررسی نسبتاً کاملی از این فرین‌های دمایی و بارش در دوره پایه و دوره‌های آینده به عمل آید و با توجه به ناهنجاری‌ها و تهدیدهای حاصل از شدت رخداد فرین‌های اقلیمی، به‌ویژه در حوزه آبخیز تودشک اصفهان، هدف از این پژوهش، ارزیابی پیش‌نگری تغییرات نمایه‌های فرین دما و بارش با استفاده از خروجی‌های مدل CMIP6 تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک در منطقه مورد مطالعه به‌منظور افزایش تاب‌آوری ساکنان حوزه آبخیز در برابر مخاطرات طبیعی به‌عنوان نوآوری پژوهش قلمداد نمود.

مواد و روش‌ها

در شکل ۲ موقعیت موقعیت منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. حوزه آبخیز تودشک با مساحت ۱۵۵۲۸/۰۳ هکتار در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شرق شهر اصفهان، در گستره طول جغرافیایی "۳۵' ۴۰" ۵۲° تا "۴۷' ۴۹" ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی "۳۷' ۴۱" ۳۲° تا "۲۱' ۴۹" ۳۲° شمالی واقع شده است. متوسط

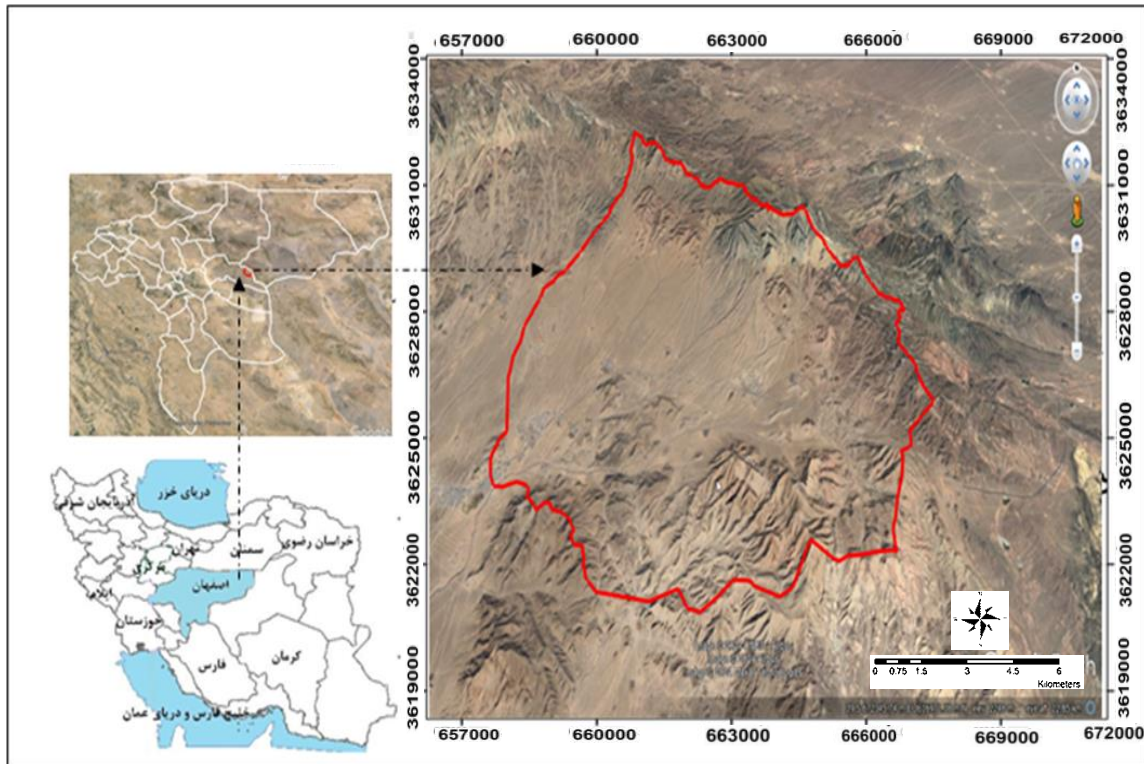
همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه تحت عنوان ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6، تغییرات بارش در جنوب شرق آسیا را بررسی نمودند. براساس نتایج ایشان مدل TaiESM بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی بارش در بین ۲۷ مدل مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه داشت. Cheng و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌های گزارش پنجم و ششم را در شبیه‌سازی فرین‌های آب و هوایی باهم مقایسه کردند و نتایج نشان داد مدل‌های گزارش ششم توانایی بالاتری نسبت به مدل‌های گزارش پنجم برای شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی دارد.

در کشور ایران Roshani و Hamidi (۲۰۲۱) در تحقیق خود به شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش ایستگاه ساری با استفاده از مدل‌های NESM3 و HadGEM3-GC31-LL ACCESS-CM2 از مدل‌های اقلیمی سری ششم پرداختند. آنها با انتخاب مدل ACCESS-CM2 به‌عنوان بهترین مدل، پیش‌بینی داده‌ها را تحت ۲ سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده انجام دادند. بنابر نتایج ایشان در این ایستگاه، دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت و میانگین مقدار بارش سالانه نیز در حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد فزونی می‌یابد. Zarian (۲۰۲۲) نیز در مطالعه‌ای تحت عنوان اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد براساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 نتیجه گرفتند؛ مدل‌های BCC-CSM2-MR و CanESM5 به‌ترتیب بیشترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه (یزد، بافق، رباط، پشت بادام و مروست) داشت. همچنین در تمامی سناریوهای انتشار SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 دمای سالانه در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارندگی سالانه بین ۱۳/۷ تا ۱۳/۷ درصد کاهش پیدا خواهد کرد.

Parakandeh و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود به ارزیابی تغییرات دما و بارش آینده توسط ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو (مطالعه موردی ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک سواحل جنوبی

در این پژوهش به منظور مقایسه عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR در ریزمقیاس‌سازی پارامترهای بیشینه و کمینه دما و بارش روزانه از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ناین که در جدول ۱ مشخصات آن آورده شده است، به جهت تطابق شرایط این ایستگاه با مشخصات آب و هوایی غالب در این حوزه آبخیز و دسترسی به داده‌های اقلیمی با کیفیت و پیوسته به منظور تحلیل تغییرات فرین‌های دما و بارش به‌عنوان شاخص اصلی آسیب‌پذیری اقلیمی در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه استفاده شد.

بارندگی منطقه ۱۶۵ میلی‌متر و متوسط حجم حاصل از بارش‌های سالانه در سطح حوضه حدود ۲۳/۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. حوضه تودشک یکی از زیرحوضه‌های مهم رودخانه زاینده‌رود استان اصفهان و در تقسیمات آبی کشور جزئی از حوضه گاوخونی با نام کوهپایه-سگزی و کد شناسایی ۴۲۰۱ می‌باشد. موقعیت مراکز جمعیتی با وجود ۱۹ روستا و ۱ شهر با توزیع جمعیتی بالغ بر ۴۵۰۰ نفر، وضعیت آبراهه‌ها، سیل‌خیزی و رسوبدهی نواحی مختلف آن و نحوه کنترل جریان‌های سطحی و تداوم دوره‌های خشکسالی به‌عنوان یک حوضه مهم در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

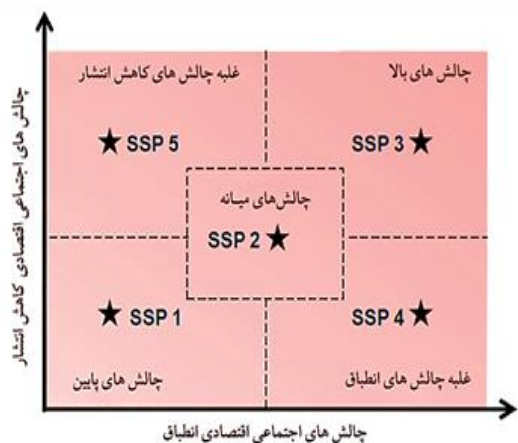


شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه (حوزه آبخیز تودشک)
Figure 2- Location of the study area (Todshk Watershed)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ناین
Table 1- Characteristics of the Naeen synoptic station

ردیف	نام ایستگاه هواشناسی	نوع ایستگاه هواشناسی	مختصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی		ارتفاع (متر از سطح دریا)	وابسته به سازمان
			طول جغرافیایی (درجه-دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه-دقیقه)		
1	ناین	سینوپتیک	53° 05'	32° 51'	1549	هواشناسی

تأکید دارد (O'Neil *et al.*, 2020). سناریوهای اصلی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب شرایط خوش‌بینانه تا بدبینانه برای واداشت تابشی در اتمسفر را پیش‌بینی می‌کنند؛ سناریوی SSP1-2.6 پایین‌ترین میزان واداشت تابشی و سناریوی SSP2-4.5 دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط و سناریوی SSP5.8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (Ansari *et al.*, 2021).



شکل ۳- چالش‌های اقتصادی اجتماعی انطباق و انتشار

Figure 3- Social economic challenge of adaptation and mitigation

معیارهای ارزیابی نیکویی برازش

مدل MPI-ESM1-2-HR یکی از مدل‌های پیش‌بینی جوی مطرح در جهان می‌باشد که توسط موسسه Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) کشور آلمان توسعه داده شده است. از بین ۲۶ سال (۲۰۱۴-۱۹۸۹) آمار داده‌های بارش، دمای روزانه بیشینه و کمینه ایستگاه سینوپتیک نایین، ۱۸ سال اول آن برای واسنجی (کالیبراسیون) مدل و ۸ سال باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. برای صحت‌سنجی مدل، با استفاده از قابلیت تولیدکننده‌های اقلیمی

مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM¹⁵

مدل SDSM یک مدل ریزمقیاس‌کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم هزینه داده‌های ریزمقیاس‌شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالانه را دارا می‌باشد و امروزه به‌عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس‌نمایی و بهترین مولد داده شرطی در جهان شناخته شده است (Godarzi *et al.*, 2016).

این مدل به منظور تولید داده‌های اقلیمی آینده از یک رابطه رگرسیونی با بالاترین درجه همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌کند که می‌بایست با روش سعی و خطا بالاترین همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیرهای پیش‌بینی‌شونده را بدست آورد. اولین نسخه این مدل در سال ۲۰۰۱ با عنوان SDSM 2.2 ارائه شد. از آن زمان تاکنون این مدل چندین بار تحت بازنگری قرار گرفته است. در این مدل روابط بین پیش‌بینی‌کننده‌ها (خروجی مدل‌های گردش عمومی) و پیش‌بینی‌شونده‌ها (داده‌های تاریخی ایستگاه‌های هواشناسی) بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و روابط تجربی بین آنها تعیین و به کاربر اعلام می‌گردد (Wilby *et al.*, 2007). طبق پژوهش‌های انجام شده، SDSM به‌عنوان بهترین ترکیب حاصل از مولد تصادفی آب و هوا و روش‌های رگرسیون چندگانه خطی شناخته شده است (Khan *et al.*, 2006).

سناریوی انتشار SSP

خروجی مدل‌های AR6 تحت سناریوهای جدید خطوط سیر مشترک اقتصادی-اجتماعی^{۱۶} (SSPS) و غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. در شکل ۳ سناریوهای گزارش ششم به ۵ زیر گروه اصلی تقسیم شده و به مواردی مانند جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و سناریوهای تعمیم‌یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری)

به مقادیر اندازه‌گیری بوده و از رابطه (۱) به دست می‌آید (Lee et al., 2006).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o) (X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (2)$$

ضریب همبستگی (R) ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری و یک ابزار ریاضی برای پایه‌ریزی تحلیل‌های اقلیمی بسیار کاربرد دارد و از رابطه (۲) به دست می‌آید (Sedaghatkar, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T ((Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2)}{\sum_{t=1}^T ((Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2)} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2} \sqrt{\left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (4)$$

بهترین مقدار برای معیار نش‌ساتکلیف (NSE) و کلینگ‌گوپتا (KGE) عدد ۱ است که نشان‌دهنده تطابق کامل سری‌ها است و از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید (Kult et al., 2014).

نتایج

در جدول ۲ متغیرهای مستقل غالب انتخاب‌شده جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در فرایند مدل‌سازی و سناریوسازی نشان داده شده است. نتایج شاخص‌های برآزش نکویی نیز با استفاده از داده‌های ECMWF در جدول ۳ ارائه شده است.

ECMWF و خروجی مدل گردش عمومی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ سری زمانی تولید شده با سری زمانی مشاهداتی، پارامترهای اقلیمی در دوره‌های مورد نظر مقایسه شد. برای انتخاب متغیرهای مستقل غالب از آزمون رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماری در مدل SDSM جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی استفاده گردید. عملکرد مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بر اساس شاخص‌های نیکویی برآزش شامل R، RMSE، NSE، KGE و دیاگرام تیلور ارزیابی شده است.

در روابط ۱، ۲، ۳ و ۴، X_o به ترتیب مقادیر بارندگی، دمای بیشینه و کمینه ماهانه مشاهداتی و X_s به ترتیب مقادیر بارندگی، دمای بیشینه و کمینه شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی، X_o و X_s نیز به ترتیب میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، N تعداد داده‌ها، σ انحراف معیار، T دوره زمانی، μ میانگین و r همبستگی خطی بین داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2} \quad (1)$$

مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان قیاسی برای بیان اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت

جدول ۲- متغیرهای مستقل غالب انتخاب شده جهت مدل‌سازی و سناریوسازی

Table 2- Dominant independent variables selected for modeling and scenario creation

VIF	Tolerance	R	تعریف متغیر پیش‌بینی کننده	علامت متغیر پیش‌بینی کننده	مولفه هواشناسی	ردیف
1.136	0.881	0.951	دما در ارتفاع ۲ متری	temp-day	دمای بیشینه	1
1.136	0.881	0.951	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۸۵۰ هکتوپاسکال	p850-day	روزانه	
1.148	0.881	0.951	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال	s850-day		
1.136	0.881	0.945	دما در ارتفاع ۲ متری	temp-day	دمای کمینه	2
1.136	0.881	0.945	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال	s850-day	روزانه	
1.018	0.982	0.421	رطوبت ویژه سطحی	shum-day	بارش	3
1.018	0.982	0.421	رطوبت سطحی در نزدیکی سطح	prcp-day	روزانه	

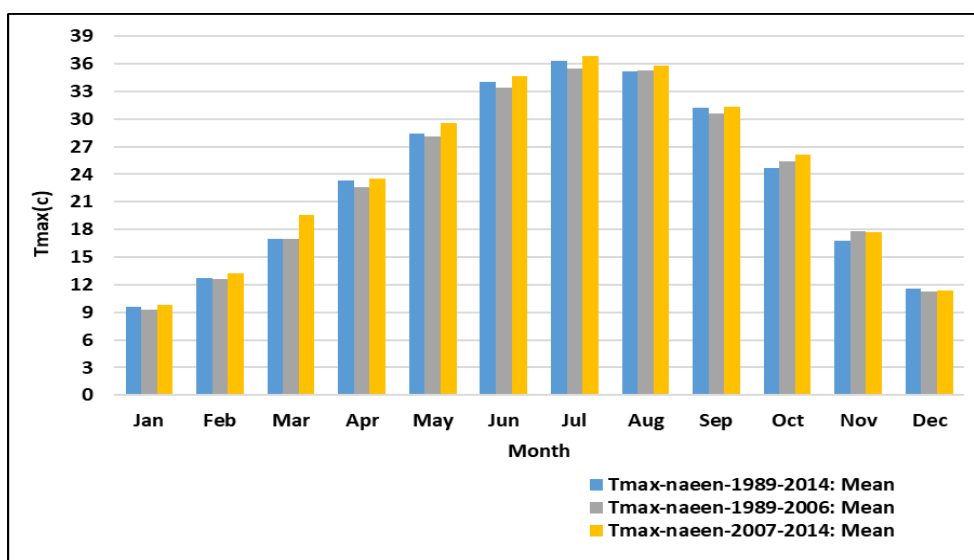
جدول ۳- ارزیابی مدل SDSM در مرحله واسنجی و صحت سنجی مولفه‌های هواشناسی

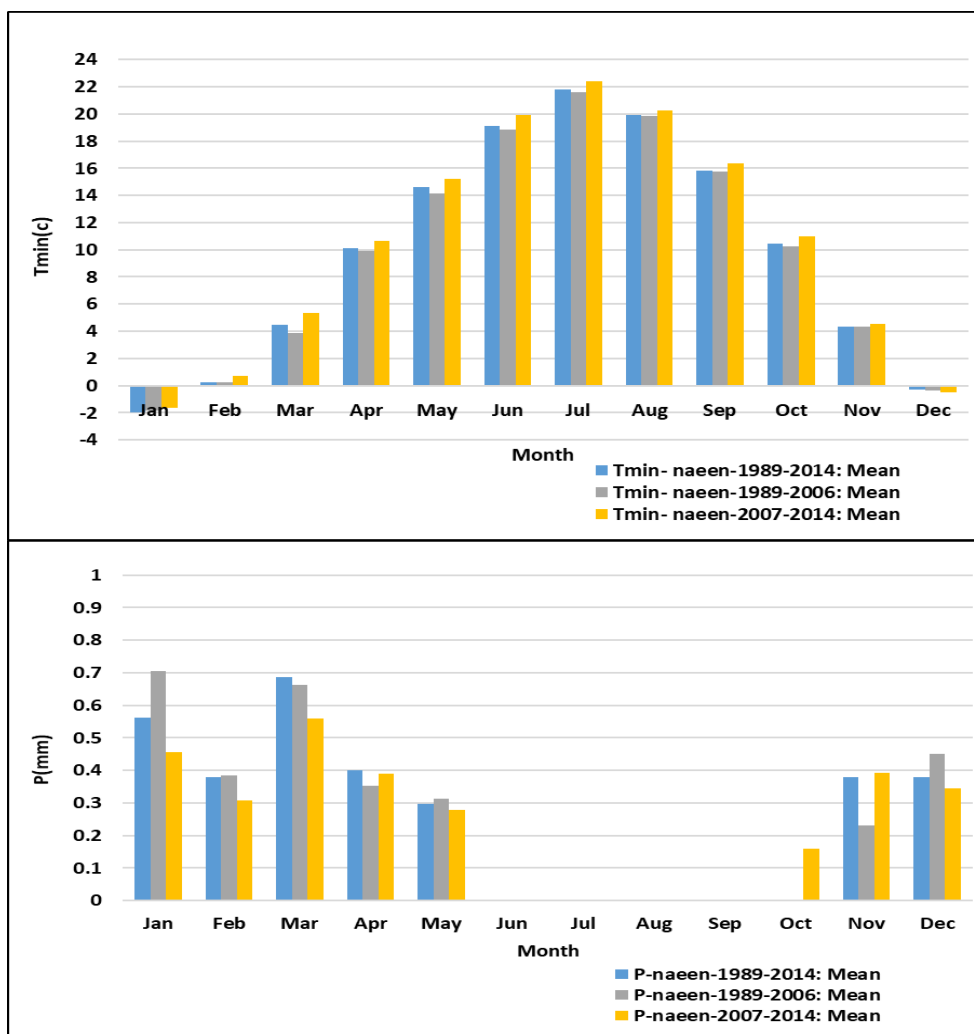
Table 3- Evaluation of the SDSM model in the calibration and validation stage of the meteorological components

صحت سنجی (اعتبارسنجی) مدل				واسنجی (کالیبراسیون) مدل				مولفه هواشناسی	نام مدل
KGE	NSE	RMSE	R	KGE	NSE	RMSE	R		
0.936	0.988	1.013	0.990	0.964	0.996	0.568	0.999	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.897	0.995	0.545	0.995	0.963	0.999	0.257	0.999	دمای کمینه	
0.638	0.910	0.071	0.940	0.869	0.926	0.065	0.940	بارش	

دارد. اما بارندگی یک کمیت گسسته بوده و مقدار آن در یک حوضه تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که انطباق زیادی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی وجود داشته لذا ریزمقیاس‌سازی داده‌های دما و بارش در مدل MPI-ESM1-2-HR از توانایی قابل قبولی برخوردار است و می‌توان برای تولید داده‌های اقلیمی طی دوره‌های آتی استفاده نمود. در شکل ۵ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی متغیرهای اقلیمی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش با استفاده از قابلیت ترسیمی دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

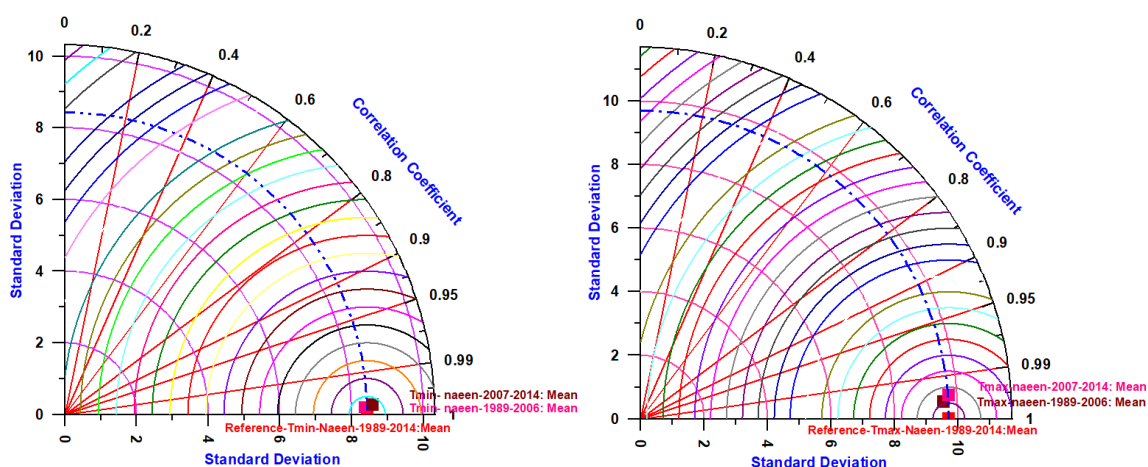
در شکل ۴ نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی و مشاهداتی متغیرهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش نشان داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR در برآورد بارش، دمای بیشینه و کمینه ایستگاه همدیدی نایین نشان داد که مدل مذکور از کارایی و دقت خوبی برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد، داده‌های پیش‌بینی‌شده متغیر دما نسبت به متغیر بارش، همبستگی بالاتری را با داده‌های مشاهداتی داشتند. این موضوع بدان علت است که دما یک متغیر پیوسته بوده و نسبت به بارندگی تغییرپذیری کمتری

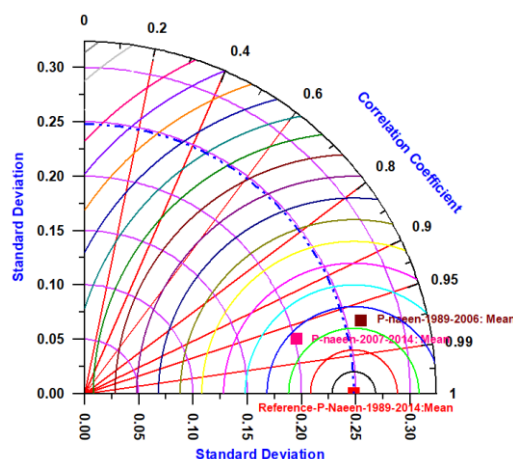




شکل ۴- نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش

Figure 4- Comparison diagram of monthly average values of calibration and validation predicted and observations of maximum temperature, minimum temperature and precipitation





شکل ۵- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش

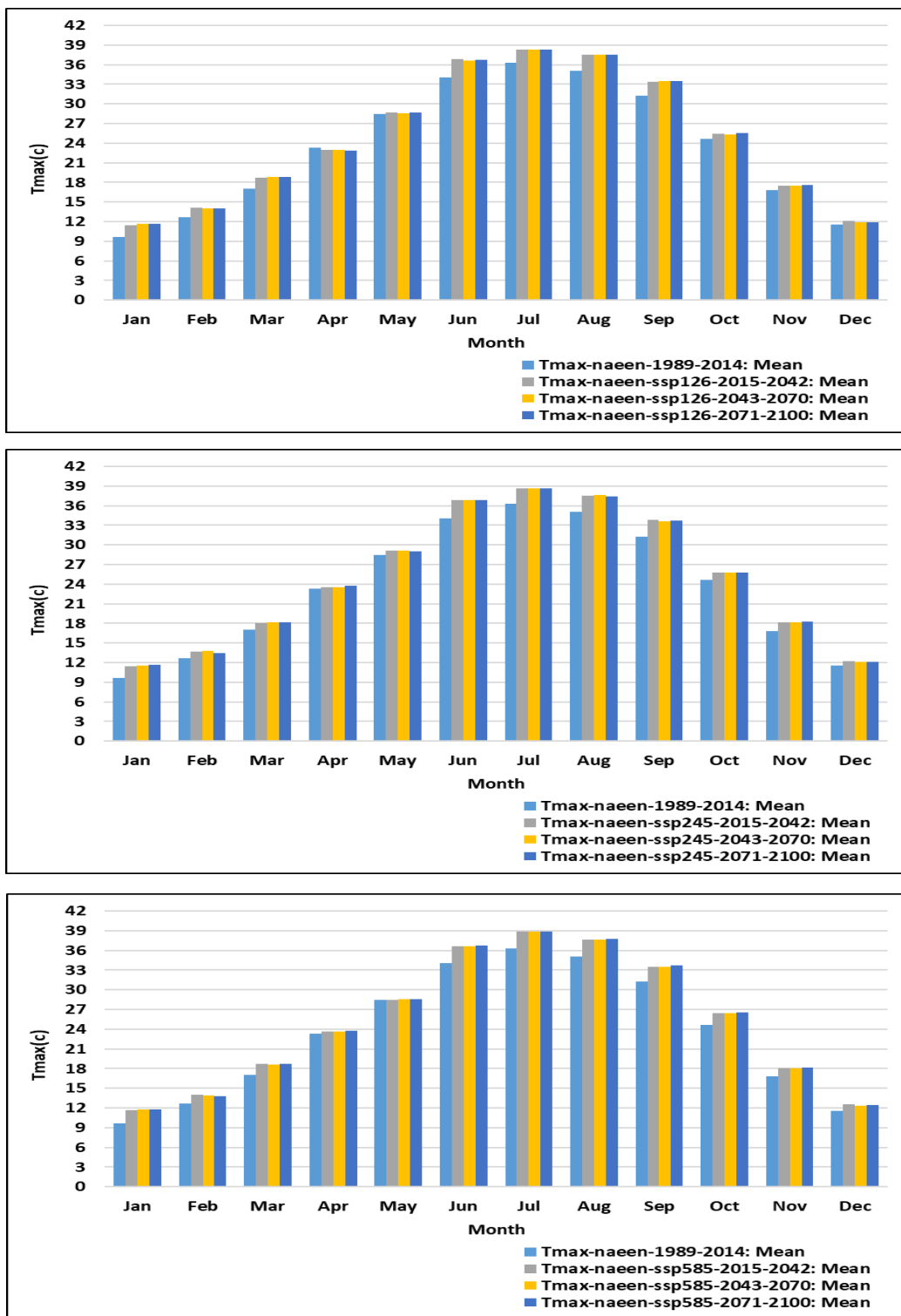
Figure 5- Taylor diagram of monthly average values of calibration and validation predicted and observations of maximum temperature, minimum temperature and precipitation

پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP5-8.5 بوده، به طوری که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه ژوئن بوده و به ترتیب ۱/۱۶، ۲/۵۶، ۲/۶۱ و ۲/۷۷ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. برای ارزیابی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ از شاخص‌های نیکویی برآزش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۴ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی بالایی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک نایین برخوردار بوده و انطباق زیادی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ وجود دارد. همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طورکلی مقادیر میانگین دمای بیشینه به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۵ و ۱/۵۲ درجه

پیش‌بینی درجه‌حرارت بیشینه در دوره‌های آتی در شکل ۶ روند تغییرات میانگین ماهیانه درجه حرارت بیشینه در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP1-2.6 بوده، به طوری که بیشترین افزایش مربوط به ماه ژوئن و به ترتیب ۱/۰۲، ۲/۷۸، ۲/۶۶ و ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP2-4.5 بوده، به گونه‌ای که بیشترین افزایش مربوط به ماه ژوئن و به ترتیب ۱/۴۲، ۲/۸۲، ۲/۸۴ و ۲/۸۹ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی

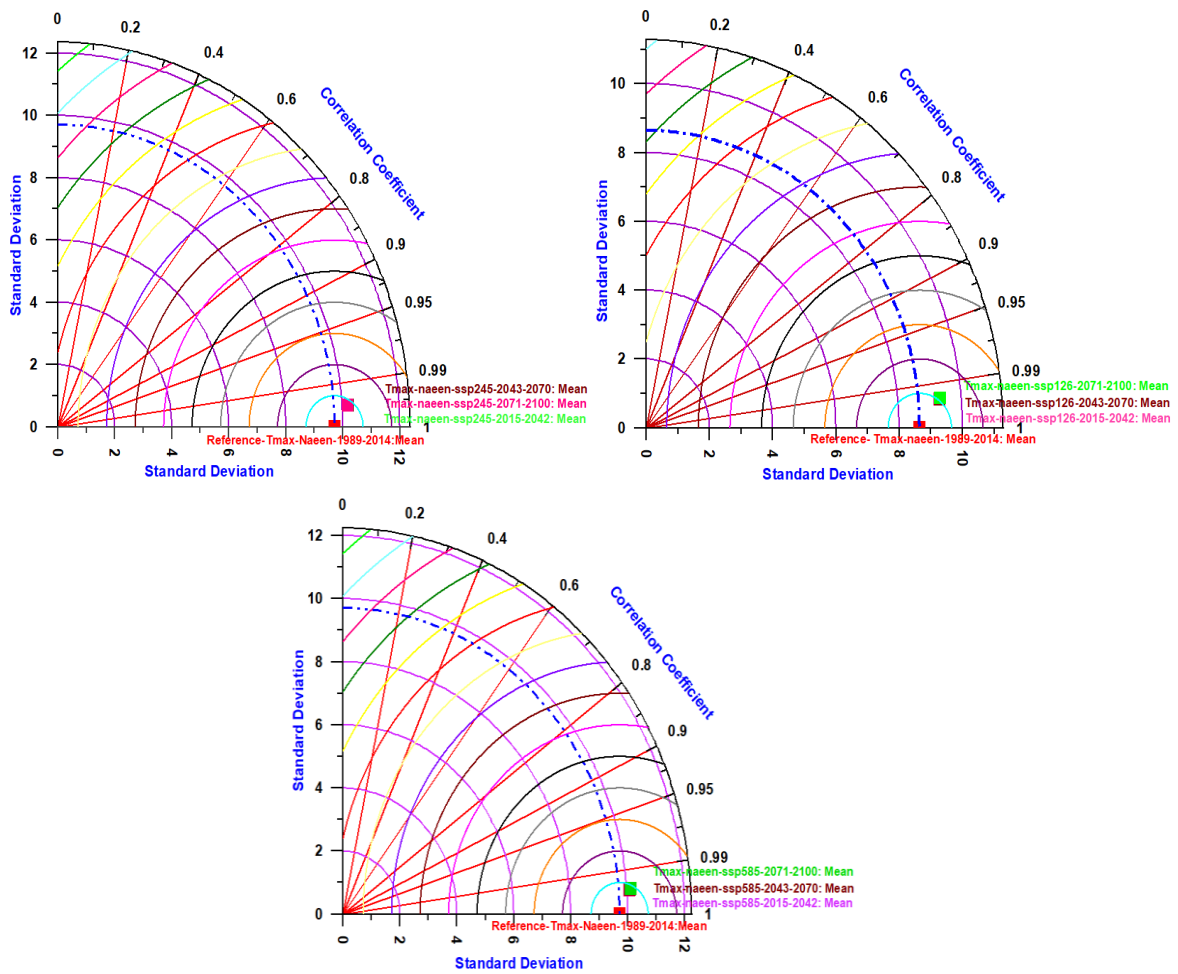
شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه با استفاده از قابلیت ترسیمی دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در شکل ۷ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر



شکل ۶- نمودار مقایسه میانگین میانه ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 6- Comparison diagram of monthly average of simulated and observed values of the maximum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۷- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه تحت سناریو SSP2- و SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و 4.5

Figure 7- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the maximum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

جدول ۴- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی دمای بیشینه

Table 4 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of maximum temperature

KGE	NSE	RMSE	R	دوره زمانی	سناریو	مولفه هواشناسی	نام مدل
0.852	0.969	1.643	0.99	2015-2042	SSP1-2.6	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.854	0.969	1.632	0.99	2043-2070			
0.851	0.967	1.678	0.99	2071-2100			
0.828	0.966	1.722	0.99	2015-2042	SSP2-4.5	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.830	0.966	1.723	0.99	2043-2070			
0.830	0.966	1.726	0.99	2071-2100			
0.836	0.962	1.806	0.99	2015-2042	SSP5-8.5	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.834	0.962	1.805	0.99	2043-2070			
0.826	0.959	1.879	0.99	2071-2100			

پیش‌بینی درجه حرارت کمینه در دوره‌های آتی

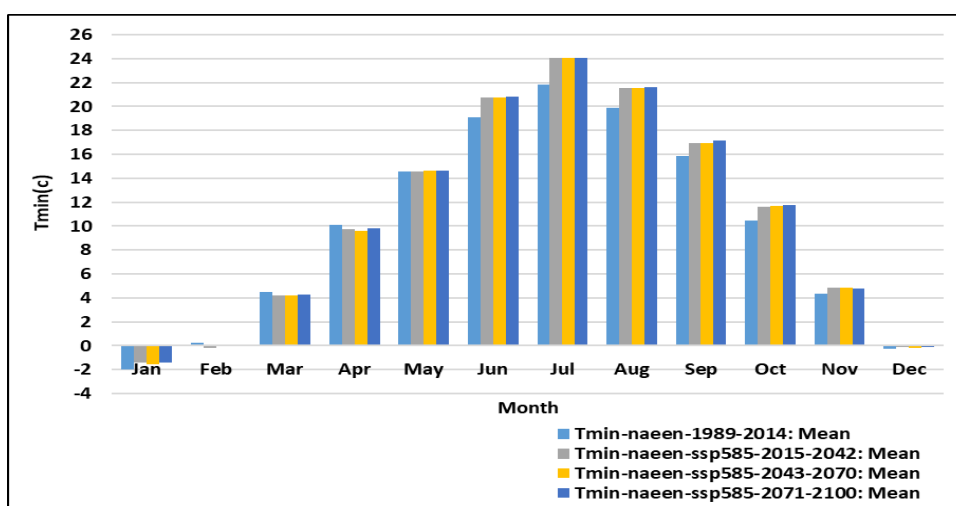
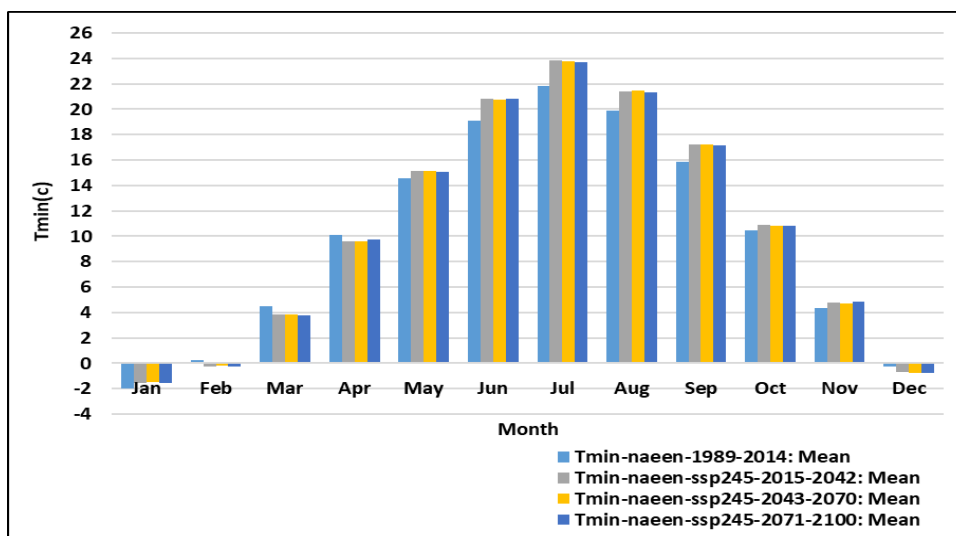
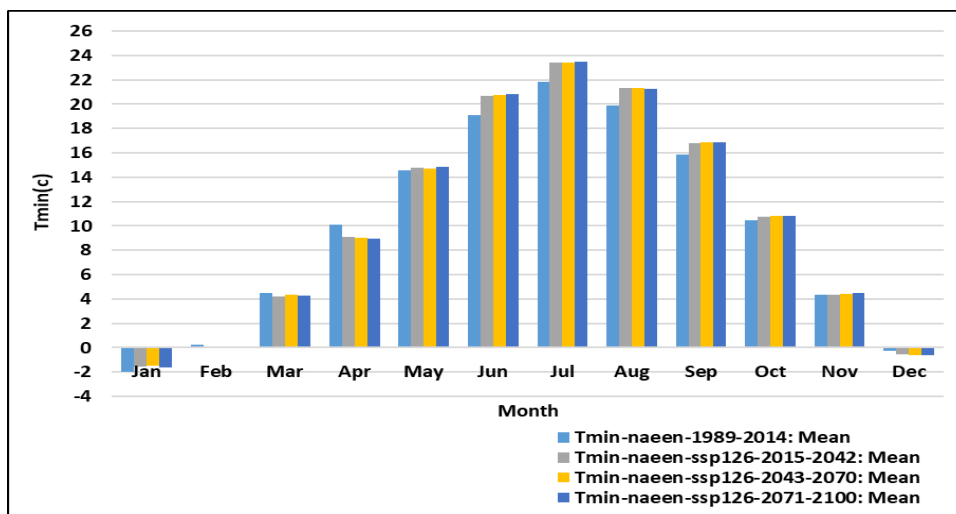
در شکل ۸ روند تغییرات میانگین ماهیانه درجه حرارت کمینه در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP1-2.6 بوده، به طوری که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه ژوئن بوده و به ترتیب ۱/۰۲، ۱/۵۳، ۱/۶۵ و ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است.

همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه تحت سناریو SSP2-4.5 بوده، به گونه‌ای که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه جولای بوده و به ترتیب ۱/۱۱، ۲/۰۰، ۱/۹۳ و ۱/۸۷ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP5-8.5 بوده، به طوری که بیشترین

افزایش دما مربوط به ماه جولای بوده و به ترتیب ۰/۹۵، ۲/۲۴، ۲/۲۵ و ۲/۲۴ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است. برای ارزیابی سناریوهای تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ از شاخص‌های نیکویی برآزش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۵ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی بالایی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر دمای کمینه در ایستگاه سینوپتیک نایین برخوردار بوده و انطباق زیادی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۷۰ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ وجود دارد. همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طور کلی مقادیر میانگین دمای کمینه به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۳ و ۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در شکل ۹ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه با استفاده از قابلیت ترسیم دیگرام تیلور نمایش داده شده است.

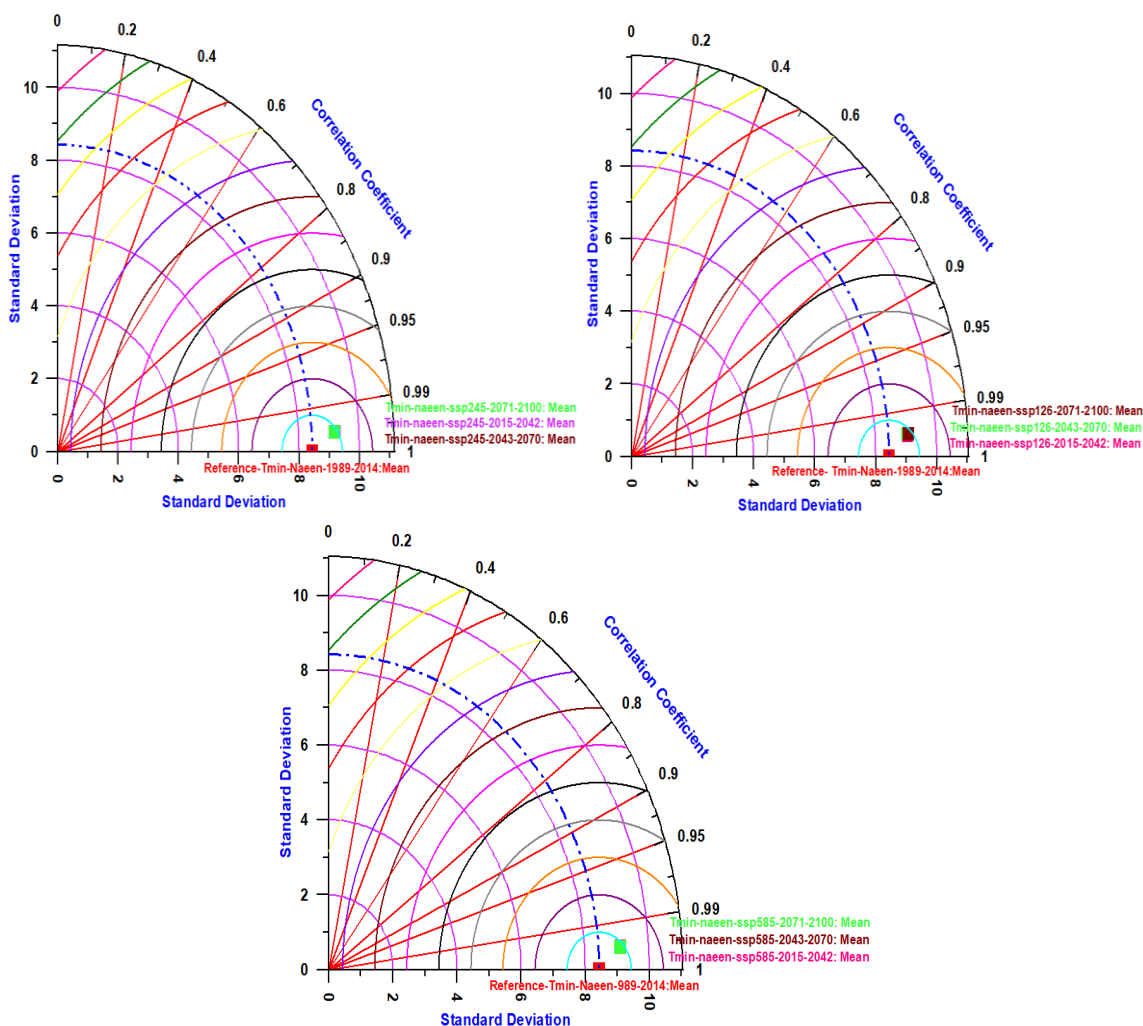
جدول ۵- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی دمای کمینه
Table 5 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of mainimum temperature

نام مدل	مولفه هواشناسی	سناریو	دوره زمانی	R	RMSE	NSE	KGE
		SSP1-2.6	2015-2042	0.99	0.884	0.988	0.827
			2043-2070	0.99	0.915	0.987	0.826
			2071-2100	0.99	0.939	0.986	0.818
MPI-ESM1-2-HR	دمای کمینه	SSP2-4.5	2015-2042	0.99	1.037	0.983	0.778
			2043-2070	0.99	1.030	0.984	0.780
			2071-2100	0.99	1.006	0.984	0.784
		SSP5-8.5	2015-2042	0.99	1.081	0.982	0.784
			2043-2070	0.99	1.084	0.982	0.782
			2071-2100	0.99	1.118	0.981	0.774



شکل ۸- نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 8- Comparison diagram of the monthly average of simulated and observed values of the minimum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۹- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 9- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the minimum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

مربوط به ماه ژانویه بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۱۴، ۰/۲۱، ۰/۲۵ و ۰/۳۲ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از کاهش و افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP2-4.5 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۲۸ و ۰/۲۳، ۰/۲۱، ۰/۰۴ میلی‌متر

پیش‌بینی متغیر بارش در دوره‌های آتی در شکل ۱۰ روند تغییرات میانگین ماهیانه بارش در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۷۰، ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از کاهش و افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP1-2.6 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۴، ۰/۴۶، ۰/۳۹ و ۰/۲۹ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی

بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. برای ارزیابی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ از شاخص‌های نیکویی برازش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۶ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی متوسطی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر بارش در ایستگاه سینوپتیک ناین برخوردار بوده و انطباق متوسطی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ وجود دارد.

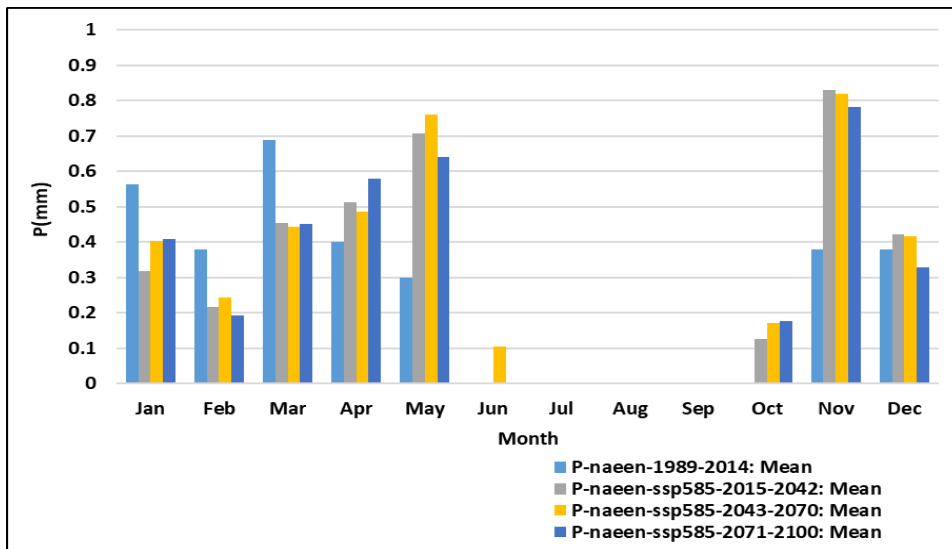
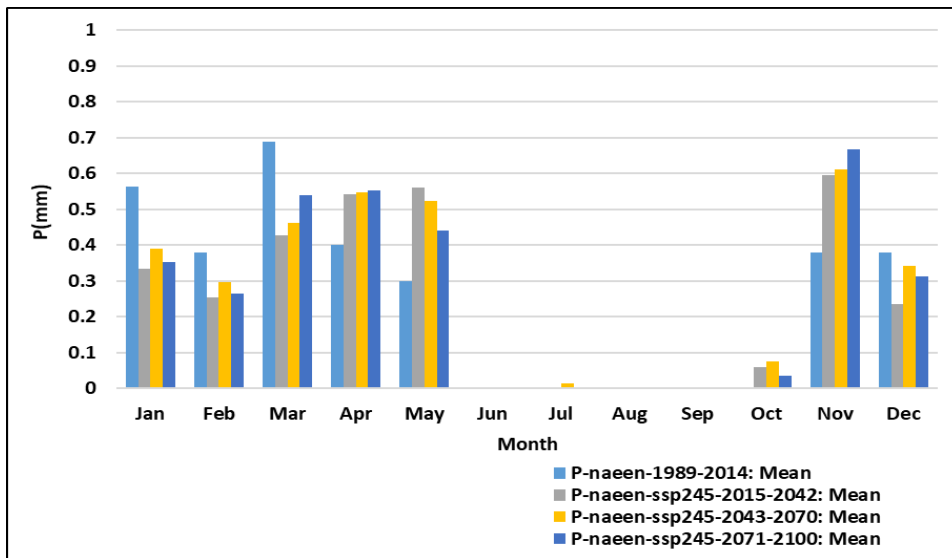
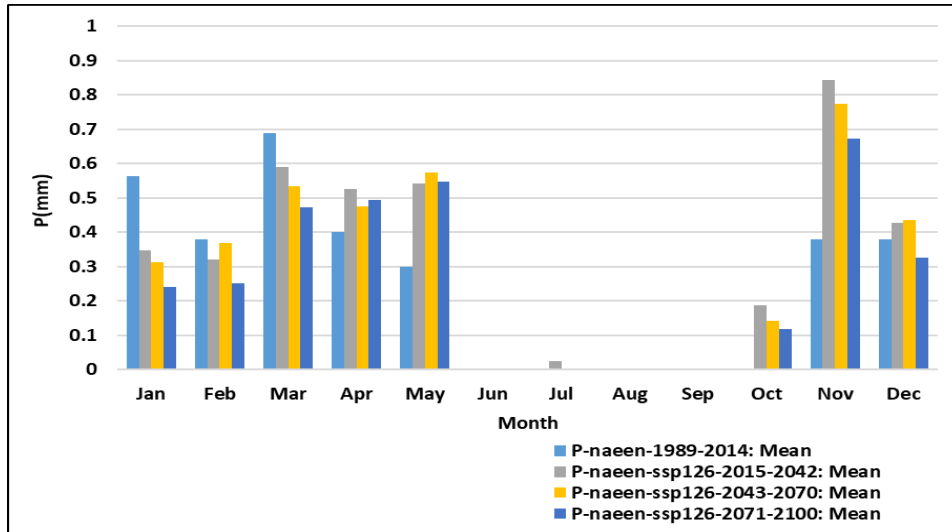
همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طور کلی مقادیر میانگین بارش به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ میلی‌متر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. در شکل ۱۱ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی متغیر بارش با استفاده از قابلیت ترسیمی دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است.

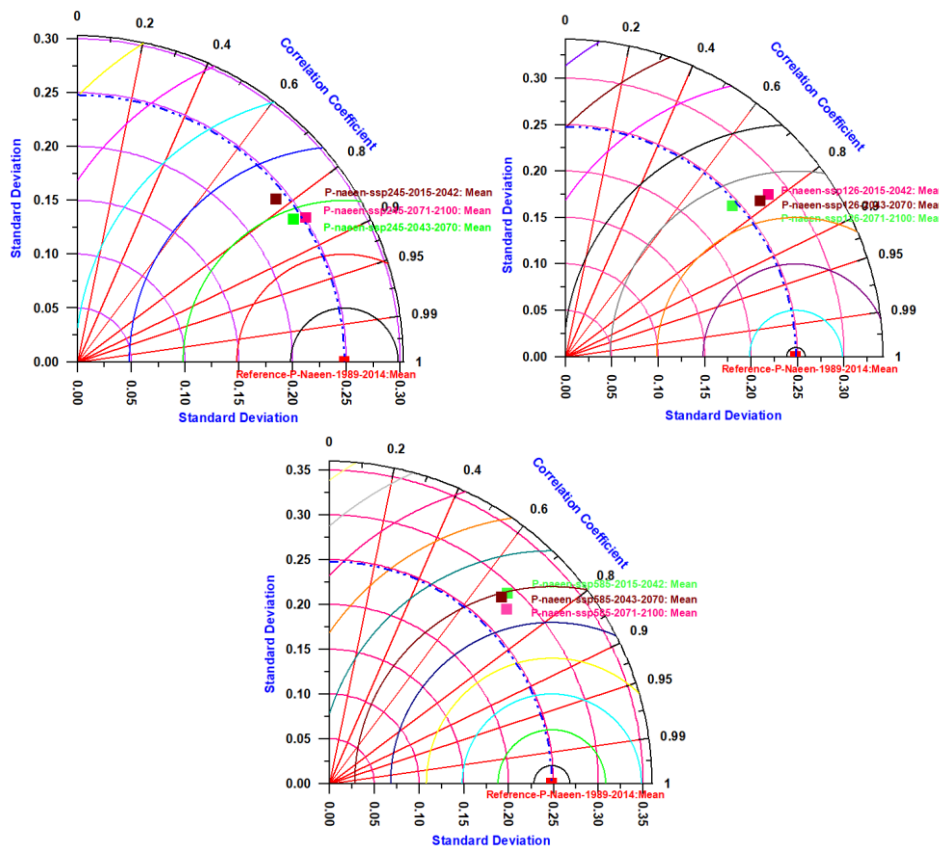
بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه مارس بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۲۲ و ۰/۱۵ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از کاهش افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP8-8.5 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۶، ۰/۴۵، ۰/۴۳ و ۰/۴۰ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه مارس بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۲، ۰/۲۳، ۰/۲۴ و ۰/۲۳ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش

جدول ۶- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی بارش
Table 6 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of Percipitation

نام مدل	مولفه هواشناسی	سناریو	دوره زمانی	R	RMSE	NSE	KGE
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP1-2.6	2015-2042	0.610	0.180	0.425	0.371
			2043-2070	0.610	0.171	0.484	0.534
			2071-2100	0.550	0.161	0.495	0.737
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP2-4.5	2015-2042	0.600	0.157	0.561	0.754
			2043-2070	0.700	0.136	0.674	0.789
			2071-2100	0.710	0.133	0.687	0.836
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP5-8.5	2015-2042	0.470	0.213	0.196	0.398
			2043-2070	0.460	0.216	0.173	0.293
			2071-2100	0.510	0.196	0.316	0.493



شکل ۱۰- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی بارش تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5
 Figure 10- Comparison of the monthly average of simulated and observed values of the Percipitation under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۱۱- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی بارش تحت سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 11- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the Percipitation under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

(Stofer *et al.*, 2017) بود، لذا منجر به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت شده درون مقایسه‌ای CMIP6 در گزارش ششم شد (O'Neil *et al.*, 2016). در واقع گزارش ششم شامل سناریوهای جدید سازماندهی شده از مدل‌های اقلیمی جهانی هستند که الگوی تکامل و ویژگی‌های سازماندهی فازهای قبلی (CMIP5) را ادامه داده و جهت شناخت مکانیسم‌های مختلف آب و هوایی مورد طراحی قرار گرفته است (Eyering *et al.*, 2016). مدل‌های موجود در گزارش ششم وضوح بیشتری را با بهبود فرآیندهای پویا شامل شده است. مقایسه تحقیقات پراکنده انجام شده براساس مدل‌های گزارش پنجم با نتایج برون‌داد مدل‌های گزارش ششم نشان داد که مدل‌های گزارش ششم دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های گزارش پنجم در شبیه‌سازی بارش و دما

بحث

با توجه به اهمیت بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترها و رخداد‌های حدی آب و هوایی به صورت گسترده مورد توجه بوده و مقابله و سازگاری با آن امری اجتناب‌ناپذیر است. برای مدیریت با این رخداد، مدیران و برنامه‌ریزان نیازمند مدیریت خطر هستند تا دچار مدیریت بحران نشوند.

از آنجایی که در تحقیقات انجام گرفته با گزارش پنجم تغییرات اقلیمی (CMIP5) دارای محدودیت‌ها و نقص‌هایی از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی همراه با خطاهای سیستماتیک، عدم قطعیت سناریوها در آینده‌نگاری اقلیمی، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هر یک از عملیات‌های کاهش به طور جداگانه و عدم تمرکز روی علوم خاص در مدل‌سازی

قابل توجه بارش در برخی از دوره‌ها در سناریوها می‌تواند ناشی از فرضیات متفاوت در نظر گرفته شده در آنها باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش نشان داد که بررسی، آنالیز و تخمین وضعیت اقلیم در دوره‌های آینده می‌بایست از مهمترین موضوعات تحقیقاتی باشد تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان بتوانند تصمیمات اجرایی در جهت اقدامات کاهش و سازگاری با پدیده تغییر اقلیم را اتخاذ نمایند. این امر برای کشوری همچون ایران که دارای اقلیم گرم و خشک و با پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی است، ضروری‌تر می‌باشد زیرا وقوع تغییر اقلیم در اینگونه مناطق، می‌تواند اثرات مخرب‌تری داشته باشد. از آنجایی که شرایط کنونی جهان حاکی از گسترش تغییرات اقلیمی در همه کشورها و در همه قاره‌ها بوده و دستاوردهای توسعه پایدار را به خطر می‌اندازد، جامعه بین‌المللی نیازمند حرکت به سمت فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست، استفاده از انرژی‌های پاک و غیرفسیلی و اجرای ضوابط بین‌المللی مبنی بر رعایت اصول زیست‌محیطی در راستای توسعه پایدار از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. لذا بهره‌گیری از سناریوی SSP5-8.5 که یک سناریوی بدبینانه می‌باشد، به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری جهت مقابله و سازگاری با آنچه در آینده اتفاق می‌دهد تا حد فراوانی غیرمنطقی و غیرعلمی می‌باشد. از طرفی انتخاب سناریوی SSP1-2.6 به‌عنوان یک اصل جهت تصمیم‌گیری با توجه به وضعیت کشورهای توسعه نیافته یا در حال توسعه و قرار گرفتن این قبیل کشورها در ابتدای راه تغییرات اساسی سازگار با محیط‌زیست، بیش از اندازه خوش‌بینانه به نظر می‌رسد. لذا منطقی می‌باشد که از میان سناریوهای مورد ارزیابی در این پژوهش، سناریوی متوسط SSP2-4.5 به‌عنوان ملاک تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی به منظور پیشنهاد راهکار جهت مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کشور قرار گیرد.

می‌باشد (Zamani *et al.*, 2020). لذا در پژوهش حاضر به منظور پیش‌نگری تغییرات شاخص‌های حدی دمایی و بارش از مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR، که یکی از کاراترین مدل‌های GCM از گزارش CMIP6 می‌باشد تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه دوره آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه استفاده گردید. جهت ارزیابی عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR از شاخص‌های برازش نکویی R، RMSE، NSE، KGE و دیاگرام تیلور در واسنجی و اعتبارسنجی مدل و تولید سناریوهای اقلیمی استفاده شد. همچنین معیارهای ارزیابی عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR و نزدیکی متغیرهای پیش‌بینی‌شده با نقطه مرجع در دیاگرام تیلور، حاکی از دقت بالای مدل در ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای دمای بیشینه و کمینه و دقت متوسط مدل در خصوص متغیر بارش تحت سه سناریو خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه در سه دوره زمانی آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور می‌باشد که این نتایج با تحقیقات Parakandeh و همکاران (۲۰۲۴) و Zarin و همکاران (۲۰۲۲) و Cheng و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. در رابطه با تغییرات دما، تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها مقدار دمای حداقل و حداکثر نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است. در خصوص متغیر بارش نتایج حاکی از وجود یک روند سینوسی در خصوص تغییرات بارش در سناریوها در دوره‌های زمانی آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه می‌باشد. به طوری که برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان بیشتر از سایر ماه‌ها بوده که این موضوع با نتایج پژوهش Zarin و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. ضمناً کاهش بارش در سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6 و افزایش بارش در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 معنی‌دار و قابل توجه نمی‌باشد. از طرفی عدم تغییرات

دمای بیشینه و کمینه ایستگاه سینوپتیک نایین استان اصفهان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات روزانه بارش و

References

- Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M.J., & Farokhnia, A. (2022). Investigating the trend of temperature and precipitation changes in Iran's watersheds in the next 20 years based on output CMIP6 models. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204> (In Persian)
- Bessah, E., Raji, A., Taiwo, O., Agodzo, S., & Ololade, O. (2020). The impact of varying spatial resolution of climate models on future rainfall simulations in the Pra River Basin (Ghana). *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1263-1283. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.258>
- Bjornaes, C. (2013). A guide to Representative Concentration Pathways. Center for International Climate and Environmental Research.
- Cheng, Q., Zhong, F., & Wang, P. (2021). Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Journal of Atmospheric Research*, 247, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105256>
- Eyring, V., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., & Meehl, G.A. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Journal of Geoscientific Model Development*, 8, 10539-10583. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- IPCC, Climate Change. (2021). Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information. Lee, J. Y., Marotzke, G., Bala, L., Cao, S., Corti, J.P., Dunne, F., Engelbrecht, E., Fischer, J.C., Fyfe, C., Jones, A., Maycock, J., Mutemi, O., Ndiaye, S., Panickal, & Zhou., T. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319, 357-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.035>
- Koukidis, E. N., & Berg, A. A. (2009). Sensitivity of the Statistical DownScaling Model to reanalysis products. *Journal of Atmosphere-Ocean*, 47(1), 1-18. <https://doi.org/10.3137/AO924.2009>
- Kult, J., Choi, W., & Choi, J. (2014). Sensitivity of the Snowmelt Runoff Model to snow covered area and temperature inputs. *Journal of Applied Geography*, 55, 30-38. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.011>
- Marzi, S., Mysiak, J., Essenfelder, A., Amadio, A., Giove, S., & Fekete, A. (2019). Constructing a comprehensive disaster resilience index: The case of Italy. *Journal of Plos one*, 14(9), 221-585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221585>
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaei Frizhendi, Q. (2018). Evaluation of efficiency of CMIP5 series model in simulation and prediction of climatic parameters of rainfall, temperature and wind speed (Case study: Yazd province). *Journal of Natural Geography Research*, 50(3), 609-593. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.248177.1007156>
- Mishra, V., Cherakauer, K., & Shukla, SH. (2010). Assessment of Drought due to Historic Climate Variability and Projected Future Climate Change in the Midwestern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 11, 46-68. <http://doi.org/10.1175/2009JHM1156.1>
- Nurzaman, A., Shaw, R., & Roychansyah, M.S. (2020). Measuring community resilience against coastal hazards: Case study in Baron Beach, Gunungkidul Regency. *Journal of Progress in Disaster Science*, 5, 100067.

- <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100067>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Journal of Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- O'Neill, B. C., Carter, T.R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B., Riahi, K., Sillmann, J., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestedt, J., Green, C., Hasegawa, T., Leisinger, J., Monteith, S., & Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Journal of Nature Climate change*, 10, 1074-1084.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952>
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J.A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N.K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C.B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneros, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K. J., Marotzke, J., Mastrandrea, M. D., Meyer, L., Minx, J., Mulugetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G.K., Pörtner, H.O., Power, S.B., Preston, B., Ravindranath, N.H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T. F., Tschakert, P., van Vuuren, D., & van Ypserle, J. P. (2014). AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Journal of Geneva*.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23020>
- Parakandeh, F., Alavinia, H., & Omidvar, E. (2024). Evaluation of future temperature and precipitation changes by downscaling general circulation models (A case study of selected synoptic stations on the southern coasts of Iran). *Journal of Management of Natural Ecosystems*, 3(1), 63-75.
<https://doi.org/10.220/emj.2024.2025835.1056> (In Persian)
- Pimonsree, S., Kamworapan, S., Gheewala, S.H., Thongbhakdi, A., & Prueksakorn, K. (2023). Evaluation of CMIP6 GCMs performance to simulate precipitation over Southeast Asia. *Journal of Atmospheric Research*, 282, 33.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4204582>
- Rakhimova, M., Liu, T., Bissenbayeva, S., Mukanov, Y., Gafforov, K. S., Bekpergenova, Z., & Gulakhmadov, A. (2020). Assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff using climate elasticity method and general circulation model (GCM) in the Buqtyrma river Basin. *Journal of Sustainability*, 12(12), 4968.
<https://doi.org/10.3390/su12124968>
- Roshani, A., & Hmidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603920>
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F.N. (2007). Global food security under climate change. *Journal of Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 19703-19708.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>
- Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K. E. (2017). CMIP5 Scientific Gaps and Recommendations for CMIP6. *Journal of American Meteorological Society*, 98(1), 95-105.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00013.1>
- Su-Yuan, L., Li-Juan, M., Zhi-Hong, J., GuoJie, W., Raj, G. K., Jing, ZH., Hui, ZH., Ke, F., Yu, H., & Chun, L. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099. *Journal of Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.003>
- Tang, Q., Donfg, W., Liu, Z., Liao, H., & Li, X. (2015). New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk. *Journal of*

- Climatic Change*, 130, 505–518.
<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1372-8>
- Van der Mensbrugge, D. (2015). Shared Socio-Economic Pathways and Global Income Distribution. 18th Annual Conference on Global Economic Analysis. Melbourne, Australia.
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. London, UK. *American Journal of climate change*, 6(3).
- Woznicki, A., Adhikari, U., & Nejadhashemi, A. (2016). Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. *Journal of Food and Energy Security*, 4(2), 110-132. <https://doi.org/10.1002/fes3.61>
- Zamani, Y., Monfared, S. A. H., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1613-1623.
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2672-5>
- Zarin, A., Dadashi-Roudbari, A. A. & Hassani, S. (2022). Near term (2021-2028) climate prediction of monthly temperature in Iran using Decadal Climate Prediction Project (DCPP). *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(1), 189-211.
<https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2022.327886.1007340> (In Persian)

Predicting Groundwater Level Changes Using Deep Learning and Influencing Factors Through Remote Sensing

Maryam Heydarzadeh^{1*}, Hadi Siasar²

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Minab higher Education center, University of Hormozgan, Bandar-Abass, Hormozgan, Iran
2. Department of Agriculture, Payame Noor University (PNU), Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

* Corresponding author: m.heydarzadeh@hormozgan.ac.ir

(Received: 22 July 2024

Revised: 6 November 2024

Accepted: 14 December 2024)

Extended Abstract

Introduction: Groundwater level (GWL) is of critical importance, especially in arid and semi-arid countries. In many areas, excessive exploitation of GWL has led to irreversible damage to groundwater resources. Predicting GWL is a key challenge in hydrogeological research, effective aquifer management, and assessing groundwater volumes. The aim of this research is to investigate and compare the efficiency of Deep Learning (DL), Decision Tree (DT), and Gradient Boosted Tree (GBoost) models in predicting the GWL of the Rudan aquifer.

Materials and methods: Monthly GWL data of the Rudan aquifer, along with precipitation, temperature, and evaporation data from the region's meteorological stations (2000-2020), were collected. The second part of the study involved satellite data accessed through the Google Earth Engine platform, where GWL data and key parameters- including the Palmer Drought Severity Index (PDSI), Standardized Precipitation Index (SPI), Potential Evapotranspiration (PET), precipitation (Pr), and vegetation indices such as NDVI, EVI, SAVI, NDWI, and GNDVI- were extracted and processed. Data normalization was performed to improve the performance of machine learning models, and the data were split into training (80%) and testing (20%) sets to evaluate model performance and prevent overfitting. To investigate the behavior and model the GWL of the Rudan aquifer, 10 parameters were used in 10 scenarios across three models: DL, DT, and GBoost.

Results and Discussion: In the DL model, increasing the number of parameters from the first to the third scenario decreased the model's accuracy. However, scenarios 5 to 9, which showed the highest correlation (0.86) and the lowest error (0.85) and percentage error (41%), were the most suitable for modeling GWL changes in the Rudan aquifer using cumulative precipitation, NDWI, PDSI, SAVI, NDVI, EVI, Pr, PET, and SPI variables. The DT model showed improved accuracy with an increasing number of parameters up to a certain point (from the first to the seventh scenario). The highest accuracy was achieved using a combination of cumulative precipitation, NDWI, PDSI, SAVI, NDVI, and EVI, with RMSE and MSE of 0.282 and 0.08, respectively, and a percentage error and correlation of 13.07% and 0.987, respectively. The GBoost model demonstrated relatively stable accuracy across all scenarios. Given the low error values and high correlation, the overall statistical criteria indicated that adding more parameters had a reduced sensitivity on the model's performance and did not significantly change its accuracy. Both the DL and DT models are more sensitive to input parameters. Additionally, this models exhibited similar responses to the input parameters in each scenario. Considering the four-month delay of precipitation on GWL, the DL model included precipitation, evapotranspiration, and drought indices in its selected scenarios. Therefore, it can be concluded that this model, considering a broader set of environmental parameters and examining their impact on modeling GWL changes, provides better efficiency, performance, and comprehensiveness for the Rudan aquifer.

Conclusion: The output results of the models showed that the DT and DL models, with high correlation values and lower error values, demonstrate highly accurate performance in predicting GWL. The scatter plots of predictions and actual values indicate a very close match between these two datasets, highlighting the high accuracy of both the DT and DL models. The accepted scenarios in both models include vegetation indices, indicating the significant impact of this parameter on groundwater resources, particularly in arid and semi-arid regions, where vegetation is a primary source of moisture. On the other hand, the DL model included meteorological drought indices in its selected scenarios, demonstrating the influence of these key factors on GWL changes in the region. Given the complexity of the DL model in selecting important parameters affecting GWL fluctuations, this model can be considered an efficient and suitable tool for investigating the factors influencing GWL changes in the Rudan aquifer. The use of these input parameters in the selected scenarios of both models can improve the accuracy and efficiency of groundwater resource management. Ground observational data for GWL further confirm the high importance of these parameters.

Keywords: Aquifer water level, Machine Learning, Deep Learning, Remote Sensing, Drought Indices

Citation: Heydarzadeh, M., & Siasar, H. (2025). Predicting Groundwater Level Changes Using Deep Learning and Influencing Factors Through Remote Sensing. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 74-93. doi=10.22034/iwm.2024.2036252.1164

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>).



پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌زیر زمینی به کمک یادگیری عمیق و عوامل تأثیرگذار بر آن با

استفاده از سنجش‌ازدور

مریم حیدرزاده^{۱*}، هادی سیاسر^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، مرکز آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، هرمزگان، ایران

۲. گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، زابل، سیستان و بلوچستان، ایران

نویسنده مسئول: m.heydarzadeh@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

چکیده مبسوط

مقدمه: سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک از اهمیت حیاتی برخوردار است. در بسیاری از مناطق، بهره‌برداری بیش از حد از سطح آب‌زیرزمینی منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیری به منابع آب‌زیرزمینی شده است. پیش‌بینی سطح آب‌زیرزمینی یک چالش کلیدی در تحقیقات هیدروژئولوژیکی، مدیریت مؤثر آبخوان‌ها و ارزیابی حجم آب‌زیرزمینی است. هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه کارایی مدل‌های یادگیری عمیق، درخت تصمیم و Gradient Boosted Tree در پیش‌بینی پارامترهای تأثیرگذار بر تراز آب‌زیرزمینی آبخوان رودان است.

مواد و روش‌ها: داده‌های تراز آب زیرزمینی ماهانه آبخوان رودان و اطلاعات بارش و دما و تبخیر از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ گردآوری شد. بخش دوم، داده‌های ماهواره‌ای در پلتفرم گوگل ارث انجین داده‌های تراز آب‌زیرزمینی آبخوان و پارامترهای مهم شامل شاخص خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، بارش (Pr)، و شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI، SAVI، EVI، NDWI و GNDVI از داده‌های ماهواره‌ای استخراج و پردازش شدند. نرمال‌سازی داده‌ها به منظور بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، و تقسیم‌بندی داده‌ها به دو مجموعه آموزشی (۸۰ درصد) و آزمایشی (۲۰ درصد) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و جلوگیری از بیش‌برازش انجام شد. به‌منظور بررسی رفتار و مدل‌سازی تراز آب‌زیرزمینی رودان از ۱۰ پارامتر در ۱۰ سناریو در سه مدل یادگیری عمیق، درخت تصمیم و GBoost استفاده شد.

نتایج و بحث: در مدل یادگیری عمیق با افزایش تعداد پارامترها در سناریو اول تا سوم میزان دقت مدل کاهش ولی سناریوهای شماره ۵ تا ۹ با بالاترین همبستگی (۰/۸۶) و کمترین میزان خطا (۰/۸۵) و درصد خطا (۴۱ درصد) مناسب‌ترین سناریو برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی رودان با متغیرهای بارش تجمعی، شاخص‌های NDWI، PDSI، SAVI، NDVI، EVI، Pr، PET، SPI مشخص نمود. مدل درخت تصمیم از سناریوی اول تا هفتم با افزایش تعداد پارامترها تا حد معینی بهبود دقت را نشان داد. بیشترین دقت مدل با استفاده از ترکیب ورودی‌های بارش تجمعی، NDWI، PDSI، SAVI، EVI، NDVI، RMSE و MSE به ترتیب برابر با ۰/۲۸۲ و ۰/۰۸، درصد خطا و همبستگی به ترتیب ۱۳/۰۷ و ۰/۹۸۷ بود. مدل GBoost در تمامی سناریوهای دقت نسبتاً ثابتی دارد. با توجه به مقادیر کم خطا و میزان همبستگی بالا، برآیند معیارهای آماری در این مدل نشان داد که اضافه کردن پارامترهای بیشتر، حساسیت کمتری در مدل دارد و تغییرات زیادی در دقت مدل ایجاد نمی‌شود. مدل یادگیری عمیق و درخت تصمیم‌گیری حساسیت بیشتری به پارامترهای ورودی دارند. هم‌چنین رفتار مدل یادگیری عمیق و درخت تصمیم‌گیری پاسخ نسبتاً مشابهی در پارامترهای ورودی هر سناریو دارد. با توجه به تأخیر زمانی ۴ ماهه بارش بر سطح آب‌زیرزمینی، مدل یادگیری عمیق پارامترهای بارش، تبخیر و تعرق و شاخص خشکسالی را جز سناریوهای منتخب خود قرار داد. از این رو می‌توان گفت که این مدل با توجه به برداشتن پارامترهای محیطی بیشتر و بررسی میزان اثرگذاری آنها در مدل‌سازی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی، کارایی، عملکرد و جامعیت بهتری برای آبخوان رودان دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج خروجی مدل‌ها نشان داد مدل درخت تصمیم و یادگیری عمیق با مقادیر همبستگی بالا و مقدار خطای کمتر عملکرد بسیار دقیقی در پیش‌بینی تراز آب‌زیرزمینی دارند. نمودار پراکندگی پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی نشان‌دهنده تطابق بسیار نزدیک بین این دو مجموعه داده است که بیانگر دقت بالای مدل درخت تصمیم و یادگیری عمیق است. سناریوهای مورد قبول در هر دو مدل شامل شاخص‌های گیاهی است که بیانگر تأثیر قابل توجه این پارامتر بر منابع آب‌زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که اصلی‌ترین منبع رطوبتی در این مناطق است. از طرف دیگر مدل یادگیری عمیق شاخص‌های خشکسالی هواشناسی را در مجموعه سناریوهای منتخب خود دارد که بیانگر تأثیر این عوامل کلیدی در تغییرات سطح آب‌زیرزمینی منطقه است. از طرفی با توجه به پیچیدگی مدل یادگیری عمیق در انتخاب پارامترهای مهم اثرگذار بر نوسانات سطح آب‌زیرزمینی می‌توان این مدل را ابزاری کارآمد و مناسب برای بررسی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب‌زیرزمینی آبخوان رودان برشمرد. استفاده از این پارامترهای ورودی در سناریوهای منتخب هر دو مدل پیشنهادی پیش‌بینی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی مدل‌ها در مدیریت منابع آب‌زیرزمینی کمک نماید. داده‌های مشاهداتی زمینی برای تراز آب‌زیرزمینی نیز اهمیت بالای این پارامترها را تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی: سطح آب آبخوان، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، سنجش‌ازدور، شاخص‌های خشکسالی

استناد: حیدرزاده، م؛ و سیاسر، ه (۱۴۰۴). پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیر زمینی به کمک یادگیری عمیق و عوامل تأثیرگذار بر آن با استفاده از سنجش‌ازدور. مدیریت جامع حوزه آبخیز، ۵(۲)، ۷۴-۹۳.

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 قابل دسترس است.

مقدمه

مدل‌های خطی برای یک دوره طولانی، و غیرخطی که شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه‌های موجی، سامانه‌های استنتاج تطبیقی نوروفازی، رگرسیون بردار پشتیبان، و روش همبستگی تصادفی شبکه تطبیقی برای شبیه‌سازی و تغییرات سطح آب‌زیرزمینی استفاده می‌شود. مدل‌های ریاضی از معادلات دیفرانسیل برای شبیه‌سازی جریان سطح آب‌زیرزمینی استفاده می‌شود (Rajaei et al., 2019). از آنجایی که رفتار دینامیکی یک سیستم هیدرولوژیکی با گذشت زمان تغییر می‌کند، این مدل‌ها توانایی کافی برای پیش‌بینی ویژگی‌های منابع آب را ندارند و مدل‌های مناسبی نیستند (Rathinasamy et al., 2014). محققان رویکردهای نوآورانه‌ای را برای پیش‌بینی سطح آب در سفره‌های زیرزمینی با توجه به مسائل متعدد با مدل‌های مصنوعی برای مدل‌سازی سفره‌های زیرزمینی توسعه داده‌اند (Tao et al., 2022b). مدل‌های هوش مصنوعی^۳ (AI) اخیراً در تعدادی از زمینه‌ها از جمله تحقیقات هیدروژئولوژیکی و آب‌های زیرزمینی استفاده شده است (Nadiri et al., 2014). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند از داده‌های پراکنده و مختصر برای تقلید سری‌های زمانی نامنظم و غیرخطی با دقت بالا استفاده کنند. به دلیل دقت و مفید بودن، این مدل‌ها در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی GWL به کار گرفته شده‌اند (Franses & Van Dijk, 2000). در همین راستا، Gong و همکاران (۲۰۱۶) اعتبار سه مدل هوشمند سری زمانی غیرخطی، یعنی شبکه عصب مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) را برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی با در نظر گرفتن تعامل آب‌سطحی و آب‌زیرزمینی بررسی نمودند. این مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های ۱۰ ساله از پارامترهای هیدرولوژیکی دو چاه در نزدیکی دریاچه Okeechobee در فلوریدا،

منبع ناکافی آب سطحی به طور معمول با آب‌های زیرزمینی پشتیبانی می‌گردد. با این حال، آب‌زیرزمینی منبعی است که در طی سالیان متمادی انباشته می‌شود. علاوه بر این، برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی منجر به فرونشست زمین می‌گردد (Tran & Wang, 2020; Lo et al., 2020). سطح آب‌زیرزمینی^۱ (GWL) در کشورهای خشک و نیمه‌خشک از اهمیت حیاتی برخوردار است (Alfarrah & Walraevens, 2018). در بسیاری از مناطق، بهره‌برداری بیش از منابع آب‌زیرزمینی منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیری به آنها شده است (Priyan, 2021). پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی یک چالش کلیدی در تحقیقات هیدروژئولوژیکی، مدیریت مؤثر آبخوان و ارزیابی حجم آب‌زیرزمینی است (Barzegar et al., 2017; Sun et al., 2022). پیش‌بینی GWL برای مدیریت پایدار منابع آب بسیار مهم است، زیرا پیش‌بینی‌های دقیق به درک در دسترس بودن و توزیع آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند که برای اهدافی مانند کشاورزی، تأمین آب آشامیدنی و نگهداری اکوسیستم ضروری است (Malakar et al., 2021; Singh et al., 2021; Khan et al., 2023). تکنیک‌های یادگیری ماشین^۲ (ML) پتانسیل تجزیه و تحلیل مجموعه‌های داده بزرگ و پیچیده، شناسایی الگوها و پیش‌بینی‌هایی را ارائه می‌دهند که به تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب کمک می‌کند (Singh et al., 2021; Pham et al., 2022; Ghobadi & Kang, 2023; Singh et al., 2024). با استفاده از ML برای پیش‌بینی GWL، می‌توان توانایی خود را برای نظارت و مدیریت مؤثر منابع آب افزایش داد و از استفاده پایدار آنها در طول زمان اطمینان حاصل نمود (Tao et al., 2022a; Pham et al., 2022). مدل‌های ریاضی مبتنی بر فیزیک، تکنیک‌های مدل‌سازی سری زمانی شامل

3- Artificial intelligence

1- Ground Water Level
2- Machine Learning

از این‌رو فاقد قابلیت‌های تعمیم باشد (Radhakrishnan & Pillai, 2020). استفاده از الگوریتم درون مدل مانند KNN⁷ و CART⁸ به‌عنوان یک ابزار چندمنظوره و پایه اکثر قدرتمندترین روش‌ها (Kadra et al., 2021) توسط بسیاری از محققین (Wu et al., 2024; Jena & Dehuri, 2020) به‌کار گرفته شده است. Khan و همکاران (۲۰۲۳) تعداد ۱۰۹ مقاله را برای پیش‌بینی سطح تراز آب‌زیرزمینی با استفاده از مدل‌های نوین و هوش مصنوعی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های هیبریدی که بر پایه هوش مصنوعی بوده عملکرد بالایی دارند. Anitha و Manna (۲۰۲۳) با استفاده از یادگیری عمیق توانستند تغییرات عمق آب‌زیرزمینی را برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کنند. تکنیک‌های یادگیری عمیق چشم‌انداز وسیعی را در زمینه پیش‌بینی با اصلاح پارامترهای پیش‌بینی کننده که توانایی ارزیابی حجم عظیمی از داده‌ها را دارند، نشان داده‌اند. Huang و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد ML را با تکنیک‌های DL مقایسه کرد و دریافت که حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) پیش‌بینی‌های بهتری برای تغذیه آب‌زیرزمینی ایجاد می‌کند. Kochhar و همکاران (۲۰۲۲) مجموعه داده‌های موجود را به مجموعه داده‌های پیش از موسمی، پس از موسمی و ترکیبی از داده‌های سالانه برای اندازه‌گیری سطح آب‌زیرزمینی با یک مدل میانگین متحرک یکپارچه رگرسیون فصلی (SARIMA)^۹ با LSTM تقسیم کرد. Sun و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل داده‌محور برای پیش‌بینی سطح آب‌زیرزمینی با اهمیت عملی با استفاده از ARIMA و LSTM پیشنهاد کرد. اگرچه یادگیری عمیق توانایی پردازش داده‌های عظیم را دارد، پیش‌بینی آن به

ایالات متحده استفاده شد. نتایج به‌دست آمده ضرورت و تأثیر در نظر گرفتن اثر متقابل آب‌سطحی و آب-زیرزمینی در پیش‌بینی سطح آب‌زیرزمینی را اثبات نمود. همچنین، نتایج حاصل از مدل‌های ANFIS و SVM نسبت به مدل ANN دقیق‌تر بود. اخیراً، همراه با استفاده از مدل‌های جدید هوش مصنوعی، از جمله یادگیری عمیق (DL) (Afzaal et al., 2020)، یادگیری ماشین افراطی^۴ (ELM) (Alizamir et al., 2018) و حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت^۵ (LSTM) (Bowes et al., 2019)، استراتژی‌های جدید مانند مدل‌های هوش مصنوعی ترکیبی و ترکیبی (Pham et al., 2019)، یادگیری گروهی (Nguyen et al., 2020)، و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی -GIS (سیستم اطلاعات جغرافیایی) (Kim, 2020)، برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی پیاده‌سازی شده‌اند. با توجه به نتایج روش‌های مختلف هوش مصنوعی کلاسیک، مانند ANN، سیستم‌های استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS، SVM، GP) و روش‌های هوش مصنوعی ترکیبی، این مطالعات به این نتیجه رسیدند که روش‌های هوش مصنوعی می‌تواند با موفقیت برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی واقع در مناطقی با زمین‌شناسی و اقلیم متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. مدل درخت تصمیم‌گیری^۶ (DT) تصمیمات را با یک فرایند متوالی تقلید می‌کند که در آن قضاوت‌های منطقی ویژگی‌های متغیر مورد بررسی انجام می‌شود. از این نظر، مدل به‌تدریج می‌تواند داده‌ها را به یک گره محدود کند که از آن طبقه‌بندی واضح انجام شود. این مدل شهودی و قابل تفسیر است و امکان تجسم مسیرهای طی شده در تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. با این حال، ممکن است در داده‌های آموزشی بیش از حد برازش داده شود و

8- Classification and Regression Trees

9- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average

4- Extreme Learning Machine

5- Long short-term memory

6- DecisionTree

7- k-nearest neighbors

یادگیری ماشین مبتنی بر نمایش داده‌های یادگیری به عنوان یادگیری عمیق^{۱۵} (DL) شناخته می‌شوند. مؤلفه اساسی شبکه‌های عصبی یادگیری عمیق، پردازش اطلاعات توزیع شده و گره‌های ارتباطی است که در سیستم‌های بیولوژیکی دیده می‌شود. شبکه‌های عصبی کانولوشن، پرسپترون‌های چندلایه، ماشین‌های محدود بولتزمن^{۱۶} (RBM)، رمزگذار خودکار، RNN^{۱۷} برخی از اجزای مختلف یادگیری عمیق هستند (Sahoo et al., 2019; Zhao et al., 2019; Miotto et al., 2018). در مقابل، مدل‌های درخت تصمیم و GBoost نیز به دلیل قابلیت تفسیرپذیری بالا و دقت مناسب در پیش‌بینی‌های خود، به‌عنوان گزینه‌های مناسبی در مدیریت منابع آب مطرح شده‌اند (Chen & Guestrin, 2016). حوضه رودان یکی از زیرحوزه‌های مهم آبخیز میناب در استان هرمزگان است. سفره آب‌زیرزمینی این منطقه به دلیل بارش نسبتاً مناسب در مقایسه با سایر آبخوان‌های منطقه، از شرایط بهتری در تأمین منابع آب برای فعالیت‌های کشاورزی و باغی برخوردار است. هدف از تحقیق پیشرو، بررسی و مقایسه کارایی مدل‌های یادگیری عمیق، درخت تصمیم و GBoost در پیش‌بینی تراز آب‌زیرزمینی و همچنین آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر آبخوان رودان است. آگاهی از وضعیت آبخوان و پیش‌بینی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب-زیرزمینی به مدیران منابع آب در اتخاذ تصمیمات بهتر و مؤثرتر کمک می‌نماید که راهکارهای مناسبی برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضای آب ارائه دهند.

پارامترهای تأثیرگذار مختلفی بستگی دارد که ممکن است بر دقت پیش‌بینی استفاده از یک طبقه‌بندی خاص تأثیر بگذارد. علاوه بر این، برازش بیش از حد یکی از مسائل مهمی است که باید با فرایند انتخاب الگوریتم بهتر با فرایند تنظیم پارامترهای کارآمد به آن توجه کرد بنابراین؛ ترکیب بیش از یک طبقه‌بندی کننده ممکن است فرایند پیش‌بینی را بهبود بخشد و راه را برای مکانیسم یادگیری گروه هموار کند (Manna & Anitha, 2023). مدل درخت تقویت شده با گرادیان^{۱۰} (GBoost) با استفاده از الگوریتم XGBoost طراحی شد که یک تکنیک تقویتی است و با ترکیب چندین درخت تصمیم ضعیف و بهبود تدریجی آنها، دقت بالایی را در پیش‌بینی‌ها فراهم می‌کند. این مدل به دلیل کارایی و دقت بالای خود در پیش‌بینی‌های پیچیده شناخته شده است (Chen & Guestrin, 2016). مدل‌های یادگیری ماشینی مانند رگرسیون تقویت گرادیان^{۱۱} (GBR) و شبکه‌های عصبی کانولوشنال^{۱۲} (CNN) عملکرد برتر را در ثبت روابط پیچیده بین متغیرهای محیطی و سطوح آب زیرزمینی نشان داده‌اند. (Abdi et al., 2024). همچنین، تحقیقات نشان دادند. داده‌های ماهواره‌ای GRACE و MODIS اطلاعات حیاتی را در مورد دمای سطح زمین، رطوبت خاک و بارش ارائه می‌دهند که برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ضروری هستند. برای مثال، مطالعات نشان می‌دهد که سطوح پایین‌تر آب‌های زیرزمینی با کاهش مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^{۱۳} (NDVI) مرتبط است، که نشان‌دهنده تنش و تخریب پوشش گیاهی است (Yonghong, 2013). شاخص افزایش پوشش گیاهی^{۱۴} (EVI) همچنین می‌تواند منعکس کننده تغییرات در پوشش گیاهی به دلیل نوسانات آب زیرزمینی باشد (Haas et al., 2021). زیرمجموعه‌ای از تکنیک‌های

14- Enhanced Vegetation Index
15- Deep Learning
16- Boltzmann machines
17- Recurrent Neural Network

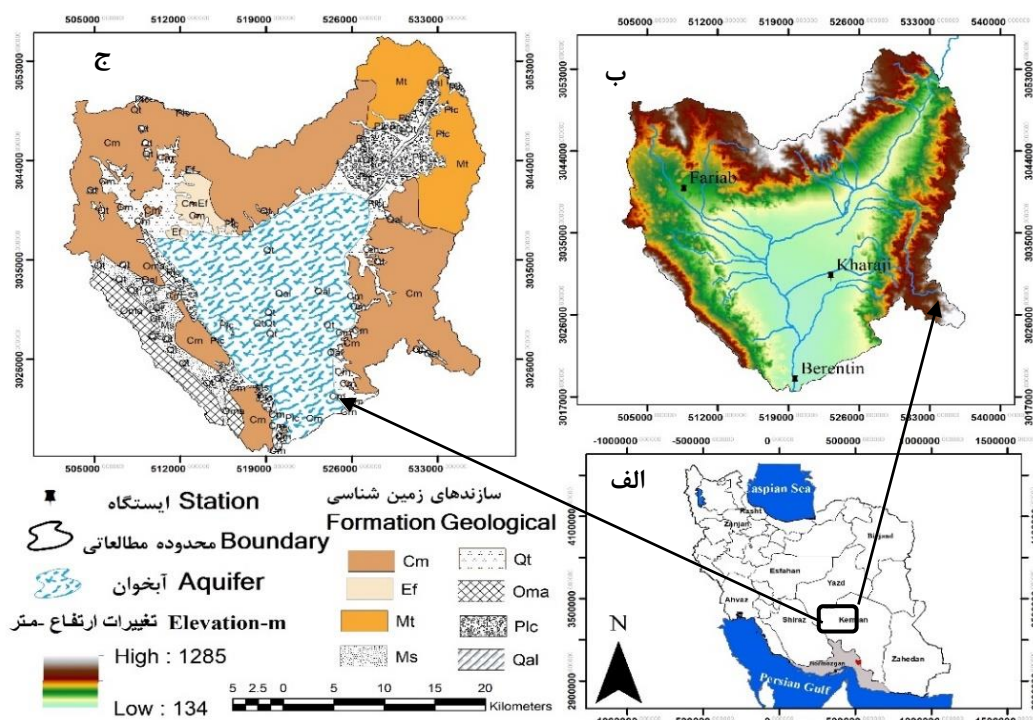
10- Gradient Boosted Tree
11- Gradient Boosting Regression
12- Convolutional Neural Networks
13- Normalized Difference Vegetation Index

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه رودان به‌عنوان یکی از مراکز پررونق باغی و صیفی‌جات دارای مساحتی معادل ۷۹۹ کیلومترمربع یکی از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز میناب در بخش شرقی استان هرمزگان واقع شده است. مختصات حوضه $30''$ تا $16' 27''$ شمالی و $00'' 20' 57''$ تا $30'' 22' 57''$ شرقی بوده و حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۲۸۵ و ۱۳۴ متر است. متوسط دمای سالانه حوضه معادل $25/7$ درجه سانتی‌گراد است. میانگین داده‌های سالانه بارندگی ۲۴۲ میلی‌متر است که بیش از ۷۷ درصد بارش طی فصل‌های سرد پاییز و زمستان رخ می‌دهد و الگوی بارش در منطقه یکنواخت نیست. Paroon و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند حوضه رودان طبق طبقه‌بندی دومارتن، تورنت وایت و آمبرژه به‌ترتیب دارای اقلیم خشک، نیمه‌خشک و بیابانی گرم میانه است. از جمله دلایل انتخاب حوضه آبخیز رودان، کوهستانی بودن بخشی از منطقه و دریافت میزان بارش

نسبتاً مناسب در مقایسه با سایر زیرحوضه‌های میناب است. سازندهای غالب منطقه شامل کنگلومرای بختیاری، تراس‌های آبرفتی، آبرفت‌های عهد حاضر و آمیزه‌های رنگین است (شکل ۱، ب). وجود رسوبات با سن کواترنری در میان مجموعه‌های بازیک (چرت‌های رادیولاریت‌دار، آهک‌ها) نشان می‌دهد، که در مجاورت اولترامافیک‌های شمال رودان قرار گرفته‌اند (Ghadami & Poosti, 2020). براساس طبقه‌بندی کاربری اراضی انجام‌شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان هرمزگان (۲۰۱۹) منطقه مورد مطالعه در ۶ کلاس کاربری شامل زراعت، باغات، مسیل، مراتع متوسط و فقیر و مناطق کوهستانی تقسیم‌بندی می‌شود. این حوزه دارای ۳ شهر، ۴ بخش و ۱۰ دهستان است. به دلیل وجود منابع آبی سطحی و زیرزمینی مناسب در این منطقه، کشاورزی و باغات رونق خوبی دارد. حوزه آبخیز رودان در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان و ایران (الف)، تغییرات ارتفاعی (ب) و سازندهای زمین‌شناسی (ج)

Figure 1- Location of the study area in Hormozgan Province and Iran (a), elevation changes (b), and geological formations (c)

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل داده‌های تراز آب‌زیرزمینی و پارامترهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه بود. داده‌های تراز آب‌زیرزمینی ماهانه از چاه‌های مشاهده‌ای در محدوده آبخوان رودان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ از شرکت آب منطقه‌ای استان هرمزگان جمع‌آوری شده‌اند. همچنین داده‌های بارش، دما، تبخیر طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ از ایستگاه‌های هواشناسی رودان و ایستگاه‌های تبخیرسنجی خراجی، فاریاب و برنطین منطقه گردآوری شده‌اند. بخش دوم، داده‌های ماهواره‌ای که با استفاده از اسکرپت‌نویسی جاوا در پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) داده‌های تراز آب‌زیرزمینی آبخوان رودان طی بازه زمانی مشابه از تصاویر ماهواره ماهواره‌ای استخراج شد. همچنین پارامترهای مهم شامل شاخص خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، بارش (Pr) و همچنین شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI، EVI، SAVI، NDWI و GNDVI از داده‌های ماهواره‌ای MODIS/006/MOD16A2 ماهواره Terra ۱۶ روزه و MODIS/006/MOD13A1 (Terra ۱۶ روزه ماهواره Terra) با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر در بستر پلتفرم گوگل ارث انجین پردازش و به‌صورت ماهانه استخراج شدند. پردازش تصاویر شامل تعیین بازه زمانی و مکانی، اعمال ضرایب مربوط به هر فاکتور طبق توضیحات هر تصویر و نهایتاً تعیین مقیاس زمانی برای استخراج زمانی پارامترها است. داده‌های زمینی تراز آب‌زیرزمینی نیز برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد.

اجرای مدل‌ها

داده‌های جمع‌آوری شده پس از بررسی و اطمینان از صحت و کامل بودن، برای تحلیل و مدل‌سازی پیش‌پردازش شده‌اند. این مراحل شامل پاک‌سازی

داده‌ها برای حذف نویز و اصلاح مقادیر گم‌شده با استفاده از روش‌های میانگین‌گیری و درون‌یابی، نرمال‌سازی داده‌ها به‌منظور بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، و تقسیم‌بندی داده‌ها به دو مجموعه آموزشی (۸۰ درصد) و آزمایشی (۲۰ درصد) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و جلوگیری از بیش‌برازش است (Salamat *et al.*, 2023). همچنین، ویژگی‌های جدیدی از داده‌های اصلی استخراج شده‌اند تا اطلاعات بیشتری در اختیار مدل‌ها قرار گیرد. این ویژگی‌ها شامل شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI، SAVI، EVI، NDWI و شاخص‌های خشکسالی مانند PDSI و SPI بودند که از داده‌های ماهواره‌ای پردازش‌شده از طریق پلتفرم Google Earth Engine به دست آمدند. این شاخص‌ها به‌منظور بررسی جامع‌تر تأثیر شرایط محیطی و خشکسالی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی به مدل‌ها اضافه شدند (Rahmati & Melesse, 2016). برای بررسی تأثیر همبستگی بین متغیرهای ورودی، تحلیل همبستگی میان پارامترهای جمع‌آوری‌شده انجام شد. این تحلیل نشان داد که برخی شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI با شاخص‌های SAVI و EVI دارای همبستگی بسیار بالایی هستند (به‌ترتیب ۱۰۰ و ۹۷ درصد). به‌منظور کاهش هم‌خطی چندگانه^{۱۸} و جلوگیری از ورود اطلاعات تکراری به مدل، تنها شاخص NDVI به‌عنوان نماینده شاخص‌های پوشش گیاهی در مدل نگه داشته شد. این تغییر باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی و بهبود پایداری مدل‌ها شد، درحالی‌که اطلاعات کلیدی پوشش گیاهی همچنان حفظ شد. در نهایت، داده‌های پیش‌پردازش شده برای آموزش و آزمایش مدل‌های شبکه‌های عصبی عمیق، درخت تصمیم و XGBoost آماده شده‌اند. در جدول ۱ پارامترهای مورداستفاده در هر سناریو نشان داده شده است. برای بررسی رفتار و مدل‌سازی تراز آب‌زیرزمینی رودان از ۱۰ پارامتر در ۱۰

سناریو استفاده شده است. اولویت ورود متغیرهای تحلیل همبستگی و تأثیرگذاری آن‌ها در دقت مدل هم‌دسته مانند شاخص‌های پوشش گیاهی بر اساس تعیین شد.

جدول ۱- پارامترهای ورودی هر سناریو

Table 1- Input parameters of each scenario

تعداد متغیر	سناریو
۱	Cumulative Precipitation
۲	Cumulative Precipitation- NDWI
۳	Cumulative Precipitation- NDWI-PDSI
۴	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI
۵	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI
۶	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI- EVI
۷	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI- EVI- Pr
۸	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI- EVI- Pr- PET
۹	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI- EVI- Pr- PET- SPI
۱۰	Cumulative Precipitation- NDWI- PDSI -SAVI- NDVI- EVI- Pr- PET- SPI- GNDVI

نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده همبستگی بالای مدل است. میانگین مربعات خطا MSE (رابطه ۴)، به ما کمک می‌کند که پیش‌بینی‌های ما چقدر به مقادیر واقعی نزدیک است. هرچه MSE کمتر باشد، پیش‌بینی‌های مدل بهتر با مقادیر واقعی همسو هستند. استفاده از شاخص MSE این اطمینان را فراهم می‌کند که مدل حساسیت لازم در ارزیابی مقادیر پرت را داراست. معیار MAPE میزان خطا را بر حسب درصد ارائه می‌دهد. هرچه MAPE کوچکتر باشد، پیش‌بینی بهتر بوده است. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل، براساس معیارهای خطای ذکرشده، از روش رتبه‌بندی برای داده‌های آزمایشی استفاده می‌گردد. شیوه رتبه‌بندی این مدل‌ها بدین صورت است که در هر روش، مدلی که کمترین میزان خطای RMSE را دارد، پایین‌ترین رتبه، یعنی رتبه ۱؛ و به مدل‌ها یا ترکیبات ورودی دیگر در هر یک از دسته‌های ورودی برحسب میزان معیار خطاهای مذکور، رتبه‌های ۲ الی آخر تعلق می‌گیرد. معیارهای ضریب تبیین مدل یا ترکیبی که بیشترین

در این تحقیق به‌منظور مقایسه مدل‌های مختلف از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 (رابطه ۱) برای تعیین همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده و میانگین درصد خطای مطلق ($MAPE^{20}$) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^{21}$) که میزان خطا را بیان می‌کند (رابطه‌های ۲ و ۳) به‌عنوان معیارهای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند (Zhou et al., 2021) که نشان‌دهنده دقت و کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی تراز آب‌زیرزمینی هستند. معادله هر یک از شاخص‌های آماری در زیر آمده است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i) \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad (4)$$

در این روابط: O_i مقادیر مشاهداتی؛ P_i مقادیر برآورد شده؛ R^2 ضریب تبیین که هر چه این شاخص به یک

21- Root Mean Square Error

19- Coefficient of determination

20- Mean Absolute Percentage Error

MSE و RMSE به دست آمد که SAVI، EVI، NDVI به ترتیب برابر با ۰/۲۸۲ و ۰/۰۸ درصد خطا و همبستگی ۱۳/۰۷ و ۰/۹۸۷ است. این نشان می‌دهد که اضافه کردن پارامترهای بیشتر از یک نقطه خاص، تا سناریو هفتم، به جای بهبود دقت، منجر به کاهش آن می‌شود.

مدل Gradient Boosted Tree

مقادیر معیارهای آماری مدل GBoost نشان داد سناریو اول تا سناریو دهم به ترتیب از ۰/۲۴۴ به ۰/۲ در RMSE، از ۰/۰۶ به ۰/۰۴ در MSE و درصد خطا (MAPE) از ۱۲/۴۶ به ۱۰/۲ کاهش یافته است. از طرفی میزان همبستگی در این سناریوها از ۰/۹۳۵ به ۰/۹۵۶ افزایش داشته است.

تجزیه و تحلیل همبستگی پارامترهای مختلف برای

پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی

در این پژوهش، اهمیت و تأثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی آبخوان رودان با استفاده از مدل‌های پیشرفته تحلیل شد. نتایج آزمون همبستگی نشان داد که پارامتر بارش تجمعی (Cum_Pr) با همبستگی $r = -0.63$ ارتباط منفی و معنی‌داری با تراز آب زیرزمینی دارد، که نقش کلیدی این پارامتر در تغییرات سطح آب زیرزمینی را برجسته می‌سازد. همچنین، شاخص‌های NDWI ($r = -0.36$) و PDSI ($r = -0.33$) نیز ارتباطات منفی قابل توجهی نشان دادند و بیانگر اثر شرایط خشکسالی و رطوبت خاک بر منابع آب زیرزمینی بودند.

شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و EVI، هر یک با همبستگی ($r = -0.24$)، نقش نسبی پوشش گیاهی در نوسانات سطح آب زیرزمینی را نشان دادند. با این حال، پارامترهایی نظیر شاخص بارش استاندارد SPI ($r = -0.16$) و شاخص GNDVI ($r = 0$) از لحاظ آماری معنی‌دار نبوده و تأثیر قابل توجهی بر تراز آب زیرزمینی نداشتند. آزمون معناداری آماری نشان داد که صرفاً وجود ارتباط عددی برای تأیید تأثیر کافی

مقدار این معیارها را دارا است، رتبه ۱ اختصاص می‌یابد. در نهایت پس از انتخاب مدل‌ها یا ترکیبات مناسب هر روش و مقایسه بین آنها، روش برتر در برآورد تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌گردد (Zarei et al., 2022). برای بهینه‌سازی، از روش جستجوی شبکه‌ای^{۲۲} به همراه اعتبارسنجی متقاطع^{۲۳} استفاده شده است.

نتایج

تجزیه و تحلیل مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان رودان

در این تحقیق، نتایج سه مدل مختلف درخت تصمیم، یادگیری عمیق و GBoost برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان رودان طی ۱۰ سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خروجی هر یک از مدل‌ها به کمک معیارهای آماری ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مدل یادگیری عمیق

در مدل یادگیری عمیق با افزایش تعداد پارامترها در سناریو اول تا سوم میزان دقت مدل کاهش می‌یابد. RMSE و MSE این مدل در سناریو اول تا سوم به ترتیب از ۰/۹۵ و ۰/۸۵ به ۱/۱ و ۱/۲ افزایش و مقادیر درصد خطا و میزان همبستگی نیز از سناریو اول تا سوم روند کاهشی دارد. در ادامه از سناریو چهارم تا نهم مقدار همبستگی (R^2) از ۰/۸۱ تا ۰/۸۷ افزایش و میزان درصد خطا از ۵۲/۸ به ۳۸/۸ کاهش یافته است. در سناریو دهم با اضافه نمودن شاخص GNDVI افزایش میزان خطا و کاهش همبستگی رخ داده است.

مدل درخت تصمیم

مدل درخت تصمیم با ورودی بارش تجمعی دارای RMSE برابر با ۰/۳۷۰ درصد خطا ۱۷/۸۰ و ضریب تعیین ۰/۹۷۸ بود. بیشترین دقت مدل با استفاده از ترکیب ورودی‌های بارش تجمعی، NDWI، PDSI،

می‌کنند، زیرا همبستگی به‌تنهایی نمی‌تواند به طور قطعی تأثیرات را اثبات کند. این تحلیل علمی و آماری ابزار ارزشمندی برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی مؤثر در برابر خشکسالی ارائه می‌دهد.

نیست و تنها پارامترهایی مانند Cum_Pr، NDWI، PDSI که مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ داشتند، ارتباطی معنی‌دار با تراز آب‌زیرزمینی داشتند؛ در حالی که ارتباط پارامترهایی مانند SPI و GNDVI از نظر آماری رد شد.

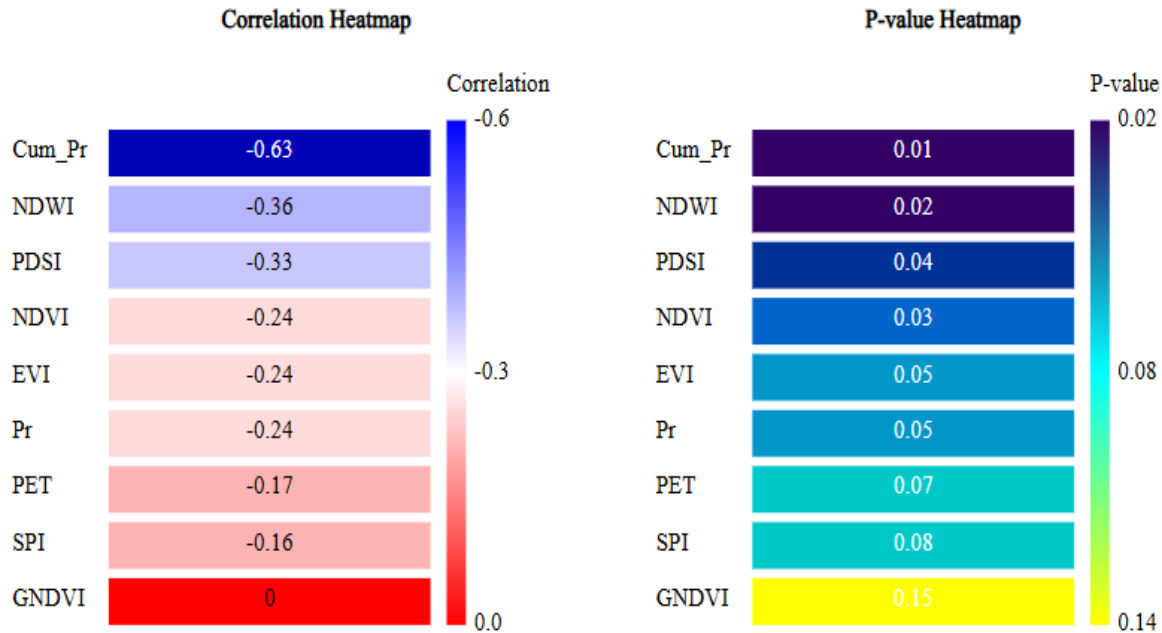
این یافته‌ها بر اهمیت استفاده از مدل‌های رگرسیونی یا یادگیری ماشین برای تحلیل روابط علی تأکید

جدول ۲- نتایج آنالیز مدل‌های انتخابی در ایستگاه مورد مطالعه

Table 2- Analysis results of selected models in the studied station

مدل	سناریو	R ²	MSE	RMSE	MAPE
یادگیری عمیق	Cum_Pr	0.767	0.855	0.925	47.586
	Cum_Pr-NDWI	0.744	1.151	1.085	54.719
	Cum_Pr-NDWI-pdsi	0.702	1.210	1.100	57.230
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI	0.806	0.874	0.957	52.775
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI	0.815	0.893	0.976	50.218
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI	0.838	0.868	0.942	48.047
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr	0.855	0.651	0.807	39.229
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET	0.864	0.638	0.818	39.275
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI	0.868	0.667	0.817	38.817
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI-GNDVI	0.819	0.984	0.992	49.773
درخت تصمیم	Cum_Pr	0.978	0.135	0.367	17.799
	Cum_Pr-NDWI	0.985	0.096	0.310	14.550
	Cum_Pr-NDWI-pdsi	0.987	0.083	0.288	13.679
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI	0.987	0.080	0.282	13.071
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI	0.986	0.090	0.300	13.862
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI	0.986	0.088	0.296	13.659
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr	0.986	0.087	0.295	13.736
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET	0.970	0.184	0.429	19.174
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI	0.970	0.184	0.429	19.177
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI-GNDVI	0.967	0.204	0.452	20.111
GBoost	Cum_Pr	0.935	0.060	0.244	12.459
	Cum_Pr-NDWI	0.944	0.051	0.225	11.719
	Cum_Pr-NDWI-pdsi	0.944	0.051	0.226	11.764
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI	0.944	0.051	0.226	11.744
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI	0.944	0.051	0.226	11.744
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI	0.944	0.051	0.225	11.719
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr	0.944	0.051	0.225	11.719
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET	0.956	0.040	0.201	10.234
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI	0.956	0.040	0.200	10.194
	Cum_Pr-NDWI-pdsi-SAVI-NDVI-EVI-Pr-PET-SPI-GNDVI	0.956	0.040	0.200	10.194

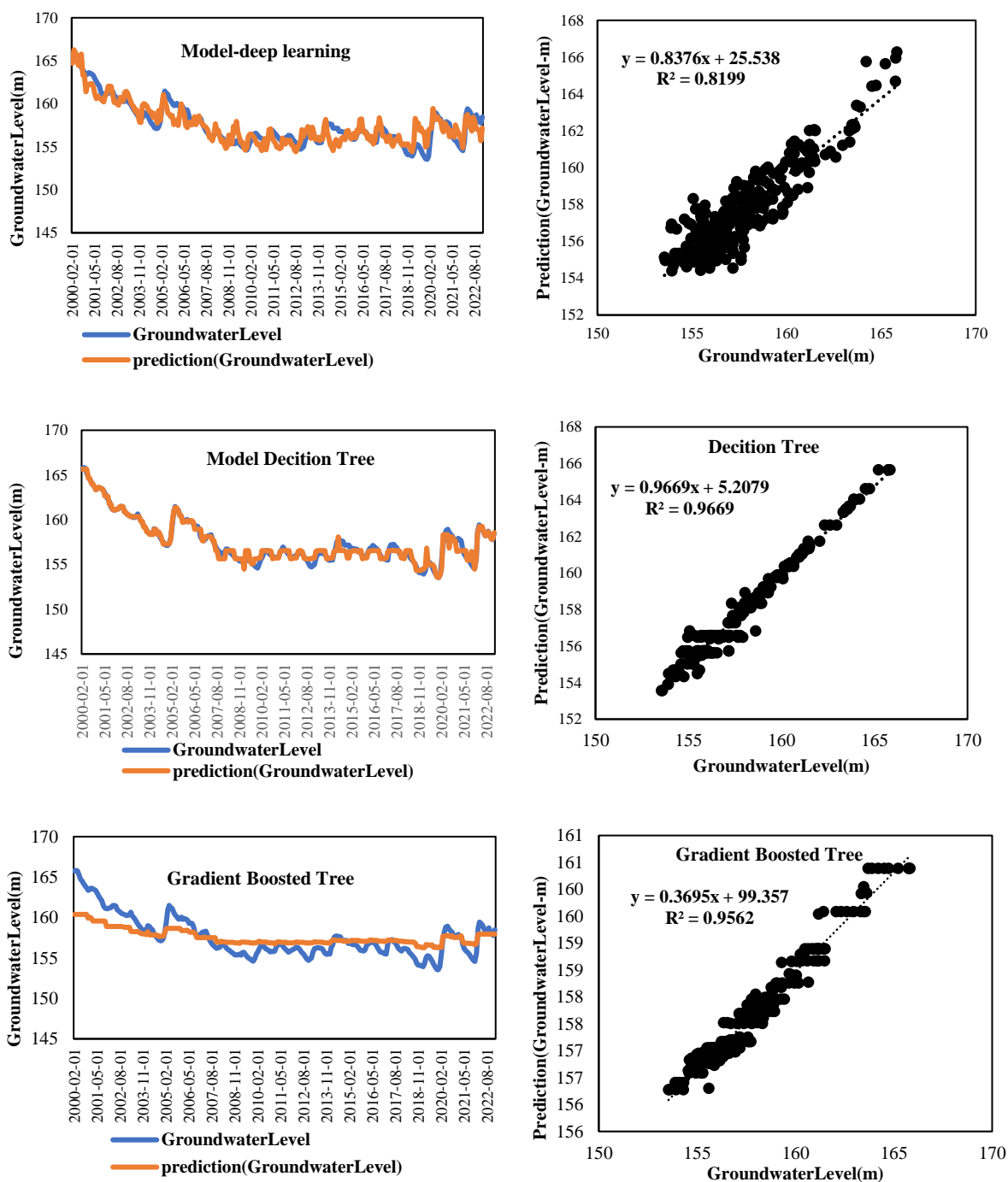
راهنمای رنگ‌ها: در مورد R² سبز پررنگ و در مورد RMSE، MSE و MAPE قرمز کم رنگ به معنی عملکرد بهتر مدل‌ها است.



شکل ۲- همبستگی پارامترهای مورد بررسی با تغییرات سطح آب‌زیرزمینی
Figure 2- Correlation of investigated parameters with changes GWL

در شکل ۳ نتایج خروجی مدل‌ها آمده است. خروجی مدل درخت تصمیم با داده‌های سطح آب آبخوان انطباق بسیار مناسبی دارد. روند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده در این مدل منطبق با آبخوان بوده و پراکنش داده‌ها بسیار کم است. طبق شکل ۳ ضریب تبیین مدل درخت تصمیم بالاترین مقدار و برابر با ۰/۹۷ است. بیشترین دقت این مدل با استفاده از ترکیب ورودی‌های Cumulative Precipitation، NDWI، PDSI، SAVI، NDVI و EVI به‌دست آمد که RMSE برابر با ۰/۲۹۵ و ضریب همبستگی ۰/۹۸۶ داشت. طبق شکل ضریب تبیین مدل درخت تصمیم‌گیری بالاترین مقدار و برابر با ۰/۹۷ است و پراکنش داده‌ها بسیار کم است. روند نتایج خروجی مدل با داده‌های سطح آب‌زیرزمینی تطابق مناسبی دارد.

در تحلیل انجام‌شده، پارامتر GNDVI ارتباط معناداری با اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی (مانند NDVI و EVI) نشان نداد، اما با شاخص SAVI همبستگی قابل‌توجهی داشته است. این تفاوت در همبستگی ممکن است به دلیل حساسیت‌های متفاوت شاخص‌های پوشش گیاهی به شرایط محیطی و ویژگی‌های خاص منطقه مطالعه باشد. بنابراین، فرض "یا همه شاخص‌های پوشش گیاهی با GNDVI همبستگی دارند یا هیچ‌کدام" در این پژوهش تأیید نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بررسی مجزای ارتباط هر شاخص با سایر پارامترها ضروری است و ممکن است هر شاخص به تنهایی نمایانگر جنبه‌های متفاوتی از شرایط زیست‌محیطی باشد. طبق شکل ۲ همبستگی PET و SPI با GNDVI به ترتیب ۰/۰۹- و ۰/۲۲- است.



شکل ۳- نتایج مدل‌سازی تغییرات آب زیر زمینی با روش‌های مختلف

Figure 3- Results of modeling groundwater changes using different methods

این مدل با استفاده از ورودی‌های Cumulative NDVI, SAVI, PDSI, NDWI, Precipitation, Pr, EVI و PET به دست آمد که RMSE برابر با ۰/۸۱۷ و ضریب همبستگی ۰/۸۶۸ بود.

طبق شکل ضریب تبیین مدل یادگیری عمیق برابر با ۰/۸۲ ولی پراکنش داده‌ها در مقایسه با دو مدل دیگر، نسبتاً زیاد است. روند خروجی مدل و داده‌های سطح آب زیرزمینی نوسانات نسبتاً بالایی دارد. بیشترین دقت

همبستگی بالا اطلاعات مشابهی را منتقل می‌کنند. این شباهت اطلاعاتی باعث ایجاد هم‌خطی و افزایش خطا در مدل‌ها می‌شود. به همین دلیل، NDVI به‌عنوان شاخص نماینده پوشش گیاهی انتخاب شد و SAVI و EVI از مجموعه پارامترهای ورودی مدل‌ها حذف شدند. این اصلاح نه تنها به کاهش معیارهای خطا در تمامی سناریوهای مدل یادگیری عمیق منجر شد، بلکه دقت پیش‌بینی مدل‌ها را نیز به‌ویژه در سناریوهای پنجم تا نهم، بهبود بخشید. این نتایج بر اهمیت انتخاب بهینه شاخص‌ها در کاهش پیچیدگی مدل و افزایش دقت پیش‌بینی تأکید می‌کند.

در مدل درخت تصمیم، مشخص شد که با افزایش تعداد پارامترها تا سناریوی هفتم، دقت مدل بهبود می‌یابد؛ به‌طوری که مقادیر خطا کاهش و میزان همبستگی افزایش یافته است. با این حال، در سناریوهای هشتم تا دهم که پارامترهایی نظیر PET، SPI و GNDVI به مدل اضافه شدند، مقادیر خطا افزایش و همبستگی کاهش یافت. این امر نشان می‌دهد که اضافه شدن این پارامترها در شرایطی که اطلاعات جدید قابل توجهی به مدل اضافه نمی‌کنند، می‌تواند دقت پیش‌بینی را کاهش دهد.

در مدل GBBoost، علی‌رغم ضریب تبیین بالا ($R^2=0.962$)، روند تغییرات خروجی مدل با تغییرات واقعی سطح آب زیرزمینی همخوانی کمتری داشت. خروجی مدل نشان‌دهنده روندی نسبتاً ثابت بود که این ویژگی در مدل‌های مبتنی بر حساسیت کمتر به تغییرات داده‌های ورودی قابل مشاهده است. هرچند معیارهای خطا در این مدل پایین بوده ($RMSE=0.2$) و همبستگی ($r=0.956$) بالا است، اما اضافه کردن پارامترهای جدید در سناریوهای هشتم، نهم، و دهم نشان داد که این مدل نسبت به افزایش تعداد پارامترها حساسیت کمتری دارد و دقت مدل به طور معنی‌داری تغییر نمی‌کند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که دقت آماری (مانند RMSE و همبستگی) به‌تنهایی برای ارزیابی مدل کافی نیست و تطابق روند خروجی مدل با

مدل GBBoost با ورودی Cumulative Precipitation دارای RMSE برابر با ۰/۲۴۴ و ضریب همبستگی ۰/۹۳۵ بود. بیشترین دقت این مدل با استفاده از تمامی ورودی‌ها به دست آمد که RMSE برابر با ۰/۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۵۶ بود.

طبق شکل مدل GBBoost با ضریب تبیین بالا (۰/۹۶) عملکرد مناسبی از نظر دقت نشان داد. همچنین، بیشترین دقت این مدل با استفاده از تمامی ورودی‌ها به دست آمد که معیارهای خطای RMSE برابر با ۰/۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۵۶ را به همراه داشت. با این حال، بررسی روند تغییرات خروجی مدل در مقایسه با داده‌های سطح آب نشان داد که این مدل در بازتاب تغییرات دینامیک سطح آب، عملکرد ضعیف‌تری داشته است. خروجی مدل GBBoost دارای روندی نسبتاً ثابت است و به‌درستی نوسانات داده‌های واقعی سطح آب زیرزمینی را بازتاب نمی‌دهد. این امر نشان می‌دهد که علی‌رغم دقت عددی بالا، مدل توانایی کافی برای شبیه‌سازی روند واقعی تغییرات سطح آب را ندارد. این مسئله می‌تواند ناشی از نوع ساختار مدل و محدودیت آن در درک تغییرات غیرخطی و دینامیک پیچیده داده‌های ورودی باشد.

بحث

در تحلیل مدل یادگیری عمیق، با بررسی تأثیر مقادیر خطا و میزان همبستگی میان متغیرها در سناریوهای مختلف، مشخص شد که سناریوهای پنجم تا نهم به دلیل برخورداری از بیشترین همبستگی و کمترین مقادیر خطا (RMSE و MSE)، مناسب‌ترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان رودان هستند. این سناریوها از متغیرهای کلیدی نظیر بارش تجمعی (Cum_Pr)، شاخص‌های پوشش گیاهی (NDWI، PDSI و NDVI)، و پارامترهای اقلیمی (PET و SPI) استفاده کرده‌اند. تحلیل همبستگی میان پارامترهای ورودی نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI، SAVI و EVI به دلیل ضرایب

تغییرات واقعی سطح آب زیرزمینی نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که در مدل‌های یادگیری عمیق و درخت تصمیم، انتخاب متغیرهای ورودی بهینه نقش کلیدی در افزایش دقت و کاهش خطا دارد، در حالی که در مدل GBoost، افزایش تعداد پارامترها تأثیر کمتری بر بهبود دقت مدل داشته و بیشتر منجر به ثبات نسبی خروجی‌ها شده است. این تحلیل‌ها اهمیت رویکرد سیستماتیک در انتخاب ورودی‌های مدل‌سازی و توجه به جنبه‌های مختلف دقت، همبستگی و روند خروجی مدل‌ها را روشن می‌سازد.

بررسی رفتار هر سه مدل نشان داد که حساسیت مدل‌ها به پارامترهای ورودی یکسان نیست. مدل یادگیری عمیق و درخت تصمیم حساسیت بیشتری به پارامترهای ورودی دارند. همچنین رفتار مدل یادگیری عمیق و درخت تصمیم‌گیری پاسخ نسبتاً مشابهی در پارامترهای ورودی هر سناریو دارد. به‌طوری که روند صعودی در افزایش میزان همبستگی و کاهش مقادیر خطا با افزایش هر پارامتر در سناریوها، نشان می‌دهد. مدل GBoost حساسیت چندانی به پارامترها ندارد. Zhang و همکاران (۲۰۱۹) بیان نمودند افزایش تعداد متغیرهای ورودی در مدل‌سازی، علی‌رغم بهبود اولیه دقت، می‌تواند در صورت وجود همبستگی بالا میان متغیرها منجر به تکرار اطلاعات و کاهش کارایی مدل شود. در پژوهش حاضر، حساسیت مدل‌ها نسبت به تعداد متغیرهای ورودی بررسی شد و نتایج نشان داد که استفاده از تعداد زیادی پارامتر ورودی با همبستگی بالا (مانند NDVI، SAVI و EVI) به دلیل انتقال اطلاعات تکراری، باعث افزایش خطا می‌شود. انتخاب یک متغیر نماینده (مانند NDVI) نه‌تنها باعث کاهش RMSE و MSE شد، بلکه روند تغییرات مدل را نیز با داده‌های واقعی بهتر تطبیق داد. از آنجایی که مدل‌های یادگیری ماشینی می‌توانند با هر داده‌ای کار کنند، متغیرهای ورودی زیادی می‌توان در نظر گرفت.

شایان ذکر است که داده‌های ورودی معمولاً بر اساس در دسترس بودن آنها انتخاب می‌شوند. به‌طور خاص، درجه دقت پیش‌بینی به‌وضوح مکانی و زمانی شبکه نظارتی که از آن مدل برای پیش‌بینی توسعه داده شده است، بستگی دارد. بنابراین، انتخاب متغیرهای ورودی اغلب با در دسترس بودن سری‌های زمانی مناسب هدایت می‌شود. نتایج همبستگی نشان داد برخی پارامترهای به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای مانند بارش تجمعی، شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص خشکسالی بیشترین تأثیر را بر تراز آبخوان دارند. این تأثیر را می‌توان در مدل یادگیری عمیق به‌خوبی مشاهده نمود. در سناریوی ۴ تا ۹ با افزایش پارامترها مختلف میزان همبستگی و درصد خطا کاهش یافته و در سناریوی دهم با اضافه نمودن شاخص GNDVI درصد خطا افزایش و میزان همبستگی کاهش قابل توجهی دارد.

در مدل درخت تصمیم، سناریو ۸ تا ۱۰ با اضافه شدن پارامترهای PET، SPI و GNDVI مقادیر همبستگی کاهش و میزان و درصد خطا افزایش قابل توجهی نشان داد، به‌طوری که بر اساس آزمون همبستگی این پارامترها با یکدیگر همبستگی مناسبی ندارند. همچنین ارتباط میان پارامترهای PET و SPI با GNDVI مخالف یکدیگر است. در این میان پارامتر بارش تجمعی با شاخص‌های PDSI، NDVI، EVI و مقدار بارش بالاترین همبستگی را با یکدیگر دارند. مقدار بارش و شاخص پالمر (PDSI) هر دو مبتنی بر میزان بارش است که همبستگی بالای آنها منطقی است. همبستگی بالای شاخص‌های پوشش گیاهی با بارش در این منطقه بیانگر تأثیرپذیری بالا پوشش از بارش است. سناریوهای مورد قبول در هر دو مدل منتخب (درخت تصمیم و یادگیری عمیق) شامل شاخص‌های گیاهی است که بیانگر تأثیر قابل توجه این پارامتر بر منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که اصلی‌ترین منبع رطوبتی در این مناطق است.

در مدل یادگیری عمیق نقاط اوج خروجی مدل و داده‌های سطح آب گاه‌ها با تأخیر زمانی یا شدت بیشتری است. بیشترین نوسانات مربوط به سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹ در خروجی مدل است. مدل یادگیری عمیق پارامترهای بیشتری را در بهترین سناریو منتخب، سناریو ۹، خود دارد که شامل پارامترهای بارش، تبخیر و تعرق و خشکسالی هواشناسی است. بر اساس نتایج همبستگی هر سه پارامتر بارش، تبخیر و تعرق و شاخص خشکسالی همبستگی پایینی با تغییرات سطح آب‌زیرزمینی دارند. سطح آب آبخوان رودان به‌طور متوسط طی ۲۲ سال اخیر ۱۵۷/۶ متر است. بارش ماهانه با تاخیر ۴ ماه با سطح آب‌زیرزمینی همبستگی بالایی دارد. شاخص خشکسالی SPI بر مبنای بارش ماهانه است و با تاخیر زمانی بر سطح آب‌زیرزمینی اثرگذار است. با توجه به تاخیر زمانی ۴ ماهه بارش منطقی است که در مدل یادگیری عمیق مقادیر خطا و همبستگی نسبت به مدل درخت تصمیم‌گیری به ترتیب بیشتر و کمتر است. این مدل با در برداشتن پارامترهای محیطی بیشتر و بررسی میزان اثرگذاری آنها در مدل‌سازی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی، کارایی، عملکرد و جامعیت بهتری برای آبخوان رودان دارد. ضریب تبیین مدل درخت تصمیم بالاترین مقدار (۰/۹۷) و داده‌های مدل‌سازی مشابه داده‌های سطح آب آبخوان است. تنها در ماه آگوست ۲۰۰۹، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۲؛ فوریه ۲۰۱۹ مدل مقدار کمتری پیش‌بینی کرده است. دلیل این امر می‌تواند شروع خشکسالی‌های شدید در منطقه باشد تا سال ۲۰۲۱ تداوم داشت. این مسئله بر شاخص‌های منتخب در مدل تأثیر گذار است. از سال ۲۰۲۱ به بعد با کاهش شدت خشکسالی، روند مدل و داده‌ها یکسان است. یافته‌های Chen و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد مدل GBoost کارایی مناسبی برای پیش‌بینی پتانسیل آب‌زیرزمینی در دشت ساوه استان مرکزی دارد ولی با توجه به نتایج بدست آمده این مدل براساس پارامترهای

مدل یادگیری عمیق با در نظر گرفتن شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مجموعه سناریوهای منتخب خود، اهمیت و نقش کلیدی این عوامل در تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه رودان را برجسته می‌کند. برخلاف مدل‌های ساده‌تر، این مدل به دلیل توانایی آن در پردازش داده‌های پیچیده و شناسایی الگوهای غیرخطی، توانسته است روابط عمیق‌تری میان شاخص‌های ورودی و تغییرات سطح آب‌زیرزمینی کشف کند. این ویژگی مدل یادگیری عمیق را به ابزاری ارزشمند برای تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر نوسانات سطح آب زیرزمینی تبدیل کرده است.

در عین حال، توانایی این مدل در انتخاب پارامترهای اثرگذار و تعاملات پیچیده میان متغیرها، به‌ویژه در شرایطی که عوامل متعددی بر تغییرات منابع آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند، آن را به مدلی مناسب برای تحلیل‌های پیشرفته در مدیریت منابع آب زیرزمینی منطقه رودان تبدیل کرده است. این قابلیت‌ها به مدیران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا با شناخت بهتر عوامل مؤثر، تصمیمات کارآمدتری برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی اتخاذ کنند.

همچنین، نتایج این مدل نشان می‌دهد که هرچند مدل GBT در برخی معیارهای کمی عملکرد بهتری داشته، اما مدل یادگیری عمیق به دلیل انعطاف‌پذیری بالاتر در تحلیل عوامل کلیدی و تطبیق با تغییرات روندی، ابزار مناسبی برای تحلیل‌هایی است که هدف آن‌ها درک عمیق‌تر پویایی‌های سیستم و تأثیر عوامل مختلف است. این نتایج با یافته‌های Zhang و همکاران (۲۰۱۹) منطبق است.

همچنین Michael و همکاران (۲۰۰۵) تأکید کرد که درخت‌های تصمیم توانایی ترکیب منابع داده‌های مختلف را دارند؛ بنابراین، داده‌های تاریخی موجود را می‌توان با داده‌های جایگزین یا شاخص جدید (مانند بارندگی) ترکیب کرد تا تشخیص دهد که آیا داده‌های جدید مشکلات بالقوه‌ای را نشان می‌دهند که جمع‌آوری نمونه‌های سنتی‌تر را تضمین می‌کند یا خیر.

ورودی کارایی چندانی برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب آبخوان رودان ندارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سه مدل یادگیری عمیق، درخت تصمیم و GBoost برای پیش‌بینی تراز آب‌زیرزمینی آبخوان رودان طی دوره زمانی ۲۲ ساله مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ۱۰ پارامتر برای بررسی میزان تاثیر آنها در هر مدل به صورت ۱۰ سناریو اجرا شد. خروجی هر سه مدل با معیارهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج خروجی مدل‌ها نشان داد مدل درخت تصمیم و یادگیری عمیق با مقادیر همبستگی بالا (به طور متوسط برای همه سناریوها به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۱) و مقدار خطای کمتر (به طور متوسط برای همه سناریوها به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۹۴) عملکرد بسیار دقیقی در پیش‌بینی تراز آب‌زیرزمینی دارند. روند تغییرات زمانی تراز آب زیرزمینی نشان داد که مدل‌های مورد استفاده توانستند به طور نسبی تغییرات کلی تراز آب زیرزمینی را پیش‌بینی کنند. با این حال، بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که این همخوانی در تمامی بازه‌های زمانی و برای همه مدل‌ها یکسان نیست. به‌ویژه، مدل یادگیری عمیق در برخی بازه‌های زمانی، به‌ویژه در دوره‌هایی که نوسانات شدیدتری در تراز آب زیرزمینی وجود داشت، دقت پیش‌بینی کمتری را نشان داد. در مقایسه، مدل GBoost عملکرد پایدارتری داشت و توانست روند کلی و جزئیات تغییرات زمانی را با انحراف کمتری نسبت به مقادیر واقعی دنبال کند.

در این راستا، می‌توان گفت که همخوانی پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی در مدل GBoost مطلوب‌تر است و مدل درخت تصمیم نیز در بازه‌های زمانی مشخص عملکرد مناسبی از خود نشان داد. این تفاوت‌ها بیانگر آن است که اگرچه پیش‌بینی‌ها در برخی موارد نزدیک به مقادیر واقعی بودند، اما نمی‌توان ادعا کرد که تمامی مدل‌ها در بازتاب دقیق روند تغییرات زمانی عملکرد بی‌نقصی داشته‌اند. تحلیل‌های آماری و گرافیکی، به‌ویژه در

شکل (۳)، این واقعیت را تأیید می‌کنند که مدل Gboost نسبت به مدل یادگیری عمیق در بازتاب روند تغییرات زمانی آب زیرزمینی کارآمدتر و دقیق‌تر عمل کرده است.

استفاده از پارامترهای ورودی در سناریوهای منتخب هر دو مدل پیشنهادی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی مدل‌ها در مدیریت منابع آب زیرزمینی کمک کند. یکی از جنبه‌های کلیدی این مطالعه، انتخاب هدفمند پارامترهای ورودی با حذف متغیرهای دارای همبستگی بالا بود. این رویکرد با تمرکز بر NDVI به‌عنوان نماینده شاخص‌های پوشش گیاهی و حذف SAVI و EVI، توانست دقت مدل‌ها را افزایش داده و پیچیدگی محاسباتی را کاهش دهد. این اصلاحات منجر به کاهش خطای مدل‌ها و افزایش همخوانی نتایج پیش‌بینی با داده‌های واقعی شد. داده‌های مشاهداتی زمینی برای تراز آب‌زیرزمینی نیز اهمیت بالایی این پارامترها را تأیید می‌کند. نتایج این تحقیق کاربردهای عملی متعددی در مدیریت آبخوان‌ها دارد. سطح آب آبخوان متأثر از پارامترهای محیطی و انسانی گوناگونی است. بررسی همه‌جانبه این عوامل و میزان اثرگذاری هر یک از آنها در هر منطقه با توجه به ویژگی‌های محیطی آن منطقه، بسیار متفاوت است؛ بنابراین نمی‌توان یک الگوی واحد را برای همه مناطق پیشنهاد داد. از طرفی دسترسی و جمع‌آوری داده‌های مربوط به هر یک از عوامل طی زمان از جمله محدودیت‌های اجرای این مدل‌ها در هر منطقه است. با وجود تمام این محدودیت‌ها، استفاده به موقع از مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند به شناسایی زودهنگام بحران‌های آبی مانند خشکسالی‌ها کمک کرده و امکان اتخاذ تدابیر پیشگیرانه را فراهم کند. داده‌های پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران کمک کنند تا برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تری برای استفاده بهینه از منابع آب انجام دهند. پیش‌بینی دقیق تراز آب‌زیرزمینی می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا برنامه‌های آبیاری خود را بهینه کنند و از منابع آب به صورت پایدارتر استفاده کنند. برای این

و توزیع آب بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک شایانی نماید. استفاده از شیوه‌های نوین و بکارگیری آن در کنار دستورالعمل‌ها و معیارهای از پیش تعیین شده، نگرش جامع‌تری به مدیران و تصمیم‌گیران در زمینه منابع آبی می‌دهد و امکان اتخاذ تصمیمات مهم و حیاتی در این زمینه را تسهیل می‌نماید.

References

- Abdi, E., Ali, M., Guimarães Santos, C. A., Olusola, A., & Ghorbani, M. A. (2024). Enhancing groundwater level prediction accuracy using interpolation techniques in deep learning models. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101213. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101213>
- Alfarrah, N., & Walraevens, K. (2018). Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water*, 10(2), 143. <https://doi.org/10.3390/w10020143>
- Afzaal, H., Farooque, A.A., Abbas, F., Acharya, B., & Esau, T. (2020). Groundwater estimation from major physical hydrology components using artificial neural networks and deep learning. *Water*, 12 (1). 35- 49. <https://doi.org/10.3390/w12010005>
- Alizamir, M., Kisi, O., & Zounemat-Kermani, M. (2018). Modelling long-term groundwater fluctuations by extreme learning machine using hydroclimatic data. *Hydrology Science Journal*. 63 (1), 63–73. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1410891>
- Bowes, B.D., Sadler, J.M., Morsy, M.M., Behl, M., & Goodall, J.L. (2019). Forecasting groundwater table in a flood prone coastal city with long short-term memory and recurrent neural networks. *Water*, 11 (5). 1098. <https://doi.org/10.3390/w11051098>
- Barzegar, R., Fijani, E., Moghaddam, A.A., & Tziritis, E. (2017). Forecasting of groundwater level fluctuations using ensemble hybrid multi-wavelet neural network-based models. *Science of the Total Environment*, 599, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.189>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). *XGBoost: A scalable tree boosting system*. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785-794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Chen, Y., Chen, W., Chandra P. S., Saha, A., Chowdhuri, I., Adeli, B., Janizadeh, S., Dineva, A. A., Wang, X., & Mosavi, A. (2021). Evaluation efficiency of hybrid deep learning algorithms with neural network decision tree and boosting methods for predicting groundwater potential. *Geocarto International journal*, 37(19), 5564–5584. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1920635>
- Franses, P. H., & Van Dijk, D. (2000). *Non-linear time series models in empirical finance*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754067>
- Gong, Y., Zhang, Y., Lan, S., & Wang, H. (2016). A comparative study of artificial neural networks, support vector machines and adaptive neuro fuzzy inference system for forecasting groundwater levels near Lake Okeechobee, Florida. *Water resources management*, 30(1), 375–391. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1167-8>
- Ghobadi, F., & Kang, D. (2023). Application of machine learning in water resources management: a systematic literature review. *Water* 15(4), 620. <https://doi.org/10.3390/w1504062>
- Ghadami, G., & Poosti, M. (2020). Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of Rudan Ultramafics North (Groom mountain), Hormozgan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(115), 313-324. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.111764.1354> (In Persian)
- Planning and Budget Organization. (2019). *Hormozgan Management and Planning*

- Organization Land planning, supervision and planning affairs*. Center for Development Research and Foresight. (pp. 54).
- Haas, J., Metz, M., & Neteler, M. (2021). *MODIS NDVI and EVI, 16-day time series for Europe at 1 km resolution*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.657385>
- Huang, X., Gao, L., Crosbie, R.S., Zhang, N., Fu, G., & Doble, R. (2019). Groundwater recharge prediction using linear regression, multi-layer perception network, and deep learning. *Water*, 11(9), 1879. <https://doi.org/10.3390/w11091879>
- Jena, M., & Dehuri, S. (2020). Decision tree for classification and regression: A state-of-the-art review. *Informatica Journal*, 44(4). <https://doi.org/10.31449/inf.v44i4.3023>
- Kochhar, A., Singh, H., Sahoo, S., Litoria, P.K., & Pateriya, B. (2022). Prediction and forecast of pre-monsoon and post-monsoon groundwater level: Using deep learning and statistical modelling. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 2317–2329. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01235-z>
- Kadra, A., Lindauer, M., Hutter, F., & Grabocka, J. (2021). Well-tuned Simple Nets Excel on Tabular Datasets. In M. Ranzato, A. Beygelzimer, Y. Dauphin, P. S. Liang, & J. W. Vaughan (Eds.). *Advances in Neural Information Processing Systems*. 34, pp. 23928–23941. Curran Associates, Inc. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2021/file/c902b497eb972281fb5b4e206db38ee6-Paper.pdf
- Kim, G.B. (2020). A study on the establishment of groundwater protection area around a saline waterway by combining artificial neural network and GIS-based AHP. *Environmental Earth Sciences Journal*, 79(5), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8862-3>
- Khan, J., Lee, E., Balobaid, A.S., & Kim, K. (2023). A comprehensive review of conventional, machine learning, and deep learning models for groundwater level (GWL) forecasting. *Applied Sciences*, 13, 2743. <https://doi.org/10.3390/app13042743>
- Lo, W.C., Borja, R.I., Deng, J.H., & Lee, J.W. (2020). Analytical solution of soil deformation and fluid pressure change for a two-layer system with an upper unsaturated soil and a lower saturated soil under external loading. *Journal of Hydrology*, 588, 124997. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124997>
- Manna, T., & Anitha, A. (2023). Deep ensemble-based approach using randomized low-rank approximation for sustainable groundwater level prediction. *Applied Sciences*, 13(5), 3210. <https://doi.org/10.3390/app13053210>
- Malakar, P., Mukherjee, A., Bhanja, S. N., Ray, R. K., Sarkar, S., & Zahid, A. (2021). Machine-learning-based regional-scale groundwater level prediction using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 29, 1027–1042. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02306-2>
- Michael, W.J., Minsker, B.S., Tchong, D., Valocchi, A.J., & Quinn, J.J. (2005). Integrating data sources to improve hydraulic head predictions: A hierarchical machine learning approach. *Water Resources Research*, 41, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2003WR002802>
- Miotto, R., Wang, F., Wang, S., Jiang, X., & Dudley, J.T. (2018). Deep learning for healthcare: Review, opportunities and challenges. *Brief. Bioinform*, 19(6), 1236–1246. <https://doi.org/10.1093/bib/bbx044>
- Nguyen, P.T., Ha, D.H., Jaafari, Nguyen, H.D., Van Phong, T., Al-Ansari, N., Prakash, I., Le, H.V., & Pham, B.T. (2020). Groundwater potential mapping combining artificial neural network and real adaboost ensemble technique: the daknong province case-study, Vietnam. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2473. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072473>
- Nadiri, A.A., Chitsazan, N., Tsai, F.T.C., & Moghaddam, A.A. (2014). Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 520–532. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000824](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000824)
- Paroon, S., Yavari, G., & Rezazadeh, M. (2019). Climate classification of Hormozgan province using classical methods. *Geography (Regional Planning)*, 8(33), 115-127. (In Persian)
- Priyan, K. (2021). Issues and challenges of groundwater and surface water management in semi-arid regions. *Groundwater Resources Development and Planning in the*

- Semi-Arid Region*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68124-11>
- Pham, B.T., Jaafari, A., Prakash, I., Singh, S.K., Quoc, N.K., & Bui, D.T. (2019). Hybrid computational intelligence models for groundwater potential mapping. *Catena Journal*, 182, 104101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104101>
- Pham, Q. B., Kumar, M., Nunno, F. D., Elbeltagi, A., Granata, F., Towfiqul Islam, A. R. M. d., Talukdar, S., Nguyen, X. C., Ahmed, A.N., & Duong Tran Anh, D. (2022). Groundwater level prediction using machine learning algorithms in a drought-prone area. *Neural Computing and Applications*, 34, 10751–10773. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07009-7>
- Rahmati, O., & Melesse, A.M. (2016). Application of Dempster–Shafer theory, spatial analysis and remote sensing for groundwater potentiality and nitrate pollution analysis in the semi-arid region of Khuzestan, Iran. *Science of Total Environment*, 568, 1110–1123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.176>
- Rajaei, T., Ebrahimi, H. & Nourani, V. (2019). A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. *Journal of hydrology*, 572, 336–351. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.037>
- Rathinasamy, M., Khosa, R., Adamowski, J., Ch, S., Partheepan, G., & Anand, J. (2014). Wavelet-based multiscale performance analysis: an approach to assess and improve hydrological models. *Water Resources Research*, 50, 9721–9737. <https://doi.org/10.1002/2013wr014650>
- Radhakrishnan, N., & Pillai, A. (2020). Comparison of Water Quality Classification Models using Machine Learning. *5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 1183–1188. <https://doi.org/10.1109/ICCES48766.2020.9137903>
- Sahoo, A. K., Pradhan, C., Barik, R. K., & Dubey, H. (2019). DeepReco: Deep Learning Based Health Recommender System Using Collaborative Filtering. *Computation*, 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/computation7020025>
- Sun, J., Hu, L., Li, D., Sun, K., & Yang, Z. (2022). Data-driven models for accurate groundwater level prediction and their practical significance in groundwater management. *Journal of Hydrology*, 608, 127630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127630>
- Singh, S. K., Shirzadi, A., & Pham, B. T. (2021). Application of artificial intelligence in predicting groundwater contaminants. *Water Pollut. International Journal of Management Practice*, 71–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8358-2_4
- Singh, A., Patel, S., Bhadani, V., Kumar, V., & Gaurav, K. (2024). AutoML-GWL: automated machine learning model for the prediction of groundwater level. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107405>
- Salamat, A., Ardestani, M., & Malekmohammadi, B. (2023). Modeling Groundwater Potential Using Machine Learning Models. *Watershed Management Research*, 36(4), 114-132. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.360675.1506> (In Persian)
- Tao, H., Hameed, M. M., Marhoon, H. A., Zounemat-Kermani, M., Heddami, S., Kim, S., Sulaiman, S. O., Tan, M. L., Sa'adi, Z., Danandeh Mehr, A., Allawi, M. F., Abba, S.I., Mohamad Zain, M., Falah, M.V., Jamei, M., Bokde, N. D., Bayatvarkeshi, M., Al-Mukhtar, M., Bhagat, S. K., Tiyasha, T., Khedher, K. M., Al-Ansari, N., Shahid, S., & Yaseen, Z. M. (2022b). Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review. *Neurocomputing Journal*, 489, 271–308. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.03.014>
- Tran, D.H., & Wang, S.J. (2020). Land subsidence due to groundwater extraction and tectonic activity in Pingtung Plain, Taiwan. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 361–365. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-361-2020>

- Wu, T.H., Chen, P.Y., Chen, C.C., Chung, M.J., Ye, Z.K., & Li, M.H. (2024). Classification and Regression Tree (CART)-based estimation of soil water content based on meteorological inputs and explorations of hydrodynamics behind. *Agricultural Water Management*, 299, 108869. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.108869>
- Yonghong, S. (2013). Response of NDVI to groundwater level change in the lower reaches of the Heihe River, China. *Journal of Desert Research*, 33(2), 574-582. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00079>
- Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R.X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213-237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>
- Zhang, J., Zhang, X., Niu, J., Hu, B. X., Soltanian, M. R., Qiu, H., & Yang, L. (2019). Prediction of groundwater level in seashore reclaimed land using wavelet and artificial neural network-based hybrid model, *Journal of Hydrology*, 577, 123948. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123948>
- Zhou, Z., Zhao, L., Lin, A., Qin, W., Lu, Y., Li, J., Zhong, Y., & He, L. (2021). Exploring the potential of deep factorization machine and various gradient boosting models in modeling daily reference evapotranspiration in China. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1287. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06293-8>
- Zarei, M., Zandi, R., & Naemitabar, M. (2022). Assessment of flood occurrence potential using data mining models of support vector machine, Chaid and Random Forest (Case study: Frizi watershed). *Journal of Watershed Management Research*, 13(25), 133-144. <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.25.133> (In Persian)

Generalized reconnaissance quantification of soil erosion damage due to potassium and phosphorus loss in second-order watersheds of Iran

Reza Chamani, Seyed Hamidreza Sadeghi*, Marjan Bahlekeh

Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

* Corresponding author: sadeghi@modares.ac.ir

(Received: 03 September 2024

Revised: 17 November 2024

Accepted: 14 December 2024)

Extended Abstract

Introduction: The population of the world is growing at an unprecedented rate, and the demand for food is expected to increase dramatically in the coming decades, placing enormous pressure on the agricultural sector. In this regard, developing countries are forced to use more chemical fertilizers. However, chemical inputs often have harmful effects on the surrounding environment due to their improper and disproportionate use in the form of chemical fertilizers. These effects include the degradation of water and soil resources, air pollution, and soil erosion. Soil erosion and loss of nutrients under its influence are some of the most critical concerns in the sustainable provision of human needs over time. In this regard, Iran, located in the Mediterranean climate and with lands sensitive to erosion, is witnessing soil erosion and the depletion of food resources. On the other hand, the loss of nutrient resources in the soil has caused a decrease in agricultural production and an increase in the cost of production, resulting in the degradation of the soil.

Materials and methods: In this research, we evaluated the cost of replacing lost nutrients in different land-uses. We collected previous soil erosion studies in different areas of Iran and determined the amount of erosion in different land-uses as well as the amount of phosphorus and potassium in each kilogram of eroded soil. We used Iran's land-use map from Sentinel-2 products in 2021 which has a spatial accuracy of 10 meters. Finally, we estimated the cost of soil erosion in the second-order watersheds of Iran using the alternative cost method based on the price of the mentioned elements.

Results and Discussion: Quantitative evaluation of lost elements in rangeland, agricultural and forest land-uses showed that forest lands had the highest mean amount of potassium and phosphorus losses, at 364.98 and 16.30 mg kg⁻¹, respectively. Additionally, the Talesh-Anzali Wetland Watershed has the lowest replacement cost for phosphorus and potassium, at 2943.90 and 61591.40 million Rials, respectively, and the Central Desert Watershed, with the main land-use of rangeland, has the highest replenishment cost at 413188.79 and 8644609.73 million Rials, respectively. In terms of agricultural land-use, the South Baluchistan Watershed has the lowest phosphorus and potassium replacement cost, at 41.08 and 994.02 and the Salt Lake Watershed has the highest, at 48419.64 and 445.310 million Rials, respectively. In watersheds with forests, the Atrak Watershed has the lowest cost, at 55.42 and 1240.84 million Rials, and the Haraz and Qarasu Watersheds have the highest replacement costs for phosphorus and potassium, at 7277.60 and 162955.71 million Rials. Regarding alternative costs, the Talesh-Anzali Wetland Watershed, with 234,114, and the Central Desert Watershed, with 9,299,886 million Rials, have the lowest and highest costs, respectively. In addition, the replacement costs of phosphorus and potassium elements in rangelands were estimated at about 60319513, in agricultural lands at 3808598, and in forest lands at 557882 million Rials.

Conclusion: As the research results showed, only the loss of two elements, phosphorus, and potassium, can cause direct and indirect economic losses. At the same time, the soil is rich in other vital nutrients and living organisms, whose replacement costs will be irreparable for Iran. Therefore, it is necessary to evaluate the damage caused by the loss of other elements and the amount of wind erosion in future research to better understand the damage caused to the country under the influence of soil erosion. In addition, in estimating the value of soil maintenance with the alternative cost approach, the cost of labor for spraying fertilizer and the cost of reconstruction and renovation of damage caused by soil erosion should also be included in the calculations. Considering such components, the mentioned figures will increase significantly, and the value of resources in maintaining soil fertility will be further confirmed.

Keywords: Erosion Economics, Erosion Monitoring, Integrated Watershed Management, Nutrients Loss, Soil Loss.

Citation: Chamani, R., Sadeghi, S.H.R., & Bahlekeh M. (2025). Reconnaissance generalized quantification of soil erosion damage due to potassium and phosphorus loss in second-order watersheds of Iran. *Integrated Watershed Management*, 2(5), 94-112. doi= 10.22034/iwm.2024.2040215.1172

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>).



کمی‌سازی اجمالی تعمیم‌یافته خسارت فرسایش خاک ناشی از هدررفت پتاسیم و فسفر در آبخیزهای رده دوم ایران

رضا چمنی، سیدحمیدرضا صادقی*، مرجان بهلکه

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

*نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

چکیده مبسوط

مقدمه: جمعیت جهان با سرعت بی‌سابقه‌ای در حال رشد است، انتظار می‌رود که تقاضا برای غذا در دهه‌های آینده به طرز چشمگیری افزایش یابد که فشار زیادی را بر بخش کشاورزی وارد می‌کند. در این راستا کشورهای درحال توسعه ناگزیر به استفاده از کودهای شیمیایی شده‌اند. لذا نهادهای شیمیایی غالباً در قالب استفاده نامناسب و نامتناسب از کودهای شیمیایی اثرهای زیان‌باری بر محیط اطراف می‌گذارد که از آن جمله می‌توان به تخریب منابع آب و خاک، آلودگی هوا و فرسایش خاک اشاره کرد. فرسایش خاک و هدررفت عناصر غذایی تحت تأثیر آن، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تأمین پایدار نیازهای انسانی در طول زمان بیان شده است. ایران نیز با قرارگیری در اقلیم مدیترانه‌ای و برخورداری از اراضی حساس به فرسایش شاهد فرسایش خاک و هدررفت منابع غذایی است. از طرفی دیگر هدررفت منابع غذایی خاک سبب کاهش تولیدات زراعی و افزایش هزینه تولید و در نتیجه تخریب خاک شده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش سعی شده است میزان هزینه ناشی از جایگزینی مواد غذایی هدررفته در کاربری‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس ابتدا مطالعات پیشین فرسایش خاک در حوزه‌های مختلف ایران گردآوری شد. سپس میزان فرسایش در کاربری‌های مختلف و همچنین میزان فسفر و پتاسیم موجود در هر کیلوگرم خاک فرسایش یافته تعیین شد. نقشه کاربری اراضی ایران نیز از خروجی قابل تهیه Sentinel-2 با دقت مکانی ۱۰ متر برای سال ۲۰۲۱ استفاده شد. در نهایت با استفاده از روش هزینه جایگزین و بر اساس قیمت عناصر مذکور، میزان هزینه فرسایش در آبخیزهای رده دوم کشور برآورد شد.

نتایج و بحث: ارزیابی کمی عناصر از دست‌رفته در کاربری‌های مرتع، زراعی و جنگل نشان داد که اراضی جنگلی بیش‌ترین میزان متوسط هدررفت پتاسیم و فسفر به ترتیب با مقدار ۳۶۴/۹۸ و ۱۶/۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم را داشته است. طبق نتایج این پژوهش حوزه آبخیز تالش-تالاب انزلی به ترتیب با ۲۹۴۳/۹۰ و ۶۱۵۹۱/۴۰ میلیون ریال کم‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم و آبخیز کویر مرکزی به ترتیب با ۴۱۳۱۸۸/۷۹ و ۸۶۴۴۶۰۹/۷۳ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم در کاربری مرتع را دارند. در کاربری زراعی نیز حوزه آبخیز بلوچستان جنوبی با ۴۱/۰۸ و ۹۹۴/۰۲ کم‌ترین و دریاچه نمک با ۴۸۴۱۹/۶۴ و ۴۴۵۳۱۰/۹۳ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم را به خود اختصاص داده‌اند. در آبخیزهای دارای جنگل نیز آبخیز اترک با ۵۵/۴۲ و ۱۲۴۰/۸۴ میلیون ریال کم‌ترین و آبخیز هراز و قره‌سو با ۷۲۷۷/۶۰ و ۱۶۲۹۵۵/۷۱ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم را به خود اختصاص داده‌اند. به لحاظ هزینه‌های جایگزین نیز به‌طور متوسط آبخیز تالش-تالاب انزلی با ۲۳۴۱۱۴ و آبخیز کویر مرکزی با ۹۲۹۹۸۸۶ میلیون ریال کم‌ترین و بیش‌ترین هزینه را به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر این هزینه‌های جایگزین عناصر فسفر و پتاسیم در اراضی مرتعی ۶۰۳۱۹۵۱۳، در اراضی زراعی ۳۸۰۸۵۹۸ و در اراضی جنگلی ۵۵۷۸۸۲ میلیون ریال برآورد شد.

نتیجه‌گیری: همان‌طور که نتایج پژوهش نشان داد فقط هدررفت دو عنصر فسفر و پتاسیم می‌تواند خسارت‌های اقتصادی زیادی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم در حوزه‌های آبخیز اصلی کشور در پی داشته باشد. حال اینکه خاک غنی از سایر مواد مغذی، عناصر حیات و موجودات زنده است که هزینه‌های جایگزینی آن برای کشور غیرقابل جبران خواهد بود. لذا ضروری است در پژوهش‌های آتی خسارت ناشی از هدررفت سایر عناصر و همچنین میزان فرسایش بادی را برای درک بهتر خسارت وارده به کشور تحت تأثیر فرسایش مورد ارزیابی قرار داد. همچنین در برآورد ارزش نگهداری خاک با رویکرد هزینه جایگزین باید هزینه نیروی کار برای کودپاشی و هزینه بازسازی و نوسازی خسارت‌های ناشی از فرسایش خاک نیز در محاسبات منظور شود. بدیهی است با احتساب چنین مؤلفه‌هایی رقم‌های یادشده افزایش چشمگیری می‌یابند و ارزش منابع از لحاظ حفظ حاصلخیزی خاک را بیش از پیش محرز می‌نماید.

کلمات کلیدی: اقتصاد فرسایش، پایش فرسایش، مدیریت جامع آبخیز، هدررفت خاک، هدررفت عناصر غذایی.

استناد: چمنی، ر.، صادقی، س.ح.ر.، و بهلکه، م. (۱۴۰۴). کمی‌سازی اجمالی تعمیم‌یافته خسارت فرسایش خاک ناشی از هدررفت پتاسیم و فسفر در آبخیزهای رده دوم ایران. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۹۴-۱۱۲.

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 قابل دسترس است.

مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی در بخش کشاورزی تأمین پایدار مواد غذایی برای جمعیتی است که به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است و ناگزیر به افزایش قابل‌توجه تولید محصولات کشاورزی است. این در حالی است که از بین رفتن بوم‌سازگان، کاهش تنوع زیستی، فرسایش خاک، آلودگی منابع آبی و افزایش گازهای گلخانه‌ای از جمله تأثیرات منفی گسترش بی‌رویه تولیدات کشاورزی بر محیط‌زیست است (Huzenko & Kononenko, 2024). علاوه بر این، تخریب محیط‌زیست می‌تواند به ناپایداری تولیدات محصولات کشاورزی منجر شده و از این طریق بر درآمدهای کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد که این چالش به‌ویژه در کشورهای پیشگام در بخش کشاورزی نگران‌کننده است.

اگرچه بنابر نظر دانشمندان این افزایش تولید به‌تنهایی نمی‌تواند با توسعه منطقه‌ای کشاورزی در جهان انجام پذیرد، اما به‌طورعمده با افزون‌سازی تولید در منطقه‌های حاصلخیز و استفاده از خاک‌های با حاصلخیزی کمتر امکان‌پذیر است. این عمل برای کشورهای در حال توسعه به‌معنای افزایش کاربرد کود، افزایش تقاضای آب و به‌کارگیری آفت‌کش‌های شیمیایی است (Vasta *et al.*, 2024). در این راستا کودها یکی از اجزای ضروری در اراضی زراعی است که در صورت استفاده نامناسب از آن مسئله‌هایی نیز ایجاد خواهد شد (Yahaya *et al.*, 2023).

مصرف بی‌رویه کودها و سموم شیمیایی غلظت محلول خاک را تا حد زیادی افزایش می‌دهد که این افزایش باعث برهم خوردن تعادل عناصر غذایی می‌شود، این عدم تعادل جذب عناصر غذایی و املاح موجود در خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (FAO, 2018). در این راستا بررسی‌های مصرف کود در جهان روندی افزایشی دارد، به‌طوری‌که بنابر آمار، در سال ۲۰۱۶ کاربرد کودهای شیمیایی ۱۹۷/۵ میلیون تن در جهان بوده است (Cui *et al.*, 2021). مصرف کودهای شیمیایی در

ایران نیز از سال ۱۳۲۵ با واردات ۱۱ تن از انواع کودهای شیمیایی آغاز شد و از سال ۱۳۳۰ وزارت کشاورزی واردات کود به کشور را به عهده گرفت. در ابتدا، تعادل نسبتاً خوبی بین مصرف کودهای آلی و شیمیایی وجود داشت ولی این تعادل دوام چندانی نیافت، به‌طوری‌که از اواسط دهه پنجاه مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه مصرف کودهای ازته، فسفات و پتاسیمی بیش‌تر از بقیه کودها رایج شد (Karimian, 2012). مصرف کودهای شیمیایی در ایران هم‌چنان رو به افزایش است، به نحوی‌که میزان مصرف آن‌ها از ۲/۲ میلیون تن در سال ۱۳۷۸ به ۲/۷ میلیون تن در سال ۱۳۹۷ رسیده است (Anonymous, 2020). ناآگاهی از کاربرد بهینه کودهای شیمیایی به مصرف بیش‌ازحد و نادرست این کودها در کشاورزی ایران منجر شده که افزون بر تحمیل هزینه‌های سنگین، آلودگی محیط‌زیستی را نیز در پی داشته است (Atlasroody *et al.*, 2024). از سوی دیگر با تخریب محیط‌زیست و فرسایش خاک کشاورزان مجبور هستند جنگل‌ها و منابع طبیعی بیش‌تری را به کشت‌زار تبدیل کرده و سطح مصرف کودهای شیمیایی را افزایش دهند و این فعالیت‌ها موجب افزایش میزان فرسایش خاک می‌شود. فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیط‌زیستی در سراسر جهان است که باعث تخریب شدید زمین می‌شود و تهدیدی جدی برای سلامت و رفاه انسان به‌شمار می‌آید (Sadeghi *et al.*, 2021; Chamani *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). فرسایش خاک باعث از دست رفتن مواد مغذی مهم خاک مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و هم‌چنین رطوبت خاک شده و کاهش بهره‌وری خاک را در پی دارد. از این‌رو آگاهی از وضعیت فرسایش از ملزومات اتخاذ راهبردهای حفاظتی و مدیریتی برای مدیریت فرسایش است (Sadeghi & Najafi, 2014).

طبق برآوردهای صورت گرفته سالانه بیش از ۲۳ میلیارد تن خاک از طریق اراضی زراعی در سطح جهان از دسترس خارج می‌شود که به معنای هدررفت خاک موجود در جهان با نسبت هفت درصد در هر دهه است

بر فرسایش در ایران پرداختند. در این پژوهش برآوردی از تغییرات سالیانه عناصر خاک و ارزش آن با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت‌های صحرائی در عرصه خاک صورت گرفته است. یافته‌های پژوهش نشان داد که با افزایش شیب مزرعه و عمق خاک زراعی میزان کاهش سالیانه متغیرهای خاک به ترتیب افزایش و کاهش یافته و میزان افت سالیانه و ارزش عناصر خاک تحت مدیریت شخم عمود بر شیب بسیار کم‌تر از شخم موازی با شیب است. همچنین متوسط ارزش عناصر از خاک که در اثر فرسایش کاهش یافته برابر با ۱۷۴۵۱۱ ریال در هکتار برآورد شده که با در نظر گرفتن ارزش کودهای شیمیایی مورد استفاده برای بازگرداندن حاصلخیزی از دست‌رفته برابر با ۲۰۴۴۱۱ ریال در هکتار شده است. با توجه به یافته‌ها، تعیین برنامه کودی بر اساس مدیریت شخم، شیب، عمق و بافت اراضی زراعی، توجه به اثرات اقتصادی فرسایش در فقر خاک و به‌ویژه رطوبت در اراضی دیم و ترویج برنامه‌های حفاظت خاک حائز اهمیت است. Baraniyan Kabir و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی دیگر تأثیر اقتصادی تبدیل مراتع خوب و ضعیف به دیم‌زار از نظر کارکردهای حفظ خاک در بخشی از منطقه فریدون‌شهر اصفهان را بررسی نمودند. در این پژوهش از روش هزینه جایگزین^۲ برای برآورد ارزش اقتصادی کارکردهای حفظ خاک در هر کاربری بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که ارزش اقتصادی کارکرد حفظ خاک هر هکتار از مرتع خوب و ضعیف در مقایسه با دیم‌زار به ترتیب حداقل ۲۰/۳۸ و ۱۳/۱۹ میلیون ریال در سال بیش‌تر بوده است که معادل منفعت اقتصادی سالیانه عدم تبدیل هر هکتار مرتع است. Kakeh و همکاران (۲۰۱۶) نیز به ارزیابی کمی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف در بخشی از اراضی جنوب شرق قزوین پرداخته‌اند. در این پژوهش ۱۷ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در پنج کاربری باغ، مرتع،

(Nosrati & Jalali, 2016). همچنین فرسایش خاک در ایران از عوامل اصلی تهدیدکننده پایداری منابع و توسعه پایدار به‌شمار می‌رود (Sadeghi *et al.*, 2024)، به‌طوری‌که حدود ۳۶ درصد از زمین‌های زراعی و ۶۰ درصد از کل خاک‌های ایران در معرض خطر فرسایش قرار دارند (Heydarnejad *et al.*, 2020). در این راستا روش‌های زراعی متداول در جهان امروزه با اتکا بیش‌از‌حد به نهاده‌های مصنوعی و تزریق انرژی کمکی مانند کودها و سموم شیمیایی باعث ایجاد بوم‌سازگان‌های زراعی ناپایدار شده است (Cociu & Alionte, 2017). لذا برای تأمین غذای جمعیت در حال افزایش جهان، سامانه زراعی بایستی در آینده گسترده‌تر و پایدارتر شود. از طرفی دیگر بسیاری از خاک‌های زراعی مقدار کافی یک یا چند ماده مغذی ضروری گیاه را برای رشد بهینه نداشته و کشاورزان برای دست آوردن عملکرد بالاتر گیاهان زراعی به‌طور فزاینده‌ای به کودهای با منبع شیمیایی روی می‌آورند، اگرچه کودهای شیمیایی به رشد گیاه کمک شایانی می‌کنند، اما سبب بهبود شرایط خاک نمی‌شوند و استفاده مداوم از کودهای شیمیایی پرمصرف اثرات نامطلوبی بر منابع آب و خاک می‌گذارد (Atlasroody *et al.*, 2024). از این‌رو یکی از مواردی که در اکثر مطالعات مربوط به پایداری کشاورزی تأکید شده است، لزوم کاهش استفاده از کودهای شیمیایی است (Arslan *et al.*, 2017). زیرا استفاده از نهاده‌های شیمیایی و به‌خصوص کودهای شیمیایی به دلیل ایجاد فرسایش، سلامت خاک را به شدت تهدید کرده است (Zulfikar & Thapa, 2017) و به‌عبارتی دیگر موجب ورشکستگی خاک شده است. لذا تعیین ارزش اقتصادی خاک^۱ فرسایش یافته می‌تواند درک درستی از خسارت‌های وارد شده و ورشکستگی ایجادشده را نشان دهد. در این راستا Hosseini و Ghorbani (۲۰۰۵) به ارزیابی فقر مواد غذایی خاک به‌عنوان نگرشی اقتصادی

کردند. همان‌طور که ارزیابی‌های مختلف نشان می‌دهد تغییر کاربری اراضی و همچنین استفاده از کشاورزی فشرده اثرات منفی بر تولیدات زراعی، ارزش افزوده ناشی از آن و خسارت‌های اقتصادی داشته است. لذا جلوگیری از فرسایش خاک و حفظ مواد مغذی آن می‌تواند با حفظ، افزایش و پایداری تولیدات زراعی نقش مهمی در زندگی گروداران داشته باشد. همچنین در صورت تداوم روند فعلی فرسایش کشور و هدررفت خاک و کاهش توان تولید آن، ورشکستگی خاک در عرصه ملی را در پی خواهد داشت. ارزیابی پیامدهای ناشی از دخالت انسان در طبیعت و تأمین نیاز روزافزون انسان به دریافت خدمات متنوع، بیش‌ازپیش ارزیابی عملکرد آبخیزها را ضروری ساخته است (Sadeghi *et al.*, 2022). براین اساس در این پژوهش به کمی‌سازی اجزای خسارت فرسایش خاک و تعیین هزینه‌های ناشی از جایگزین خسارت‌های اقتصادی آن در آبخیزهای رده دوم کشور پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برآورد هزینه‌های فرسایش خاک به روش هزینه جایگزینی به‌طور کلی مصرف کود در جهان طی ۱۰ سال گذشته افزایش یافته است، به‌طوری‌که تقاضا برای کل کودها در سال ۲۰۰۸ به میزان ۱۶۱ میلیون تن بوده و در سال ۲۰۱۸ به بیش از ۲۰۰ میلیون تن رسیده است. در این بین میزان مصرف فسفر و پتاسیم نشان داده‌اند که پرمصرف‌ترین کودها در جایگزین کردن مواد مغذی از دست رفته هستند (Savari & Gharechae, 2020). از این‌رو مصرف این کودهای شیمیایی طی ۱۰ سال گذشته عموماً به‌منظور افزایش بهره‌وری محصولات زراعی افزایش یافته است (Pimentel & Burgess, 2013). لذا در این پژوهش از جایگزینی کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم به‌منظور تعیین هزینه‌های ناشی از فرسایش استفاده شده است. روش‌های مختلفی برای برآورد ارزش خاک استفاده می‌شود که در بیش‌تر موارد روش‌های هزینه مبنا

زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده را بررسی کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاربری‌های باغ و مرتع به‌ترتیب بیش‌ترین مقدار شاخص کیفیت خاک را به خود اختصاص می‌دهند اما کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده دارای کم‌ترین کیفیت خاک هستند و تفاوت محسوسی با دو کاربری باغ و مرتع دارند. نتایج پژوهش Davoudi Moghaddam و همکاران (۲۰۱۶) در کرت‌هایی با ابعاد استاندارد ۱/۸×۲۲/۱ متر در هر یک از آبخیزهای نمونه و شاهد، در سه دامنه شرقی، غربی و شمالی و با سه تکرار و در مقیاس رگبارهای طبیعی طی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ نشان داد که اختلاف هدررفت خاک، غلظت نیتروژن، غلظت پتاسیم و غلظت رسوب در آبخیزهای نمونه و شاهد معنی‌دار ($P < 0.05$) بوده، بدین صورت که مقادیر هدررفت خاک، غلظت نیتروژن، غلظت پتاسیم و غلظت رسوب در آبخیز شاهد به‌ترتیب ۱/۳۵ کیلوگرم، ۰/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۲۵۷/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۷/۹ گرم در لیتر و در آبخیز نمونه به‌ترتیب ۰/۱۷ کیلوگرم، ۰/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۴۰۲/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۴/۴۱ گرم در لیتر بود.

همچنین Keivan Behjou و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه حفاظت‌شده شیمبار در استان خوزستان ایران، به برآورد ارزش‌گذاری اقتصادی عناصر غذایی خاک پرداختند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، هر هکتار از جنگل‌های محدوده مطالعاتی می‌تواند با جلوگیری از فرسایش خاک و پیشگیری از نابودی تنها سه عنصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به میزان ۲۸۳۰۶۴۶۵ ریال از بروز خسارت جلوگیری کند. در پژوهشی دیگر Farsi و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی نقش بوم‌سازگان طبیعی منطقه کچیک در مهار فرسایش خاک و تعیین ارزش اقتصادی حفاظت خاک براساس کارکرد حفظ حاصلخیزی خاک پرداختند. نتایج این پژوهش، ارزش عناصر اصلی حفظ‌شده در خاک کل آبخیز را برابر ۹/۲۱ میلیارد ریال در سال و ارزش هر هکتار بوم‌سازگان منطقه کچیک را ۲/۵۵ میلیون ریال در سال برآورد

نتایج

مقادیر فرسایش و عناصر فسفر و پتاسیم در کاربری‌های مختلف ایران

مقادیر مختلف فرسایش و میزان فسفر و پتاسیم موجود در هر کیلوگرم خاک در حوزه‌های آبخیز مختلف و همچنین کاربری‌های مرتع، جنگل، اراضی زراعی و باغ بر اساس مطالعات پیشین انجام شده گردآوری و در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود اراضی جنگلی، زراعی و مراتع به ترتیب ۶/۴۰، ۹/۰۸ و ۹/۲۲ تن بر هکتار به‌طور متوسط فرسایش را دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مراتع و اراضی بایر بیش‌ترین میزان فرسایش را نسبت به اراضی زراعی و جنگلی به خود اختصاص داده‌اند. در اراضی زراعی، جنگلی و مراتع متوسط (میانگین حسابی) میزان پتاسیم به ترتیب ۱۲/۴۵، ۱۶/۳۰ و ۱۵/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و فسفر نیز ۳۰/۱۲۶، ۳۶۴/۹۸ و ۳۲۵/۹۶ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شد. براین اساس اراضی جنگلی بیش‌ترین میزان سطح فسفر و پتاسیم را به خود اختصاص داده‌اند. آخرین نقشه کاربری کشور نیز در شکل ۱ و بر مبنای آبخیزهای رده دوم ایران نمایش داده شده است.

در پژوهش فعلی، میزان هدررفت مواد غذایی اصلی خاک به صورت غیرمستقیم و بر مبنای میزان فرسایش خاک در کاربری‌های اصلی کشور بر اساس مطالعات انجام‌شده و ابزارهای دورسنجی و در مقیاس آبخیزهای رده دوم کشور برای ایجاد شرایط مدیریت کلان منابع زیستی و غیرزیستی حوزه‌های آبخیز برآورد شد. برای تعیین نقشه کاربری ایران از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای سال ۲۰۲۳، استفاده شد.

هستند. از بین این روش‌ها، روش‌های هزینه جایگزین، هزینه فرصت از دست‌رفته^۱ و هزینه خسارت اجتناب‌شده^۲ از جمله روش‌هایی است که در ارزش‌گذاری خاک و کارکردهای آن بیش‌تر بکار می‌رود، در این پژوهش از روش هزینه جایگزین استفاده شده است. در این روش، محاسبه هزینه یک آسیب خاص و همچنین برآورد آن با استفاده از هزینه معادل یا جایگزینی است. به‌عنوان مثال اگر خطر فرسایش خاک در مزرعه برآورد شود، لازم است که از دست رفتن مواد مغذی ناشی از فرسایش محاسبه شده و با استفاده از هزینه معادل یعنی هزینه بازسازی خاک و با توجه به اقدامات زیر در آن جایگزین شود. این روش شامل الف) برآورد میانگین خاک از دست‌رفته در هر هکتار، ب) برآورد کاهش مواد مغذی قابل جبران خاک، ج) ارزش‌گذاری مواد از دست رفته مغذی خاک در هر هکتار با در نظر گرفتن هزینه حاصلخیزی جایگزین در بازار (عمدتاً کاهش عناصر غذایی اصلی فسفر و پتاسیم) است. بر همین اساس، جمع کل هدررفت مواد غذایی از رابطه (۱) برآورد می‌شود.

$$An = DnP + DnK \quad (1)$$

که در آن، An جمع کل هدررفت مواد غذایی، DnP و DnK به ترتیب میزان هدررفت فسفر و پتاسیم است. با در نظر گرفتن قیمت کودهای جانشین برای جبران عناصر از دست رفته خاک، ارزش اقتصادی عناصر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$V = PKDK + PPDP \quad (2)$$

که در آن، PK و PP به ترتیب قیمت کودهای جانشین برای عناصر فسفر و پتاسیم و V ارزش اقتصادی کل عناصر به ریال است (Garshasbi et al., 2012). در این پژوهش قیمت هر کیلوگرم کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم براساس گزارش‌های موجود در سازمان‌های جهاد کشاورزی در سال ۱۴۰۳ حدود ۱۳۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شد.

جدول ۱- میزان فسفر، پتاسیم و فرسایش در کاربری‌های مختلف اراضی کشور

Table 1- The amount of phosphorus, potassium and erosion in different land-uses of Iran

میزان فرسایش (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	پتاسیم (mg kg ⁻¹)	فسفر (mg kg ⁻¹)	کاربری غالب	آبخیز/مکان	استان	نویسندگان
2.83	356.00	2.10	زراعی	بوکان	آذربایجان غربی	Miran <i>et al.</i> , (2020)
2.80	471.00	4.70	زراعی	مهاباد	آذربایجان غربی	Miran <i>et al.</i> , (2020)
14.17	470.00	9.49	مرتع	مغان	اردبیل	Keyvan Behjo & Firouzi Asl, (2018)
1.73	192.00	17.7	زراعی	روستای اسفرجان	اصفهان	Yahyaabadi <i>et al.</i> , (2021)
4.87	195.00	14.00	زراعی	مبارکه	اصفهان	Nasiri Dehsorkhi <i>et al.</i> , (2024)
4.73	276.80	13.97	زراعی	کاشان	اصفهان	Arab-Niasar <i>et al.</i> , (2023)
6.00	381.00	27.00	جنگل	دالاب	ایلام	Karami <i>et al.</i> , (2023)
-	316.00	7.20	زراعی	مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام	ایلام	Naseri <i>et al.</i> , (2020)
-	214.00	6.20	زراعی	ایستگاه مرکز تحقیقات کشاورزی سرابله	ایلام	Naseri <i>et al.</i> , (2020)
12.63	275.00	1.70	زراعی	مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی	تهران	Mohammadi <i>et al.</i> , (2020)
7.80	250.50	13.50	مرتع	حوزه بهشت‌آباد	چهارمحال و بختیاری	Ziaei Jazzi & Zare Bidaki, (2019)
6.80	475.30	14.90	جنگل	سبزکوه	چهارمحال و بختیاری	Bakhtiari <i>et al.</i> (2009)
-	402.90	15.00	مرتع	کاخک	خراسان رضوی	Davoudi Moghaddam <i>et al.</i> (2016)
-	230.00	5.90	زراعی	جلگه نیشابور	خراسان رضوی	Taheri <i>et al.</i> (2024)
-	180.00	16.60	زراعی	دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد	خراسان رضوی	Soltanian <i>et al.</i> (2021)
-	300.00	16.60	زراعی	مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بجنورد	خراسان شمالی	Rahimizadeh (2020)
-	559.10	3.70	جنگل	شیمبار	خوزستان	Behjou <i>et al.</i> (2016)
-	182.00	12.00	زراعی	آزمایشگاه شرکت کشت و صنعت نیشکر	خوزستان	Ranjbar <i>et al.</i> (2022)
6.99	340.00	10.00	مرتع	تهم	زنجان	Yeganeh <i>et al.</i> (2016)
-	239.00	2.40	زراعی	دانشگاه زنجان	زنجان	Piri Moghadam & Vaezi, (2020)
-	256.40	14.80	زراعی	مزرعه پژوهشی دانشگاه زابل	سیستان و بلوچستان	SoltanZadeh <i>et al.</i> (2022)
-	129.00	34.90	مرتع	کازرون	فارس	Bahrami <i>et al.</i> (2023)
17.55	331.00	13.20	زراعی	دشت آبیک	قزوین-البرز	Mousavi <i>et al.</i> (2022)
19.40	527.00	5.10	زراعی	سقز	کردستان	Miran <i>et al.</i> (2020)
21.00	494.00	6.80	زراعی	عرب اوغلو	کردستان	Miran <i>et al.</i> (2020)
-	181.00	10.00	زراعی	مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی	کرمان	Heidari <i>et al.</i> (2022)
6.00	549.00	10.20	زراعی	اسلام‌آباد غرب	کرمانشاه	Behrouzi <i>et al.</i> (2022)
6.30	400.00	1.44	زراعی	پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی	کرمانشاه	Safari <i>et al.</i> (2022)

ادامه جدول ۱- میزان فسفر، پتاسیم و فرسایش در کاربری‌های مختلف اراضی کشور

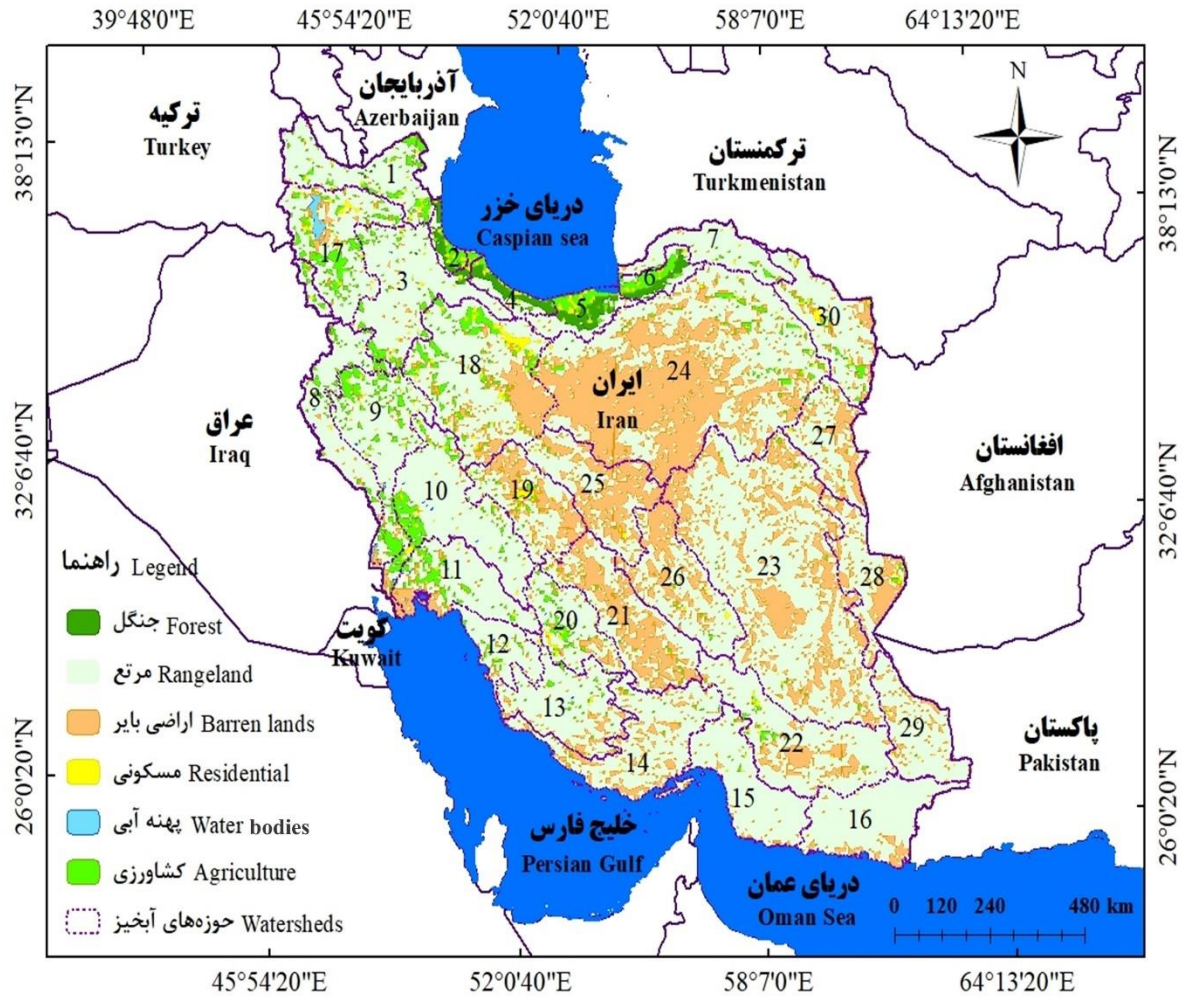
Table 1 Continued- The amount of phosphorus, potassium and erosion in different land-uses of Iran

میزان فرسایش (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	پتاسیم (mg kg ⁻¹)	فسفر (mg kg ⁻¹)	کاربری غالب	آبخیز/مکان	استان	نویسندگان
-	342.00	2.7	زراعی	نقاط مختلف استان	کهگیلویه و بویر احمد	Kasraian & Fazli, (2023)
7.94	310.00	3.50	مرتع	کچیک	گلستان	Farsi et al. (2021)
-	202.00	71.90	زراعی	باغ‌های چای	گیلان	Shirinfekr et al. (2023)
-	79.80	12.80	زراعی	گروه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه گیلان	گیلان	Bagheri et al. (2023)
-	238.19	14.55	جنگل	سراوان	گیلان	Yaghmaeian Mahabadi et al. (2017)
-	194.33	9.59	جنگل	لاهیجان	گیلان	Mojadadi et al. (2013)
-	403.30	24.00	تبدیل به مرتع	جنگل‌های خزری	مازندران	Mobarghaei, (2011)
-	137.26	5.66	زراعی	مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری	مازندران	Alizadehgan et al. (2022)
-	342	28.10	جنگل	خیروود	مازندران	Samdaliri et al. (2021)
-	302.00	14.30	مرتع	سیرمند	هرمزگان	Bahrami et al. (2023)

هزینه‌های جایگزین فرسایش

در جدول ۲ هزینه‌های جایگزین ناشی از فرسایش بر اساس عناصر پتاسیم و فسفر در آبخیزهای رده دوم کشور ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آبخیز تالش-تالاب انزلی به ترتیب با ۲۹۴۳/۹۰ و ۶۱۵۹۱/۴۰ میلیون ریال کم‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم و آبخیز کویر مرکزی به ترتیب با ۴۱۳۱۸۸/۷۹ و ۸۶۴۴۶۰۹/۷۳ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم در کاربری مراتع را دارند. در کاربری زراعی نیز آبخیز بلوچستان جنوبی با به ترتیب ۴۱/۰۸ و ۹۹۴/۰۲ میلیون ریال کم‌ترین و دریاچه نمک با به ترتیب ۴۸۴۱۹/۶۴ و ۴۴۵۳۱۰/۹۳ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم را به خود اختصاص داده‌اند. در آبخیزهای دارای جنگل نیز آبخیز اترک به ترتیب با ۵۵/۴۲ و ۱۲۴۰/۸۴ میلیون ریال کم‌ترین و آبخیز هراز و قره‌سو با به ترتیب ۷۲۷۷/۶۰ و ۱۶۲۹۵۵/۷۱ میلیون ریال بیش‌ترین هزینه جایگزینی فسفر و پتاسیم را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به شکل ۲ به‌طور متوسط نیز آبخیز تالش-تالاب انزلی با ۲۳۴۱۱۴ و آبخیز کویر مرکزی با

۹۲۹۹۸۸۶ میلیون ریال کم‌ترین و بیش‌ترین هزینه را به خود اختصاص داده‌اند. در این راستا میزان بارش‌های فصلی و نوع پوشش در اقلیم‌های مدیترانه‌ای (Langbein & Schumm, 1958; Gobin et al., 2003) نیز در میزان فرسایش بسیار حائز اهمیت است به‌گونه‌ای که بیش‌ترین میزان بارش در زمانی اتفاق می‌افتد که کم‌ترین میزان پوشش گیاهی بر سطح خاک وجود دارد. این در حالی است که با توجه به میزان حداکثری بارش در مناطق مرطوب، درصد پوشش گیاهی در این مناطق بیش‌تر از ۵۰ درصد بوده و این موضوع خطر رخداد فرسایش را کم می‌کند. در مقابل در اقلیم‌های خشک با سطح خاک عمدتاً خالی از پوشش گیاهی، میزان هدررفت خاک بالاست. مناطق مرکزی با رژیم بارندگی مدیترانه‌ای به علت ضعیف بودن پوشش گیاهی، بارندگی‌های رگباری در این زیرآبخیزها منجر به ایجاد سیلاب و فرسایش شدید خاک می‌شود (Arabkhedri, 2014) و میزان خسارت فرسایش خاک زیرآبخیزهای واقع در این مناطق نیز نسبت به مناطق دیگر بیش‌تر برآورد شده است.



شکل ۱- پراکنش کاربری اراضی در آبخیزهای رده دوم کشور

Figure 1- Distribution of land-use in the second-order watersheds of Iran

اختصاص بخش زیادی از مساحت کشور به اراضی مرتعی، به‌طور یقین، مدیریت این بخش می‌تواند نقش مؤثری در حفظ عناصر و صرفه‌جویی در هزینه‌های احیایی داشته باشد. در این راستا چرای بی‌رویه و کاهش پوشش گیاهی یکی از عوامل مؤثر در تخریب مراتع بیان شده است (Li, 2024).

بحث

ارزیابی هزینه‌های ناشی از فرسایش خاک بر اساس عنصر پتاسیم و فسفر حاکی از آن است که اراضی مرتعی و بایر، اراضی زراعی و اراضی جنگلی به‌ترتیب بیش‌ترین میزان هزینه جایگزین را دارند. باتوجه به

جدول ۲- هزینه‌های پتاسیم و فسفر فرسایش یافته در کاربری‌های مختلف اصلی و آبخیزهای رده دوم کشور

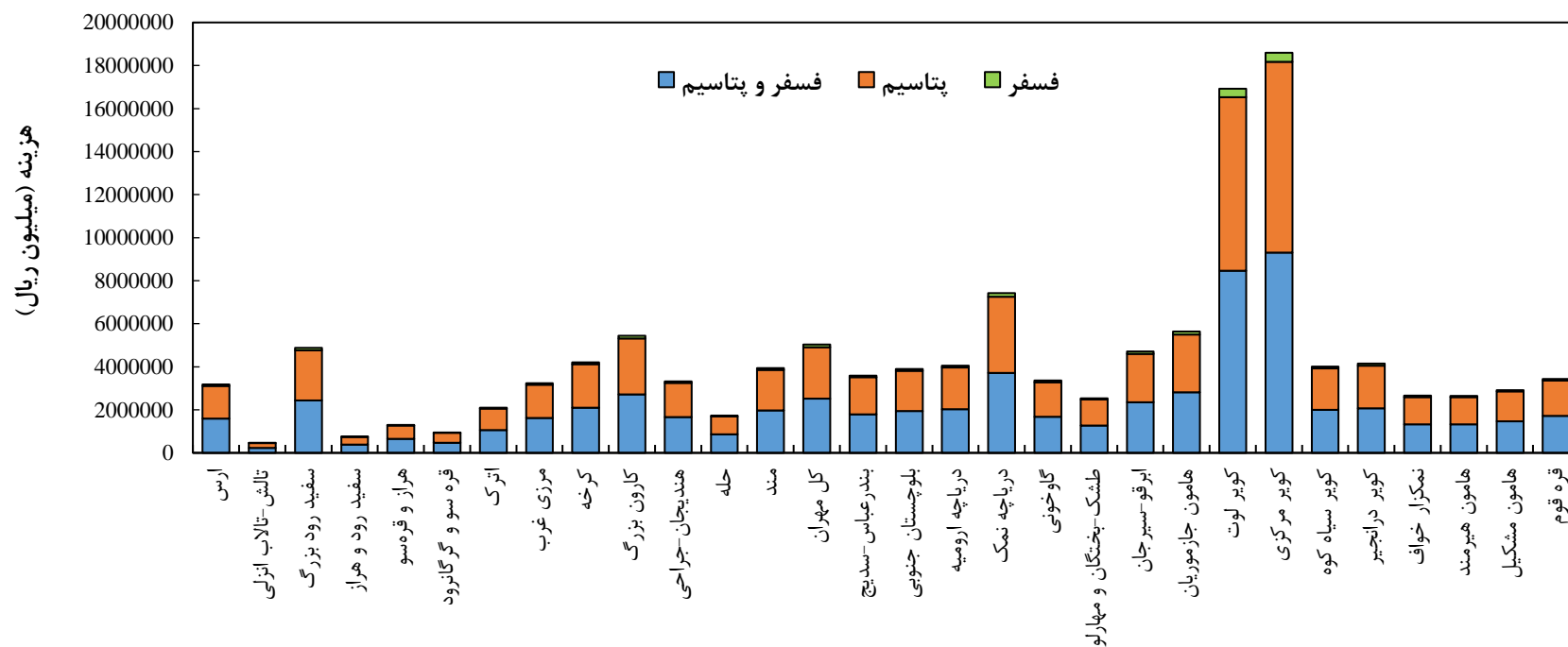
Table 2- Costs of eroded potassium and phosphorus in different main land-uses and second-order watersheds of Iran

کد	حوزه آبخیز/کاربری	مساحت-هکتار			هزینه هدررفت فسفر-میلیون ریال			هزینه هدررفت پتاسیم-میلیون ریال		
		جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع	جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع	جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع
1	ارس	24436.16	691945.85	3246469.69	331.39	10168.82	60625.19	7420.37	246061.00	1268381.61
2	تالش- تالاب انزلی	288459.06	210833.14	157645.48	3911.97	3098.40	2943.90	87594.45	74973.80	61591.40
3	سفیدرود بزرگ	104195.62	622832.95	5321726.19	1413.06	9153.14	99378.92	31640.39	221483.95	2079175.30
4	رودخانه‌های بین سفیدرود و هراز	479326.94	110922.09	454649.37	6500.44	1630.11	8490.21	145554.03	39444.70	177629.54
5	هراز و قره‌سو	536632.75	411324.35	797233.15	7277.60	6044.81	14887.68	162955.71	146269.94	311475.53
6	قره‌سو و گرگانرود	338499.55	468338.18	477478.51	4590.60	6882.69	8916.52	102789.91	166544.48	186548.78
7	اترک	4086.24	126892.62	2453956.28	55.42	1864.81	45825.64	1240.84	45123.94	958750.06
8	مرزی غرب	13638.92	478138.39	3513216.23	184.97	7026.71	65606.46	4141.64	170029.50	1372598.32
9	کرخه	0.00	1197662.34	4058260.06	0.00	17600.82	75784.71	0.00	425897.48	1585544.58
10	کارون بزرگ	4447.75	923054.24	5803993.73	60.32	13565.19	108384.87	1350.62	328244.83	2267595.14
11	هندیجان - جراحی	0.00	549764.76	3559569.77	0.00	8079.33	66472.08	0.00	195500.36	1390708.45
12	حله	0.00	140290.47	1984375.86	0.00	2061.71	37056.61	0.00	49888.32	775287.03
13	مند	0.00	162073.46	4663861.19	0.00	2381.83	87093.82	0.00	57634.51	1822150.31
14	کل مهران	0.00	87284.27	6062971.67	0.00	1282.73	113221.07	0.00	31038.92	2368776.69
15	بندرعباس - سدیج	0.00	42094.27	4350922.47	0.00	618.62	81249.94	0.00	14969.03	1699886.51
16	بلوچستان جنوبی	0.00	2795.27	4754786.26	0.00	41.08	88791.77	0.00	994.02	1857674.34
17	دریاچه ارومیه	0.00	1035860.00	4012350.20	0.00	15222.98	74927.38	0.00	368359.38	1567607.79
18	دریاچه نمک	0.00	1253379.58	7932682.61	0.00	18419.64	148136.41	0.00	445710.93	3099264.64
19	گاوخونی	0.00	186837.08	3934788.18	0.00	2745.75	73478.97	0.00	66440.63	1537304.65
20	طشک - بختگان و مهارلو	0.00	398788.16	2729621.05	0.00	5860.58	50973.46	0.00	141811.98	1066451.09
21	ابرکو - سیرجان	0.00	94512.48	5669119.89	0.00	1388.95	105866.21	0.00	33609.33	2214900.51
22	هامون - جازموریان	0.00	165090.08	6731942.74	0.00	2426.16	125713.56	0.00	58707.24	2630140.79
23	کویر لوت	0.00	79367.76	20593075.31	0.00	1166.39	384558.96	0.00	28223.76	8045625.07
24	کویر مرکزی	3215.70	650998.70	22126198.73	43.61	9567.06	413188.79	976.49	231499.89	8644609.73
25	کویر سیاه کوه	0.00	26659.01	4879135.68	0.00	391.78	91113.90	0.00	9480.14	1906257.11
26	کویر درانجیر	0.00	65011.32	5004319.80	0.00	955.41	93451.61	0.00	23118.50	1955166.01
27	نمکزار خواف	0.00	55289.08	3193662.86	0.00	812.53	59639.06	0.00	19661.20	1247750.21
28	هامون - هیرمند	0.00	45302.18	3198706.05	0.00	665.76	59733.24	0.00	16109.79	1249720.56

ادامه جدول ۲- هزینه‌های پتاسیم و فسفر فرسایش یافته در کاربری‌های مختلف اصلی و آبخیزهای رده دوم کشور

Table 2 Continued- Costs of eroded potassium and phosphorus in different main land-uses and second-order watersheds of Iran

کد	حوزه آبخیز/کاربری	مساحت-هکتار			هزینه هدررفت فسفر-میلیون ریال			هزینه هدررفت پتاسیم-میلیون ریال		
		جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع	جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع	جنگل	کشاورزی	اراضی بایر و مرتع
29	هامون - مشکیل	0.00	2982.37	3564914.27	0.00	43.83	66571.88	1060.55	1392796.52	
30	قره قوم	0.00	302532.5 2	3927072.95	0.00	4446.01	73334.90	107582.78	1534290.34	



شکل ۲- جمع کل هزینه‌های فسفر، پتاسیم و پتاسیم و فسفر (میلیون ریال)

Figure 2- Total of phosphorus, potassium and potassium and phosphorus costs (million Rials)

۰/۸ تا ۳/۶ درصد استفاده از کودهای شیمیایی افزایش خواهد یافت اما کاهش بازدهی شش تا ۱۳ درصد در تولیدات زراعی اتفاق خواهد افتاد. لذا کشاورزان ترجیح خواهند داد بجای استفاده از کود برای افزایش تولید، سطح زمین زیرکشت را گسترش دهند (Brunelle *et al.*, 2015) که تخریب خاک و فرسایش تشدید می‌شود. در این راستا (FAO, 1995) نیز نسبت به اهمیت هدررفت عناصر غذایی خاک هشدار داده است و اعلام کرده است به‌طور متوسط، سالانه ۳۶۰۰ دلار در اثر هدررفت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به هر کشاورز خسارت وارد می‌شود. از این رو آگاهی از وضعیت فرسایش در حوزه‌های آبخیز از ملزومات اتخاذ راهبردهای حفاظتی و مدیریتی برای مدیریت فرسایش است. در مناطق جنگلی نیز هدررفت عناصر و هزینه‌های ناشی از آن قابل توجه است. قرارگیری ایران در اقلیم مدیترانه‌ای نیز سبب شده است تا در بخش‌های مختلف ایران فرسایش با شدت‌های مختلف رخ دهد. علاوه بر تغییرات مختلف کاربری اراضی، افزایش شدت بارندگی در برخی مناطق از جمله جنگل‌ها احتمال فرسایش خاک را افزایش می‌دهد (Nikkami *et al.*, 2013; Arabkhedri, 2014). از طرفی دیگر جاده‌های جنگلی نیز تأثیر قابل توجهی بر رسوب‌دهی و فرآیندهای انتقال رسوب دارند که به‌طور جدی ایمنی و پایداری آبخیز را مختل می‌کند (Yu *et al.*, 2024a, b). وجود جمعیت پستانداران گیاه‌خوار نامتعارف در جنگل‌ها و چرای بی‌رویه نیز سبب تشدید میزان فرسایش در مناطق جنگلی شده است (Abe *et al.*, 2024). لذا مدیریت نامناسب زمین سبب تخریب و کاهش کیفیت زمین شده است (Islami *et al.*, 2024). مدیریت جنگل‌ها به روش‌های مختلف از جمله احیا جنگل‌های از بین رفته و یا تجویز آتش‌سوزی کنترل شده با هدف تأمین موارد غذایی می‌تواند از بروز مشکلات تشدید هدررفت مواد غذایی ناشی از فرسایش جلوگیری کند. با این وجود، آتش‌سوزی تجویزی ممکن است در برخی موارد منجر

مطالعات Ammour و همکاران (۲۰۰۰) در زمینه حفظ حاصلخیزی خاک توسط بوم‌سازگان‌های مرتعی و تأثیر پوشش گیاهی بر کنترل فرسایش خاک بر این موضوع تأکید دارد. پژوهش Zhao و همکاران (۲۰۰۷) نیز حاکی از آن بوده است که با افزایش پوشش گیاهی می‌توان از فرسایش جلوگیری کرد و از دست رفتن مواد مغذی را تا حد زیادی کاهش داد. همچنین فرسایش خاک در مزارع زراعی با کاهش عناصر غذایی، افزایش رواناب و کاهش دسترسی به آب برای گیاهان بهره‌وری پایدار کشاورزی است. بر این اساس در صورت عدم کنترل فرسایش تأثیر نامناسبی بر تولیدات کشاورزی خواهد گذاشت (Nasir Ahmad *et al.*, 2024). به عبارتی تولید محصول می‌تواند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گیرد و در برخی موارد با ریزش کامل محصول مواجه شود (Quinton & Fiener, 2024). علاوه بر این، انتظار می‌رود افزایش درآمد جهانی و رشد جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باعث افزایش تقاضا برای غذا شود در نتیجه، پیشگیری و کاهش فرسایش خاک به‌عنوان عوامل حیاتی در تضمین امنیت غذایی آینده شناسایی شده است (Xiong & Leng, 2024). از طرفی بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2015)، پیش‌بینی می‌شود که نیاز به خوراک، فیبر و غذا در نتیجه روندهای جمعیتی فعلی و رشد جمعیت پیش‌بینی شده جهان تا ۶۰ درصد افزایش یابد (Nasir Ahmad *et al.*, 2024). بر این اساس کاهش تولیدات زراعی و بهره‌وری آن سبب شده است تا همزمان با افزایش جمعیت، استفاده از کودهای شیمیایی در راستای افزایش تولید و جایگزینی مواد غذایی از دست رفته خاک رونق بگیرد (Sinha *et al.*, 2022). همچنین افزایش هر ساله قیمت کود سبب افزایش هزینه‌های تولید می‌شود که این امر در درازمدت کاهش بازدهی اراضی زراعی به دلیل عدم صرفه اقتصادی را در پی دارد به‌طوری‌که تا سال ۲۰۵۰ حدود

زراعت و جنگل بر کشور تحمیل می‌کند که جبران آن در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نخواهد بود. اگرچه استفاده از نهاده‌های شیمیایی در کشاورزی برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده برای غذا در جهان اجتناب‌ناپذیر است. لذا پرداخت یارانه‌های کشاورزی منجر به تغییر ایده کشاورزان در استفاده از کودهای شیمیایی خواهد شد و استفاده از آن را کاهش داده و آموزش فن‌های زراعی را بهبود می‌بخشد. شایان ذکر است در برآورد ارزش نگهداری خاک با رویکرد هزینه جایگزین باید هزینه نیروی کار برای کودپاشی و هزینه بازسازی و نوسازی خسارت‌های ناشی از فرسایش خاک نیز در محاسبات منظور شود. بدیهی است با احتساب چنین مؤلفه‌هایی رقم‌های یادشده افزایش چشمگیری می‌یابند و ارزش منابع از لحاظ حفظ حاصلخیزی خاک را بیش از پیش محرز می‌نماید. براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان استفاده از افزودنی‌های آلی حاصل از بقایای موجودات گیاهی و جانوری شامل کاه و گلش و بقایای پوشش گیاهی، کمپوست، کود حیوانی، کود سبز، لجن فاضلاب، فاضلاب کارخانه کاغذ، زغال‌زیستی، زغال‌سنگ نارس و خاکستر (Sadeghi *et al.*, 2016a,b) به سبب سازگاری با محیط‌زیست، صرفه اقتصادی، حفظ توان تولید در درازمدت و جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست و ایجاد شرایط پایدار در بوم‌سازگان، استفاده از کشاورزی سبز با توجه به تقاضای فزاینده برای غذای سالم و ایمن و پایداری طولانی‌مدت، کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی با کودهای زیستی با هدف بهبود رشد گیاه و درنهایت حصول بیش‌ترین عملکرد گیاه، اجرای خاک‌ورزی حفاظتی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک با هدف بهبود جذب عناصر پرمصرف و افزایش بهره‌وری این عناصر و نهایتاً آموزش و توجیه کشاورزان در ارتباط با اثرات سوء مصرف زیاد کودهای شیمیایی پرمصرف و آموزش عملیات کشت محصول سالم توصیه می‌شود. همچنین با توجه به مشکلات موجود و منتج از فرسایش خاک، استفاده بهینه از منابع زیستی و

به افزایش رواناب سطحی و فرسایش خاک شود که نیاز به دقت و پایش بیش‌تر دارد (Zema *et al.*, 2024; Elliot, 2024)؛ بنابراین، فعالیت‌های احیای جنگل پتانسیل زیادی برای به حداقل رساندن فرسایش خاک و کمک به پشتیبانی از عملکرد و ارائه خدمات بوم‌سازگان دارد (Eshetu *et al.*, 2024). شایان ذکر است در این پژوهش از مقادیر متوسط پتاسیم و فسفر و میزان فرسایش در حوزه‌های آبخیز مختلف ایران استفاده شده است که تفاوت موجود میان رقم‌های برآورد شده در هر پژوهش ممکن است از یک‌سو ناشی از تفاوت در روش‌ها و زمان انجام محاسبات و از سوی دیگر مربوط به ماهیت بوم‌سازگان‌ها باشد. همچنین در برخی منابع، میانگین فرسایش آبی در کشور بسیار بیش‌تر ارائه شده است که دلیل آن به مبنای آماری استفاده‌شده در مطالعات موردی برمی‌گردد که در برخی موارد در حوزه‌های آبخیز با مساحت کم‌تر از ۵۰ هزار هکتار انجام شده است. حوزه‌های آبخیز با مساحت کم، بیش‌تر کوهستانی هستند و توپوگرافی شدیدتری دارند و در نتیجه میانگین فرسایش آبی در آن‌ها بیش‌تر است. با توجه به موارد ذکر شده ضرورت مطالعات جامع‌تر در رابطه با کمی‌سازی خسارت فرسایش خاک در ایران وجود دارد.

نتیجه‌گیری

فرسایش خاک از جمله دغدغه‌های بشر در طول سالیان متمادی بوده است که در طی زمان بر اهمیت آن افزوده شده است. لذا در این پژوهش سعی شده است هزینه‌های جایگزین ناشی از هدررفت خاک مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس پس از جمع‌آوری مقادیر فرسایش، فسفر و پتاسیم در آبخیزهای مختلف کشور در کاربرهای مختلف، با روش هزینه-جایگزین اقدام به برآورد خسارت‌های اقتصادی ناشی از فرسایش شده است. ارزیابی کمی اجمالی و برآورد هزینه جایگزین مواد غذایی ازدست‌رفته خاک در ایران بیان‌گر آن است میزان فسفر و پتاسیم مورد ارزیابی در این پژوهش خسارت‌های هنگفتی را در کاربری‌های مختلف مرتع،

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله حاضر بر خود لازم دانسته از جهادکشاورزی آراین‌شهر خراسان جنوبی به سبب همکاری در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی کنند.

غیرزیستی آبخیز برای حرکت به سوی امنیت غذایی پایدار تأکید می‌شود.

References

- Abe, H., Kume, T., Hyodo, F., Oyamada, M., & Katayama, A. (2024). Soil erosion under forest hampers beech growth: Impacts of understory vegetation degradation by sika deer. *Catena*, 234, 107559. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107559>
- Alizadehgan, F., Gholami, M. A., & Shiukhy Soqanloo, S. (2022). Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Mize Yield (Single Cross 704). *Water and Soil*, 36(4), 511-524. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77424.1178> (In Persian)
- Ammour, T., Windevoxhel, N., & Sencion, G. (2000). Economic valuation of mangrove ecosystems and subtropical forests in Central America. In: M. Dore and R. Guevara (Eds), Sustainable forest management and global climate change. *Cheltenham, Edward Elgar*, 166- 197. <https://doi.org/10.4337/9781781952740>
- Anonymous. (2020). State of Fertilizer Consumption in Iran. *Final Report*. (In Persian)
- Arabkhedri, M. A. (2014). Review on Major Water Erosion Factors in Iran. *Land Management*, 2(1), 17-26. (In Persian)
- Arab-Niasar, L., Mirzakhani, M., & Nozad Namin, K. (2023). Effect of Organic and Biological Fertilizers on Nitrogen Use Efficiency, Phosphorus Content and Protein Yield of White Bean (*Phaseolus vulgaris* L). *Field Crop Science*, 54(4), 165-175. <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2023.357590.654997> (In Persian)
- Arslan, A., Belotti, F., & Lipper, L. (2017). Smallholder productivity and weather shocks: Adoption and impact of widely promoted agricultural practices in Tanzania. *Food Policy*, 69, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.03.005>
- Atlasroody, A., Kazemeini, S. A., Bahrani, M. J., & Sepehri, M. (2024). Interaction effect of chemical and bio-fertilizers and deficit irrigation on yield and yield components of sweet corn (*Zea mays* L. Var *saccharata*) and some soil biological activity indices. *Interaction*, 15(4), 723-738. <https://doi.org/10.22067/agry.2022.73850.1082>
- Bagheri, F., Baharlouei, J., Chavoshi, E., & Khalili, B. (2023). Investigation of azolla compost, azolla biochar and rice husk biochar, on the improvement of some soil chemical properties. *Soil Management and Sustainable Production*, 13(4), 29-52. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2024.20276.2064> (In Persian)
- Bahrani, A., Yavari, A., & Raheb, A. (2023). Variation in physico-chemical properties of soil in different natural habitats of rangeland medicinal species: *Salvia macrosiphon* boiss. *Environmental Erosion Research*, 13(4), 130-152. <https://doi.org/10.61186/jeer.13.4.130> (In Persian)
- Bakhtiari, F., Panahi, P., Karami, M., Ghodduzi, J., Mashayekhi, Z., & Pourzadi, M. (2009). Economic valuation of soil nutrients retention function of Sabzkouh forests. *Forest*, 1(1), 69-81. (In Persian)
- Baraniyan Kabir, A., Mousavi, S. A., Bashari, H., Mesdaghi, M. R., & Basiri, M. (2016). Economic consequences of rangeland-use change to dryland from water and soil conservation functions. *Applied Ecology*, 6(2), 27-40. (In Persian)
- Behjou, F. K., Hashemian, A., Panahi, M., & Hassanzadeh, E. (2016). Economic valuation of soil nutrients in shimbars forest protected area using replacement cost. *Environmental Sciences*, 14(1), 137-146. (In Persian)
- Behrouzi, D., Diyanat, M., Majidi, E., Mirhadi,

- M. J., & Shirkhani, A. (2022). Effect of deficit irrigation, fertilizers and vermicompost on forage maize (*Zea mays* L). *Crops Improvement*, 24 (4), 1069-1084.
<http://doi.org/10.22059/jci.2021.328509.2594> (In Persian)
- Brunelle, T., Dumas, P., Souty, F., Dorin, B., & Nadaud, F. (2015). Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. *Agricultural Economics*, 46(5), 653-666.
<https://doi.org/10.1111/agec.12161>
- Chamani, R., Mostafaei Younjali, S., & Sadeghi, S. H. (2023). Role of biological measures in soil erosion processes using invest model in the Sharghong Watershed, South Khorasan, Iran. *Water and Soil Resources Conservation*, 13(2), 95-108.
<https://doi.org/10.30495/WSRCJ.2023.73563.11380> (In Persian)
- Cociu, A. I., & Alionte, E. (2017). Effect of different tillage systems on grain yield and its quality of winter wheat, maize and soybean under different weather conditions. *Romanian Agricultural Research*, 34, 59-67.
- Cui, X., Guo, L., Li, C., Liu, M., Wu, G., & Jiang, G. (2021). The total biomass nitrogen reservoir and its potential of replacing chemical fertilizers in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110215>
- Davoudi Moghaddam, D., Sadeghi, S. H. R., & Azamy Rad, M. (2016). Comparison of surface runoff generation, and soil and nutrient loss in Kakhk treated and representative watersheds, Khorasan Razavi Province. *Water and Soil*, 30(3), 920-929. (In Persian)
- Demir, S., & Dursun, İ. (2024). Assessment of pre-and post-fire erosion using the RUSLE equation in a watershed affected by the forest fire on Google Earth Engine: the study of Manavgat River Basin. *Natural Hazards*, 120(3), 2499-2527.
<https://doi.org/10.1007/s11069-02306291-5>
- Elliot, W. J. (2024). Runoff and erosion following a prescribed fire on a sagebrush-steppe rangeland in Idaho, USA. *ASABE*.
<https://doi.org/10.13031/ja.15738>
- Eshetu, S. B., Kipkulei, H. K., Koepke, J., Kächele, H., Sieber, S., & Löhr, K. (2024). Impact of forest landscape restoration in combating soil erosion in the Lake Abaya catchment, Southern Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), 228.
<https://doi.org/10.1007/s10661-02412378-8>
- FAO. (1995). Agricultural investment to promote improved capture and use of rainfall in dry land farming. *FAO Investment Center Technical paper*, No.10, Rome.
- FAO., IFAD., UNICEF., WFP., & WHO. (2018). The state of food security and nutrition in the world 2018. Building resilience for peace and food security. *Rome*, FAO.
- Farsi, R., Yeganeh, H., Hosseinalizadeh, M., & Azimi, M. (2021). Estimating the economic value of the role of vegetation in controlling soil erosion (Case Study: Kechik Watershed). *Water and Soil Conservation*, 27(6), 137-152.
<https://doi.org/10.22069/JWSC.2020.17633331> (In Persian)
- Garshasbi, P. Rajab Nejad, S., & Khani, Sh. (2012). Investigating the role of opportunity value of land in revitalizing watersheds. *Abkhizdari*, 1(1), 19-26. (In Persian)
- Ghorbani, M., & Hosseini, S. S. (2005). Poverty of soil nutrition: An economic views on erosion in Iran. *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 12(1), 147-157.
- Gobin, A., Jones, R., Kirkby, M., & Kosmas, C. (2003). Assessment and reporting on soil erosion, background and workshop report. *European Environmental Agency, Printed in Denmark*, 100 pp.
- Heidari, S., Sarhadi, J., & Sharif, M. (2022). Effects of integrated NPK and manure fertilizers on some quantitative and qualitative characteristics of henna (*Lawsonia inermis* L) in Southern Kerman province. *Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38(4), 532-544.
<https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.358968.3182> (In Persian)
- Heydarnejad, S., Ranjbar Fordoei, A., Mousavi, S. H., & Mirzaei, R. (2020). Estimation of soil erosion using SLEMSA model and OWA approach in Lorestan Province (Iran). *Environmental Resources Research*, 8(1), 11-24.
<https://doi.org/10.22069/ijerr.2020.5089>

- (In Persian)
- Huzenko, M., & Kononenko, S. (2024). Sustainable agriculture: impact on public health and sustainable development. *Health Economics and Management Review*, 5(2), 125-150. <https://doi.org/10.61093/hem.2024.2-08>
- Islami, J. D., Pulungan, N. A. H. J., & Sartohadi, J. (2024). Arrangement of agricultural reservoir along rill erosion: case study in the sumbing volcanic landscape, Java, Indonesia. *Air, Soil and Water Research*, 17, 11786221241261158. <https://doi.org/10.1177/11786221241261158>
- Kakeh, J., Gorji, M., & Alimohammadi, A. (2016). Quantitative soil quality assessment in different land-uses at some Parts of south eastern of Qazvin. *Soil and Water Research*, 47(4), 775-784. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2016.59984> (In Persian)
- Karami, F., Karamshahi, A., Modaberi, A., Mahdavi, A., & Hanareh Khalyani, J. (2023). Estimating the economic value of the preservation and maintenance functions of soil nutrients in Zagros forest ecosystem (case study: Dalab Ilam region). *Renewable Natural Resources Research*, 14(1), 141-150. (In Persian)
- Karimian, N. (2012). Fertilizer research in Iran: A glance at the past, a guide for the future. *Soil Research*, 25(4), 265-278. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2012.126491> (In Persian)
- Kasraian, A., & Fazli, N. (2023). Evaluation of extract percentage and vegetative growth of marigold (*Calendula officinalis*) in nitrogen, phosphorus and potassium treatments. *Soil Management and Sustainable Production*, 13(2), 115-129. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2023.20388.2068> (In Persian)
- Keivan Behjou, F., Hashemian, A., Panahi, M., & Hassanzadeh, E. (2016). Economic valuation of soil nutrients in shimbars forest protected area using replacement cost. *Environmental Sciences*, 14(1), 137-146. (In Persian)
- Keyvan Behjou, F., & Firouzi Asl, M. (2018). Economic evaluation of rangeland ecosystems for preserving important soil nutrients in Moghan rangelands. *Jurnal of Rangeland*, 11(4), 499-510. (In Persian)
- Langbein, W.B., & Schumm, S.A. (1958). Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions, American Geophysical Union*, 39: 1076-1084. <https://doi.org/10.1029/TR039i006p01076>
- Li, L. (2024). Semi-automated detection of rangeland runoff and erosion control berms using high-resolution topography data. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(1), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.05.004>
- Miran, N., Rasouli-Sadaghiani, M., Feiziasl, V., Sepehr, E., Rahmati, M., & Mirzaei, S. (2020). The performance of nutrient index value (NIV) in evaluation of dryland fertility. *Applied Soil Research*, 9(1), 57-71. (In Persian)
- Mobarghaei, N. (2011). Estimating the value of conservation function of soil nutrient in forest ecosystems. *Environmental Researches*, 1(2), 3-12. (In Persian)
- Mohammadi, M., Pirdashti, H., Tahmasebi-Sarvestani, Z., & Zand, B. (2020). Effect of different irrigation regime, chemical, and biological fertilizers, on fatty acids content and oil yield of evening primrose (*Oenothera Biennis* L.). *Field Crop Science*, 50(4), 155-173. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.257318.654520> (In Persian)
- Mojadadi, H., Moradmand, J. A., Smailpour, S., & Bahmanyar, M. A. (2013). The effects of land-use change of forests on chemical properties of soil. 1-6.
- Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2022). Application of Machine Learning Models in Spatial Estimation of Soil Phosphorus and Potassium in Some Parts of Abyek Plain. *Soil Research*, 35(4), 397-411. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2022.355198.618> (In Persian)
- Naseri, R., Baray, M., Zarea, M. J., Khavazi, K., & Tahmasebi, Z. (2020). Accumulation of nutrient elements on root, straw and soil in dryland wheat as affected by phosphate solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi. *Applied Soil Research*, 7(4), 179-195. (In Persian)
- Nasir Ahmad, N. S. B., Mustafa, F. B., & Muhammad Yusoff, S. Y. (2024). Spatial prediction of soil erosion risk using knowledge-driven method in Malaysia's

- Steepland Agriculture Forested Valley. *Environment. Development and Sustainability*, 26(6), 15333-15359. <https://doi.org/10.1007/s10668-023032518>
- Nasiri Dehsorkhi, A., Ghanbari, A., & Asgharipour, M. R. (2024). Spatial relationship between soil properties and wheat grain yield under the conditions of competition with wild barley (*Hordeum spontaneum* Koch) using geostatistical method. *Crop Sciences*, 25(3), 233-257. (In Persian)
- Nikkami, D. M., Arabkhedri, A., Sarreshtedari, L., & Dadmarz, L. (2013). Investigation and determination of the most appropriate erosivity index in different regions of Iran. Final report of the research project. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, 120. (In Persian)
- Niknahad Gharmakher, H., & Maramaei, M. (2011). Effects of land-use changes on soil properties (Case Study: the Kechik catchment). *Soil Manage*, 1(2), 81-96. (In Persian)
- Nosrati, K., & Jalali, S. (2016). Investigating the amount of suspended sediment production in the Ziyarat watershed of Gorgan in different seasons using the technique of sediment origin. *Ecohydrology*, 4(3), 887-895. (In Persian)
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), 443-463. <https://doi.org/10.3390/agriculture3030443>
- Piri Moghadam, L., & Vaezi, A. (2020). Nitrogen and phosphorous loss as affected by plough direction in rainfed wheat land of a semi-arid region. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23(4), 69-82. (In Persian)
- Quinton, J. N., & Fiener, P. (2024). Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 48(1), 136-161. <https://doi.org/10.1177/0309133323121>
- Rahimizadeh, M. (2020). The assessment of weed competition effect on growth and yield of cotton with use chemical and biological fertilizers. *Crops Improvement*, 22(2), 245-255. <https://doi.org/10.22059/jci.2020.284772>
- 2238 (In Persian)
- Ranjbar, M., Sadegh-Zadeh, F., Emadi, M., Sepanlou, M. G., & Dashliboroun, A. A. (2022). The effects of biochar types application on the concentration of silicon and some essential nutrients in the soil with silty clay loam texture. *Soil Management and Sustainable Production*, 12(2), 87-105. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2022.19279.2028>
- Sadeghi, S. H. R., & Najafi, S. (2014). Source ascription for fluvial sediment in watersheds (concepts, methods and technologies). *Jihad Daneshgahi*, P. 256. (In Persian)
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Kiani Harchegani, M. (2016a). Controllability of Runoff and Soil Loss from Small Plots Treated by Biochar Produced from Vinasse. *Science of the Total Environment*, 541, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.068>
- Sadeghi, S. H. R., Hazbavi, Z., Younesi, H. A., & Bahramifar, N., (2016b). Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues, *Catena*, 142, 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.013>
- Sadeghi, S. H., Hasanpour, F., Payfeshoordeh, A., Tavakoli, F., Esmail Zadeh, F., Abdulbaghi, F., Rashidi, N., Mousavian, S., Beigi, H., Bahlekeh, M., & Chamani, R. (2024). 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., Jafarpour, A., Farajolahi, M., Khatibi Roodbarsara, D., Moradi Sefidcheghayi, M., Zabihi Silabi, M., Khosravi, M., Kolani, E., Mohammadi, B., Adibi, M.J., & Azarniya, H. (2021). Biological Management of Soil Erosion (Case Study: Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran). *Water and Soil*, 35(4), 551-566. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.70989.1060> (In Persian)

- Sadeghi, S. H., 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)
- Safari, A., Fatemi, A., Saiedi, M., & Kolahchi, Z. (2022). Effect of drought stress on water use efficiency of grapevines (*Vitis vinifera* L.) cultivar 'Bidaneh Ghermrz' under different fertilizer treatments. *Plant Research (Biology)*, 35(4), 836-847. (In Persian)
- Samarinas, N., Tsakiridis, N. L., Kalopesa, E., & Zalidis, G. C. (2024). Soil loss estimation by water erosion in agricultural areas introducing artificial intelligence geospatial layers into the RUSLE model. *Land*, 13(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land13020174>
- Samdaliri, H., Jourgholami, M., Salajegheh, A., Abdi, E., & Kooch, Y. (2021). The effect of forest fires on the dynamics of some soil physical, chemical and biological characteristics over time. *Forest*, 13(2), 129-140. <https://doi.org/10.22034/IJF.2021.136935> (In Persian)
- Savari, M., & Gharechae, H. (2020). Application of the extended theory of planned behavior to predict Iranian farmers' intention for safe use of chemical fertilizers. *Cleaner Production*, 263, 121512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121512>
- Shirinfekr, A., Oustan, S., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2023). Investigating the relationship between soil acidity and some quality characteristics of tea green leaves in tea plantations of Gilan province. *Soil Research*, 37(3), 259-276. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2023.36352.1.724> (In Persian)
- Sinha, E., Calvin, K. V., Kyle, P. G., Hejazi, M. I., Waldhoff, S. T., Huang, M., & Zhang, X. (2022). Implication of imposing fertilizer limitations on energy, agriculture, and land systems. *Environmental Management*, 305, 114391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114391>
- Soltanian, B., Moghaddam, P. R., & Asili, J. (2021). The effect of water stress, chemical and organic fertilizers on biomass, seed yield and root phenolic compounds of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.). *Horticultural Science*, 34(4), 593-603. (In Persian)
- SoltanZadeh, A., Ghanbari, A., & Seyedabadi, E. (2022). Effect of chemical fertilizers and vermicompost on the field soil properties and nutrient concentrations of quinoa seed (Red cultivar) in Sistan region. *Crop Science Research in Arid Regions*, 4(1), 77-86. <https://doi.org/10.22034/csrar.2022.320562.1170> (In Persian)
- Taheri, M. A. R., Astaraei, A. R., & Emami, H. (2024). The effect of compost obtained from the contents of sheep rumen and humic acid on some physical, chemical, and biological properties of soil and yield of turnip plant (*Brassica rapa*). *Crop Science Research in Arid Regions*, 5(3), 619-633. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.360317.1272> (In Persian)
- Tashakkori, F., Mohammadi Torkashvand, A., Ahmadi, A., & Esfandiari, M. (2021). Prediction of Saffron Yield based on Soil properties Using Regression and Artificial Neural Networks Models in the Vamenan Region of Golestan Province. *Saffron Agronomy and Technology*, 9(2), 159-175. <https://doi.org/10.22048/jsat.2020.240519.1404> (In Persian)
- Vasta, 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*. <https://doi.org/10.1108/CAER-08-2023-0208>
- Wang, L., Li, Y., Gan, Y., Zhao, L., Qin, W., & Ding, L. (2024). Rainfall erosivity index for monitoring global soil erosion. *Catena*, 234, 107593. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107593>
- Xiong, M., & Leng, G. (2024). Global soil water erosion responses to climate and land-use changes. *Catena*, 241, 108043. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108043>

- 043
Yaghmaeian Mahabadi, N., Khosroabadi, M., & Asadi, H. (2017). Effect of forest clearing and topography on some soil physicochemical properties effective on soil quality in Saravan region, Guilan. *Soil Research*, 31(2), 277-290. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2017.113112> (In Persian)
- Yahaya, S. M., Mahmud, A. A., Abdullahi, M., & Haruna, A. (2023). Recent advances in the chemistry of nitrogen, phosphorus and potassium as fertilizers in soil: a review. *Pedosphere*, 33(3), 385-406. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.012>
- Yahyaabadi, M., Hamidian, A. H., & Ashrafi, S. (2021). Adsorption of elements in earthworms affected by chemical fertilizers in orchard Soil. *Animal Environment*, 13(1), 439-448. (In Persian)
- Yeganeh, H., Azarnivand, H., Saleh, A., Arzani, H., & Amirnejad, H. (2016). Estimating the economic value of soil conservation function (Case Study: Tham Zanjan). *Range and Desert Research*, 23 (1), 161-176. (In Persian)
- Yu, J., Zhao, Q., Yu, Z., Liu, Y., & Ding, S. (2024b). A Review of the Sediment Production and Transport Processes of Forest Road Erosion. *Forests*, 15(3), 454. <https://doi.org/10.3390/f15030454>
- Yu, Z., Zhao, Q., Liu, Y., Yu, J., Wang, A., & Ding, S. (2024a). Soil erosion associated with roads—A global review and statistical analysis. *Land Degradation & Development*, 35(11), 3509-3522. <https://doi.org/10.1002/ldr.5159>
- Zema, D. A., Parhizkar, M., Plaza-Alvarez, P. A., Xu, X., & Lucas-Borja, M. E. (2024). Using random forest and multiple-regression models to predict changes in surface runoff and soil erosion after prescribed fire. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1), 1215-1228. <https://doi.org/10.1007/s40808-02301838-8>
- Zhao, Y., Peth, S., Krummelbein, J., Horn, R., Wang, Z., Steffens, M., Hoffmann, C., & Peng, X. (2007). Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecological Modeling*, 205, 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.019>
- Ziaei Jazzi, D., & Zare Bidaki, R. (2019). Determination of economic loss of soil erosion in different land-uses (Case study: Beheshtakad watershed basin in Chaharmahal and Bakhtiari province). *Range and Watershed Managment*, 72(1): 151-165. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.263499.1288> (In Persian)
- 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>

Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam)

Nargess Pordel^{1*}, Jaafar Hosseinzadeh¹, Mehdi Heydari¹, Reza Omidipour²

1. Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

2. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

* Corresponding author: nargess.po@gmail.com

(Received: 11 November 2024

Revised: 09 December 2021

Accepted: 26 December 2024)

Extended Abstract

Introduction: The Zagros forests, as one of Iran's most important forest ecosystems, play a crucial role in preserving water resources, carbon storage, and biodiversity. Soil moisture in these forests is vital for ecosystem stability, groundwater recharge, vegetation growth, and erosion control. However, accurately measuring soil moisture across this vast and challenging terrain is difficult due to its extent, inaccessibility, and high costs. Consequently, advanced interpolation methods like Kriging have become essential for creating soil moisture maps and managing environmental resources. Nevertheless, selecting the optimal Kriging method under varying topographic and climatic conditions remains a research challenge that requires further investigation.

Materials and Methods: This study involved collecting 60 soil samples from depths of 0 to 15 cm across different forest zones with varying canopy densities (open and closed), in both northern and southern aspects, and at three elevation classes (1750-1850 m, 1850-1950 m, and 1950-2050 m) within the Zagros forests. Various Kriging methods, including Ordinary Kriging, Simple Kriging, and Universal Kriging, were utilized to estimate and map soil moisture distribution across the region. The primary objective of employing these three Kriging methods was to compare and determine the most accurate approach, aiming to achieve precise soil moisture distribution estimates based on limited sampling data and to minimize estimation error. Model accuracy was evaluated using statistical metrics, including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Coefficient of Determination (R^2). In this evaluation, models with lower RMSE values were considered more accurate for estimating soil moisture spatial distribution.

Results and Discussion: The results indicated that slope aspect and canopy density significantly influenced soil moisture content ($P < 0.05$). The highest soil moisture content, approximately 12.46%, was observed in areas with closed canopy and northern slopes, which was significantly greater than that in open canopy areas and southern slopes, suggesting the protective effect of closed canopies in retaining soil moisture. Furthermore, comparison of interpolation models revealed that Simple Kriging with a linear variogram had the best performance on northern slopes, achieving the lowest RMSE value (0.79), indicating the effectiveness of this model in conditions where soil moisture distribution exhibits a linear dependency on spatial location. Conversely, on southern slopes, Ordinary Kriging with an exponential variogram provided higher accuracy, with an RMSE value of 0.44. This finding suggests that in conditions with greater moisture complexity and nonlinear variation, employing an exponential variogram and Ordinary Kriging can yield improved interpolation results.

Conclusion: This study strongly emphasizes the critical importance of selecting the correct variogram models and interpolation techniques, which are specifically suited to the unique characteristics and features of a given region. The results clearly demonstrate that employing a single, fixed interpolation method across all areas does not necessarily yield the most optimal results. The choice of the appropriate interpolation method can have a significant impact on improving the accuracy of soil moisture predictions and estimations. For example, in areas with more uniform variations and relatively stable conditions, simple Kriging with a linear variogram proves to perform better, while in regions with more rapid and significant changes over shorter distances, ordinary Kriging with an exponential variogram results in higher accuracy and better performance. Therefore, it is highly recommended that researchers take into account a combination of various optimal interpolation methods, carefully considering the climatic, topographical, and vegetation characteristics of the region. This methodical approach can greatly assist in reducing estimation errors, improving the precision and reliability of soil moisture maps, and ultimately enhancing the management and preservation of natural resources and forest ecosystems. Additionally, this study underscores the importance of conducting a thorough and precise analysis, along with the careful selection of suitable statistical methods, in order to achieve more accurate predictions of soil moisture conditions, which play an essential role in sustainable natural resource management and environmental conservation, particularly in forested and ecologically sensitive regions.

Keywords: Soil, Geostatistics, Remote Sensing, GIS, Variogram

Citation: Pordel, N., Hosseinzadeh, J., Heydari, M., & Omidipour, R. (2025). Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 5(2), 113-128. doi= 10.22034/iwm.2024.2045354.1185

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>).



ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام)

نرگس پردل^{۱*}، جعفر حسین‌زاده^۱، مهدی حیدری^۱، رضا امیدپور^۲

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

*نویسنده مسئول: nargess.po@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

چکیده مبسوط

مقدمه: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، نقش حیاتی در حفظ منابع آبی، کربن و تنوع زیستی دارند. رطوبت خاک در این جنگل‌ها برای پایداری اکوسیستم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، افزایش پوشش گیاهی و کنترل فرسایش خاک اهمیت زیادی دارد؛ اما اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک در این منطقه به دلیل وسعت، دشواری دسترسی و هزینه بالا چالش‌برانگیز است. در نتیجه، روش‌های پیشرفته درون‌یابی، مانند کریجینگ، برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک و مدیریت منابع زیست‌محیطی اهمیت زیادی یافته‌اند. با این حال، انتخاب نوع بهینه روش کریجینگ در شرایط مختلف توپوگرافی و اقلیمی همچنان چالشی پژوهشی است که نیاز به بررسی بیشتری دارد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۶۰ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری در مناطق مختلف با تراکم تاج‌پوشش متفاوت (باز و بسته) و در دو جهت شمالی و جنوبی و سه طبقه ارتفاعی (۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر، ۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر و ۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر) از جنگل‌های زاگرس جمع‌آوری شد. برای تخمین و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی رطوبت خاک، از روش‌های مختلف کریجینگ شامل کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و کریجینگ عمومی استفاده شد. هدف اصلی از به‌کارگیری این سه روش، مقایسه و تعیین بهترین روش و دستیابی به تخمین‌های دقیق‌تری از توزیع رطوبت خاک با استفاده از داده‌های محدود نمونه‌برداری و کاهش خطای تخمین بود. ارزیابی دقت مدل‌ها از طریق معیارهای آماری مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R^2) صورت گرفت. در این ارزیابی، مدل با مقدار RMSE کمتر، به عنوان مدل دقیق‌تر در تخمین توزیع مکانی رطوبت خاک در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بر رطوبت وزنی خاک تأثیرگذار هستند. بیشترین میزان رطوبت وزنی خاک (حدود ۱۲/۴۶ درصد) در مناطق با تاج‌پوشش بسته و دامنه‌های شمالی مشاهده شد، که به‌طور چشمگیری بیشتر از مناطق با تاج‌پوشش باز و دامنه‌های جنوبی بود. این مسئله نشان‌دهنده اثر حفاظتی تاج‌پوشش بسته در حفظ رطوبت خاک است. همچنین، مقایسه مدل‌های درون‌یابی نشان داد که در دامنه‌های شمالی، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی بهترین عملکرد را داشت و کمترین مقدار RMSE (معادل ۰/۷۹) را به دست آورد، که نشان‌دهنده کارایی این مدل در شرایطی با وابستگی خطی توزیع رطوبت به موقعیت مکانی است. از سوی دیگر، در دامنه‌های جنوبی، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی با مقدار RMSE برابر با ۰/۴۴ دقت بالاتری ارائه داد که بیانگر آن است که در شرایطی که توزیع رطوبت پیچیدگی بیشتری دارد و به صورت غیرخطی تغییر می‌کند، استفاده از واریوگرام نمایی و کریجینگ معمولی می‌تواند نتایج بهتری در درون‌یابی فراهم کند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش بر اهمیت انتخاب صحیح مدل‌های واریوگرام و تکنیک‌های درون‌یابی متناسب با ویژگی‌های خاص منطقه‌ای تأکید دارد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از یک روش ثابت درون‌یابی در تمامی مناطق لزوماً به نتایج بهینه منجر نخواهد شد. انتخاب روش مناسب می‌تواند تفاوت قابل توجهی در دقت پیش‌بینی رطوبت خاک ایجاد کند. به‌عنوان مثال، در مناطقی با تغییرات یکنواخت‌تر، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی عملکرد بهتری دارد، در حالی که در مناطق با تغییرات سریع‌تر و در فواصل کوتاه‌تر، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی دقت بیشتری نشان می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که محققان با توجه به ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه، از ترکیب روش‌های مختلف و بهینه درون‌یابی استفاده کنند. این رویکرد می‌تواند به کاهش خطاهای تخمینی، افزایش دقت نقشه‌های رطوبت خاک و در نهایت به بهبود مدیریت منابع طبیعی و اکوسیستم‌های جنگلی کمک کند. علاوه بر این، این مطالعه بر اهمیت تحلیل دقیق و انتخاب روش‌های آماری مناسب برای پیش‌بینی دقیق‌تر وضعیت رطوبت خاک تأکید دارد که به ویژه در مدیریت پایدار منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست در مناطق جنگلی نقش حیاتی دارند.

کلیدواژه: خاک، زمین‌آمار، سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، واریوگرام

استناد: پردل، ن.، حسین‌زاده، ج.، حیدری، م. و امیدپور، ر. (۱۴۰۴). ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۱۱۳-۱۲۸.

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

جنگل‌های زاگرس در غرب ایران، یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور و منطقه محسوب می‌شوند و نقشی اساسی در حفاظت از منابع آبی، ذخیره‌سازی کربن، تأمین منابع چوب و حفظ تنوع زیستی دارند (Moradi & Shabanian, 2023). جنگل و خاک یک رابطه دوسویه و پیچیده، گسترده و ناگسستنی دارند. خاک، محیط مناسبی برای ریشه‌های درختان است و از طریق جذب آب و عناصر غذایی، به رشد درختان کمک می‌کند. همچنین، نقش مهمی در حفظ تعادل اکوسیستم، کارکردها و ساختار اکوسیستم‌های خشکی از قبیل جنگل دارد. در جنگل‌ها نیز درختان با ایجاد سایه، تبخیر آب را کاهش داده و باعث حفظ رطوبت در خاک می‌شوند (Goebes et al., 2019). رطوبت خاک از اهمیت بنیادی در رشته‌های علمی مختلف از جمله هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی برخوردار است (Wang et al., 2012). این ویژگی مهم خاک به شکل مستقیم و غیرمستقیم بر تعداد و نوع گونه‌های گیاهی، ضریب خشکسالی و حتی بهره‌وری اقتصادی جنگل و محصولات آن اثر می‌گذارد. همچنین، این پارامتر می‌تواند بر کیفیت خاک، فراوانی حشرات و شیوع بیماری‌های گیاهی، ساختار جنگل، تراکم پوشش گیاهی، تنوع پوشش گیاهی، کارکردهای اکوسیستم و حتی شرایط آب و هوایی هر منطقه تأثیر بگذارد (Yu et al., 2018). بنابراین بررسی و اندازه‌گیری رطوبت خاک حائز اهمیت است، اما این اندازه‌گیری و تکرار مداوم آن به دلیل گستردگی مناطق، عموماً بسیار زمان‌بر بوده و نیازمند صرف هزینه بسیار زیادی است. به همین دلیل استفاده از روش‌های سریع و قابل اطمینان در تهیه نقشه رطوبت خاک از اهمیت بالایی در مدیریت جنگل برخوردار است (Jamei et al., 2017).

بطور کلی، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند. به طور معمول تخمین رطوبت خاک و

استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد که این رویه، پرهزینه، زمان‌بر و در مواردی غیر عملی در سطوح بزرگ، مناطق صعب‌العبور و کوهستانی است و تنها بیانگر وضعیت بخش محدودی از خاک می‌باشد (Famiglietti et al., 2008). در این راستا، بکارگیری سنجش از دور و ابزارهای فراهم شده توسط این تکنولوژی، کمک شایانی به حل و ساده‌سازی بسیاری از مشکلات مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی کرده است (Jamei et al., 2017). استفاده از داده‌های سنجش از راه دور، یک روش مهم و پرکاربرد در علوم محیط‌زیستی است و کاربردهای مختلفی دارد. با استفاده از داده‌های سنجش از دور، می‌توان رطوبت جنگل‌ها را در طول زمان و در مناطق گسترده‌ای از جنگل‌ها اندازه‌گیری کرد. این روش به شکلی که قبلاً امکان پذیر نبوده است، با دقت بیشتر و با هزینه کمتری صورت می‌گیرد (Hosseinqolizadeh et al., 2020). در این میان GIS یکی از به‌روزترین فنونی است که با بکارگیری فناوری روز نقش عمده‌ای در بهینه‌سازی بهره‌گیری از منابع دارد و یک محیط مناسب برای استخراج، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات رقومی فراهم کرده است (Premsudha et al., 2024). در سیستم‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اطلاعات مختلف یک ناحیه به صورت لایه‌بندی شده در یک بانک اطلاعات ذخیره می‌شود. بزرگترین مزیتی که این سیستم دارد این است که می‌تواند لایه‌های اطلاعاتی را به منظور کاربردهای مختلف روی هم قرار دهد و یا هرگونه تحلیل دیگری را به صورت توابع رابطه‌ای بین لایه‌ها، روی آنها انجام دهد (Ghaisvandi, 2013; Akmal, 2024). علاوه بر این، GIS به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آبی نیز استفاده می‌شود و قابلیت تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی با دقت بالا را دارد (Khatami & Khazaei, 2014).

این سیستم در زمینه‌های مختلف در مدیریت و برنامه‌ریزی، مطالعات، تحقیقات و امور اجرایی کاربردهای فراوانی دارد (Tu et al., 2023). تحقیقات

استفاده از روش‌های مختلف کریجینگ را برای افزایش دقت پیش‌بینی‌های محیطی، به‌ویژه در برآورد رطوبت خاک، تایید می‌کند.

در محیط GIS، روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد. با توجه به پیچیدگی و ناشناخته بودن تغییرات مکانی داده‌ها، از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها کریجینگ است که می‌تواند دقت درون‌یابی را بهبود بخشد و به دلیل عدم وجود خطای سیستماتیک و حداقل واریانس در تخمین‌ها، کاربرد ویژه‌ای در درون‌یابی دارد (Ghorbani *et al.*, 2018). روش کریجینگ شامل انواع مختلفی مانند کریجینگ معمولی، ساده، عمومی و رگرسیونی است که هر یک برای شرایط خاصی به کار می‌روند و در پیش‌بینی متغیرهای محیطی تاثیرگذارند. این متغیرها می‌توانند دقت پیش‌بینی روش‌های درون‌یابی را به‌ویژه در نواحی با تنوع توپوگرافی و پیچیدگی زیاد، بهبود دهند (Denkovski *et al.*, 2012). با این حال، به تفاوت این روش‌ها و همچنین تاثیر شرایط محیطی بر کارایی آن‌ها کمتر پرداخته شده است (Brus & Heuvelink, 2007).

با توجه به وقوع خشکسالی‌های مکرر در ایران، به‌ویژه در مناطق غربی کشور و اهمیت جنگل‌های زاگرس در حفاظت از منابع آب و خاک، رطوبت خاک به‌عنوان یکی از عوامل اساسی محیط‌زیست که بر زندگی گیاهی، جانوری و میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر مستقیم دارد (Heshmati *et al.*, 2020) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آگاهی از میزان رطوبت خاک، توزیع مکانی و تغییرات زمانی آن در مطالعات آب‌شناسی، علوم خاک، محیط‌زیست، هواشناسی و همچنین در آبیاری و زهکشی، به منظور بهبود کارایی مصرف آب، حائز اهمیت می‌باشد (Pan *et al.*, 2012). در این راستا، هدف این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف کریجینگ (معمولی، عام و ساده) در برآورد

انجام‌شده در زمینه پایش و ارزیابی مدل‌های کریجینگ نشان می‌دهد که این روش در پیش‌بینی دقیق‌تر داده‌های محیطی در شرایط مختلف مؤثر بوده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط Heydari و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و معکوس فاصله وزنی (IDW) برای بررسی پراکنش خصوصیات خاک و تنوع گیاهی در جنگل‌های بلوط ایلام استفاده گردید. نتایج نشان داد که این روش‌ها دقت بالایی در برآورد متغیرهای مختلف خاک و تنوع گیاهی دارند. همچنین، Rafiei و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای از روش‌های کریجینگ و رگرسیون-کریجینگ برای برآورد درصد رطوبت اشباع خاک در اراضی زراعی استان گلستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون-کریجینگ دقت بالاتری در تخمین رطوبت اشباع نسبت به روش کریجینگ ساده داشته است. Yao و همکاران (۲۰۱۳) نیز در بررسی خود نشان دادند که در زمین‌های پیچیده، کریجینگ ساده و روش وزن‌دهی معکوس به دلیل عدم همبستگی فضایی قوی، عملکرد ضعیفی دارند، اما ترکیب کریجینگ با رگرسیون توانسته است دقت پیش‌بینی را بهبود بخشیده و نقشه‌سازی دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین، Zhang و همکاران (۲۰۱۷) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی مانند شاخص پوشش گیاهی، ترکیب الگوریتم کریجینگ سنتی با داده‌های طیفی را ممکن ساختند و دقت نقشه‌سازی رطوبت خاک را افزایش دادند. علاوه بر این، Han و Suh (۲۰۲۴) نشان دادند که ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین و کریجینگ (RF-OK) برای پیش‌بینی پراکنش رطوبت خاک و آلودگی‌های خاک، دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تکی نشان داده و با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده و مقایسه نتایج، به کاهش خطاهای پیش‌بینی کمک کرده است. این مطالعات اهمیت

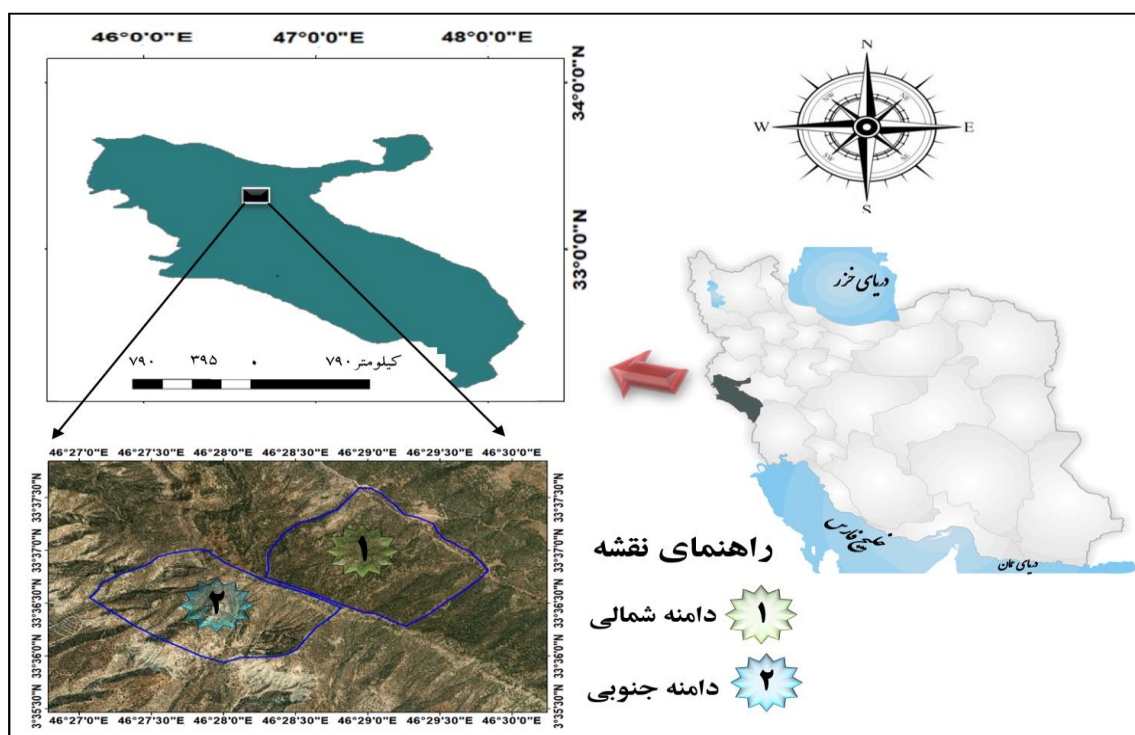
۱). گونه غالب درختی این منطقه، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) با دو فرم شاخه‌زاد و دانه‌زاد است و سایر گونه‌های درختی و درختچه‌ای مانند زالزالک، کیکم و بنه نیز در ترکیب آن مشاهده می‌شوند. علاوه بر گیاهان چوبی، سطح زمین نیز با گیاهان علفی یکساله و چندساله (گراس و فورب) پوشیده شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۵۰۰ تا ۲۱۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه در اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارد و میزان بارندگی سالانه آن به طور متوسط ۶۴۳ میلی‌متر است که بر اساس نقشه‌های هم‌باران محاسبه شده است. حداکثر دمای آن به ۱۸/۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که میانگین حداقل دمای منطقه ۶/۱ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه به طور متوسط ۴۲ روز یخبندان در سال تجربه می‌کند. حداقل دمای مطلق در ماه بهمن به ۱۵- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای مطلق سالانه به ۴۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (Fathizadeh et al., 2017). این منطقه دچار خشکسالی‌های مکرر شده و پیش‌بینی می‌شود این روند ادامه یابد (Azizi et al., 2019).

رطوبت خاک است. این پژوهش به تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیوگرافی نظیر ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش درختان بر رطوبت خاک پرداخته و همزمان به ارزیابی قابلیت‌های روش‌های مختلف کریجینگ در پیش‌بینی رطوبت خاک می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل همزمان این عوامل به منظور درک دقیق‌تر روابط میان ویژگی‌های فیزیوگرافی و رطوبت خاک، و همچنین شناسایی و معرفی مؤثرترین روش درون‌یابی کریجینگ برای پیش‌بینی رطوبت خاک می‌باشد. این رویکرد می‌تواند به ارتقاء دقت پیش‌بینی‌ها و بهبود مدیریت منابع آبی کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های زاگرس و منطقه کوهستانی شلم واقع در شهرستان ایلام انجام شد. این منطقه در دامنه جنوبی تا کنار پارک جنگلی چغاسبز و در دامنه شمالی به جاده دره ارغوان محدود شده است (شکل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان ایلام

Figure 1- Location of the study area in Iran and Ilam province

نمونه‌برداری و تعیین رطوبت خاک

منطقه‌ی انتخابی به گونه‌ای بود که امکان بررسی ویژگی‌های موردنظر در هر دو جهت دامنه‌های شمالی و جنوبی و در سه طبقه‌ی ارتفاعی ۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر (پایین‌بند)، ۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر (میان‌بند) و ۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر (بالابند) فراهم شود. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای بود که پراکنش بهینه‌ی نقاط را تضمین کرده و پوشش گسترده‌ای از ارتفاعات مختلف را در نمونه‌ها ارائه دهد. در این منطقه جنگلی کوهستانی، ۶۰ توده (هر یک با مساحت ۰/۵ تا ۱ هکتار)، شامل ۳۰ توده کم‌تراکم (توده باز با تاج پوشش کمتر از ۲۵ درصد) و ۳۰ توده پرتراکم (توده بسته با تاج پوشش بیشتر از ۲۵ درصد) با استفاده از گوگل ارث و بازدیدهای میدانی تعیین شد. برای تعیین تاج پوشش، قطر بزرگ و قطر کوچک تاج درخت با متر نواری اندازه‌گیری شدند؛ سپس میانگین این دو قطر و مساحت تاج محاسبه شد. در هر دامنه (شمالی و جنوبی)، ۱۵ توده با تاج باز و ۱۵ توده با تاج بسته تعیین شد و در هر طبقه ارتفاعی، ۵ توده با تاج باز و ۵ توده با تاج بسته مشخص شد. برای جمع‌آوری داده‌ها و نمونه‌برداری خاک، ابتدا با دستگاه GPS^۲ مرکز هر پلات مشخص و از دایره‌هایی با شعاع ۱۲/۵ متر به عنوان پلات‌های نمونه‌برداری استفاده شد. نمونه‌های خاک در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری از چهار نقطه در هر پلات برداشت و ترکیب شدند. در هر دامنه ۳۰ نمونه خاک و در کل منطقه ۶۰ نمونه جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، رطوبت خاک به روش وزنی (Perrier & Salkini, 1991) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به رطوبت خاک، از آزمون‌های لون و کولموگروف-اسمیرنوف به ترتیب برای ارزیابی همگنی و نرمال بودن داده‌ها، استفاده شد. در ادامه برای بررسی اثرات جهت دامنه (شمال و

جنوب) و تراکم تاج پوشش (تاج بسته و تاج باز) در سه موقعیت ارتفاعی (پایین‌بند، میان‌بند و بالابند) و اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه آنها بر رطوبت خاک با استفاده از تجزیه واریانس سه‌طرفه در قالب مدل‌های خطی عمومی (GLM^۲) تعیین شد. در صورت وجود اثرات معنی‌دار، از آزمون‌های تجزیه واریانس یکطرفه و Independent student t-test برای مقایسه رطوبت بین کلاس‌های ارتفاعی، جهت‌های جغرافیایی و تاج پوشش مختلف استفاده شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳،۰ (SPSS Inc)، شیکاگو، IL انجام شد.

برای مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی ابتدا برای تعیین همبستگی مکانی داده‌ها، از ۷۰ درصد داده‌ها استفاده شد و ۳۰ درصد به منظور ارزیابی دقت مدل‌های درون‌یابی کنار گذاشته شد. برای استخراج پارامترهای لازم جهت درون‌یابی، واریوگرام محاسبه شد. واریوگرافی اولین گام در مدل‌سازی ساختار مکانی برای استفاده در روش کریجینگ است. در واریوگرافی، سه مؤلفه کلیدی وجود دارد که برای تحلیل و مدل‌سازی ساختار مکانی اهمیت دارند. Sill، که نشان‌دهنده بیشینه واریانس میان نقاط است و آستانه‌ای تعیین می‌کند که بعد از یک فاصله خاص، نقاط مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند؛ Range، که فاصله‌ای را مشخص می‌کند که در آن ارتباط مکانی میان داده‌ها وجود دارد و خارج از آن، نقاط به صورت تصادفی توزیع می‌شوند و Nugget، که واریانس در فواصل بسیار کوتاه را نشان می‌دهد و معمولاً ناشی از خطاهای اندازه‌گیری یا تغییرات جزئی محلی است (Shabani et al., 2011). این مؤلفه‌ها به درک بهتر ساختار مکانی و وابستگی داده‌ها کمک می‌کنند. برای محاسبه ضرایب کریجینگ، که یک تخمین‌گر زمین‌آماری است، ابتدا مقدار واریوگرام برآورد گردید (Shabani et al., 2011). در این راستا، از مدل‌های

ساده برای درون‌یابی و تهیه نقشه رطوبت خاک استفاده شد. کریجینگ معمولی متداول‌ترین روش برای برون‌یابی مقادیر در نقاطی است که داده‌ها نمونه‌برداری نشده‌اند. در این روش فرض می‌شود که میانگین متغیر مطالعه در منطقه ثابت است. در این روش، وزن‌های تخمین بر اساس فاصله و ارتباط بین نقاط نمونه تعیین می‌شوند. برای محاسبه این وزن‌ها، از واریوگرام استفاده می‌شود (Khan et al., 2023). کریجینگ عمومی برای داده‌هایی که دارای روند فضایی هستند و میانگین متغیر در نقاط مختلف تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. این متغیر به‌عنوان یک متغیر غیرایستا شناخته می‌شود. در این روش، میانگین متغیر به‌عنوان تابعی از مختصات فضایی مدل‌سازی می‌شود. این تابع می‌تواند به‌صورت خطی، درجه دو یا بالاتر باشد (Khan et al., 2023). کریجینگ ساده نیز یک روش درون‌یابی تصادفی است که برای تخمین جابه‌جایی در داده‌ها به کار می‌رود. این روش از داده‌های آماری استفاده می‌کند و فرض می‌کند که میانگین مختصات مستقل بوده و روندی ندارد، همچنین مقدار میانگین جامعه مشخص است (Rebholz & Almekkawy, 2020). روش‌های کریجینگ به استفاده از واریوگرام برای محاسبه وابسته‌اند، اما تفاوت اصلی در نحوه مدل‌سازی میانگین است (Khan et al., 2023). به‌طور کلی روش کریجینگ بر تحلیل نیم‌تغییرنما^۴ استوار است و به ازای هر تخمین، میزان خطا را نیز محاسبه می‌کند (Alavipanah et al., 2008; Khan et al., 2023) و پایین‌ترین مربع میانگین ریشه خطاء (RMSE) بهترین برآورد را خواهد داشت (Fathizad et al., 2015). درنهایت ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده به عنوان داده‌های اعتبارسنجی وارد GIS شد و مقادیر تخمینی رطوبت برای این نقاط به دست آمد. مقادیر پیش‌بینی‌شده به همراه مقادیر واقعی به نرم‌افزار SPSS منتقل شدند تا با مقایسه این دو، دقت مدل ارزیابی

مختلفی همچون خطی، نمایی، گوسی و کروی استفاده می‌شود. مدل خطی فرض می‌کند که واریانس به‌طور خطی با فاصله افزایش می‌یابد و برای ساختارهای ساده‌تر مکانی مناسب است. مدل نمایی برای داده‌هایی که به تدریج به آستانه نزدیک می‌شوند، کاربرد دارد و تغییرات تدریجی مکانی را به خوبی مدل می‌کند. مدل گوسی نیز برای داده‌های همبسته با تغییرات سریع‌تر طراحی شده و واریانس در فواصل کوچک به سرعت به آستانه نزدیک می‌شود. مدل کروی، به‌عنوان یک مدل متداول، واریانس را در فواصل کوتاه تا متوسط به‌صورت تدریجی و کروی به آستانه می‌رساند (Laun et al., 2016). این مؤلفه‌ها و مدل‌ها اساس واریوگرافی و تکنیک‌های تخمین‌گر کریجینگ هستند و به دقت بالا در تحلیل داده‌های مکانی کمک می‌کنند.

برای مشخص کردن نوع واریوگرام مناسب، از نرم‌افزار GS+ استفاده شد. این نرم‌افزار به تعیین بهترین مدل واریوگرام (خطی، نمایی، گوسی یا کروی) کمک می‌کند و ساختار مکانی داده‌ها را مدل‌سازی می‌کند. نرم‌افزار GS+ به‌صورت خودکار مدل بهینه را شناسایی و انتخاب می‌کند. این نرم‌افزار واریوگرامی را انتخاب می‌کند که همبستگی مکانی بین داده‌ها را به شکل مطلوب‌تری نسبت به سایر واریوگرام‌ها نشان می‌دهد (Stateczny & Włodarczyk-Sielicka, 2012). بهترین مدل برازش شده دارای کمترین مقدار RSS (مجموع ترکیبات) و بیشترین مقدار R^2 (ضریب تعیین) است؛ بنابراین ابتدا توزیع داده‌ها بررسی (Hasanipak, 2007) و ارزیابی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GS+ انجام شد. با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌های رطوبت، نیازی به تبدیل آنها نبود. پس از تحلیل در GS+، مناسب‌ترین مدل واریوگرام برای داده‌ها مشخص و پارامترهای مربوط به آن تعیین گردید. پس از تعیین مدل واریوگرام، از روش‌های مختلف کریجینگ شامل کریجینگ معمولی، عمومی و

و جنوبی، تفاوت معنی‌داری بین پوشش تاج باز و بسته مشاهده شد. به‌علاوه، در تمام کلاسه‌های ارتفاعی، مقدار رطوبت در مناطق با تاج پوشش بسته به‌طور قابل توجهی بیشتر از مناطق با تاج پوشش باز بود. بیشترین رطوبت خاک در جهت شمالی در نواحی بالابند و میان‌بند با تاج پوشش بسته (۱۲/۴۶ درصد) ثبت شد، در حالی که کمترین مقدار آن در نواحی بالابند در جهت جنوبی با تاج پوشش باز (۳/۹۲) به‌دست آمد (شکل ۲).

جدول ۱- نتایج تاثیر جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا و تراکم تاج پوشش بر رطوبت خاک

Table 1- Results of the effects of slope aspect, elevation, and canopy density on soil moisture

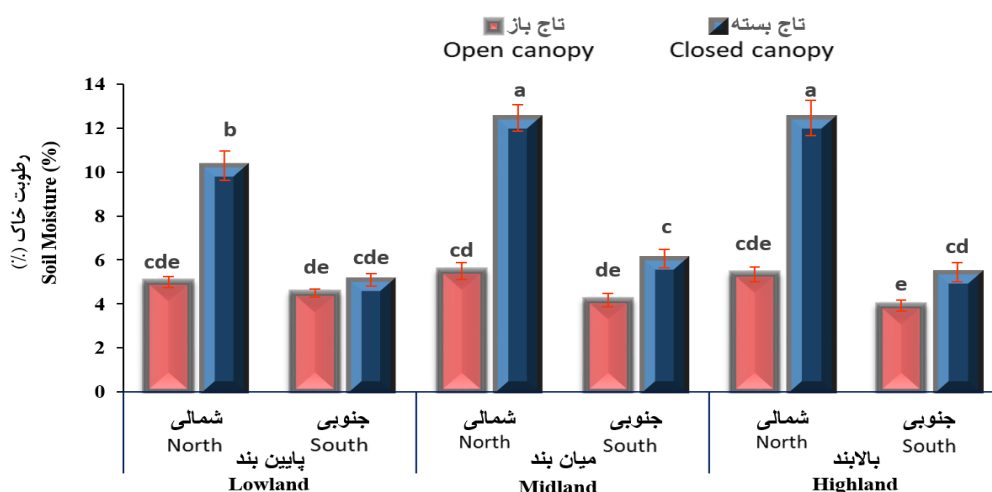
رطوبت وزنی (درصد)

منبع تغییرات		Df	
P-value	MS		
0.000	198.48	1	دامنه (A)
0.000	227.87	1	تاج پوشش (C)
0.033	3.645	2	ارتفاع (E)
0.000	97.971	1	A × C
0.084	2.604	2	A × E
0.040	3.419	2	C × E
0.780	0.249	2	A × C × E

شود. این فرآیند به بررسی میزان تطابق نقشه با داده‌های واقعی و اعتبارسنجی مدل کمک می‌کند.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که جهت دامنه و تاج پوشش تأثیر معنی‌دار و بالایی بر رطوبت وزنی خاک دارند ($P\text{-value} < 0.001$). همچنین، ارتفاع از سطح دریا نیز تأثیر معنی‌داری بر رطوبت وزنی خاک داشته است ($P\text{-value} = 0.033$). هرچند اثر متقابل جهت دامنه و ارتفاع بر رطوبت وزنی خاک معنی‌دار نبود ($P\text{-value} = 0.084$)، اما اثر متقابل تاج پوشش و ارتفاع تأثیر معنی‌داری بر رطوبت وزنی خاک داشته است ($P\text{-value} = 0.040$). در حالی که اثر متقابل سه‌گانه ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تاج پوشش تأثیر معنی‌داری نشان نداد است ($P\text{-value} = 0.780$). نتایج مقایسه میزان رطوبت وزنی خاک نشان داد که در هر سه کلاسه ارتفاعی، میزان رطوبت در جهت شمالی به‌طور معنی‌داری ($P\text{-value} < 0.05$) بیشتر از جهت جنوبی است. همچنین، در هر دو جهت شمالی



شکل ۲- مقایسه میانگین (± اشتباه معیار) رطوبت وزنی خاک در طبقات مختلف ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه (شمالی و جنوبی) در دو طبقه تاج پوشش اشکوب فوقانی (باز و بسته)؛ حروف ناهمسان در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد می‌باشد

Figure 2- Mean comparison (± standard error) of soil Moisture in different elevation classes, aspects (north and south), and two canopy cover types (open and closed); non-identical letters in the columns indicate a significant difference at the 0.05 level

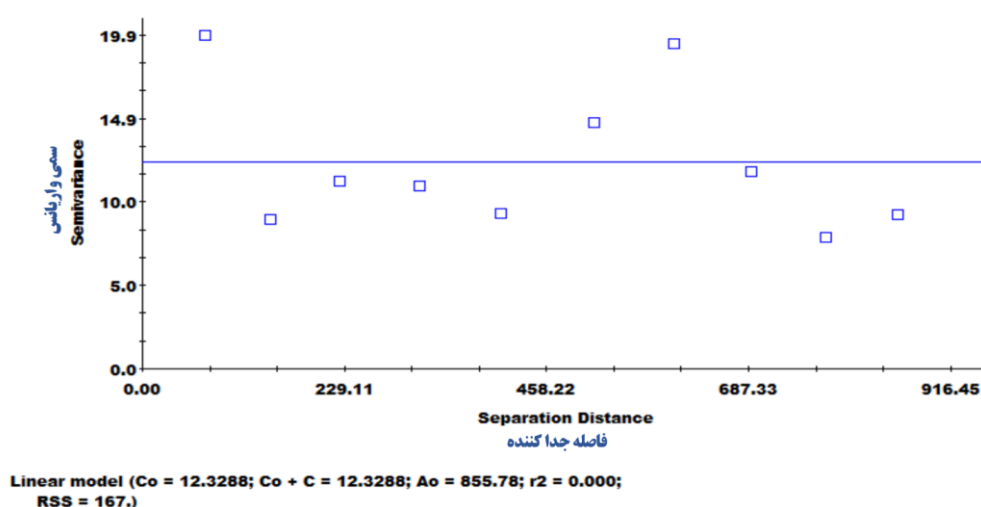
می‌دهند. در مقابل، برای دامنه جنوبی، مدل نمایی مناسب‌تر است (شکل ۴)، زیرا این مدل با اثر قطعه‌ای نسبتاً پایین (۰/۸۱۹) و اثر آستانه ۱/۶۳۹، بهترین برازش را به داده‌ها نشان می‌دهد و دارای دامنه مؤثر ۱۶۱۸ تا ۴۸۵۴ است. نسبت همبستگی فضایی ۰/۵ نیز نشان می‌دهد که همبستگی فضایی تا فواصل مشخصی قوی‌تر بوده و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که مدل نمایی قادر است ساختار فضایی غیریکنواخت و تغییرات داده‌ها در دامنه جنوبی را بهتر توصیف کند (جدول ۲).

نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش شده در نرم‌افزار GS+ برای مدل‌های مختلف (کروی، نمایی، خطی و گوسین) در داده‌های شمالی و جنوبی نشان داد که برای دامنه شمالی، مدل خطی به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شده است (شکل ۳)، مقدار اثر قطعه‌ای و اثر آستانه (سقف واریوگرام) در این مدل پایین و برابر (۱۲/۳۲) است که نشان‌دهنده یک تغییر خطی و یکنواخت در واریانس با فاصله است. این مدل، با فاصله مؤثر ۸۵۵/۷۸۱۱ و نسبت همبستگی فضایی صفر، نشان می‌دهد که داده‌ها دارای همبستگی فضایی کمتری هستند و تغییرات به طور یکنواخت رخ

جدول ۲- پارامترهای تأثیر قطعه‌ای و سقف واریوگرام برای واریوگرام‌های برازش شده

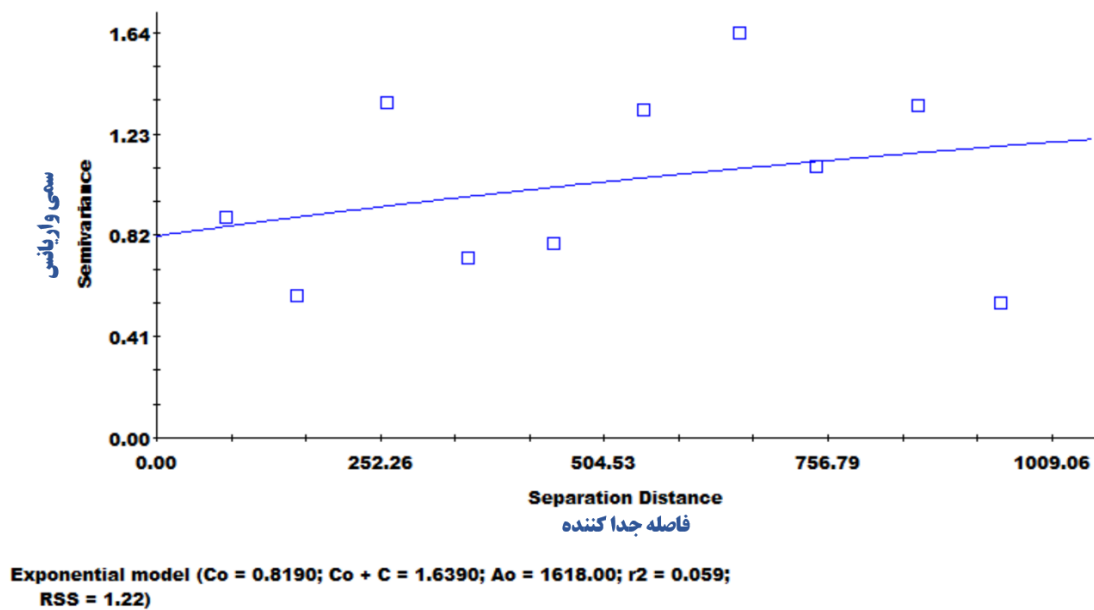
Table 2- Parameters of the nugget effect and sill for the fitted variograms

مدل	اثر قطعه	اثر آستانه	فاصله	فاصله مؤثر	نسبت $C/(C_0+C)$	R^2	دامنه
کروی	2.04	12.33	70	70	0.835	0.000	شمالی
نمایی	10.36	20.73	2110	6330	0.5	0.074	
خطی	12.32	12.32	855.7811	855.7811	0	0.075	
خطی به آستانه	2.85	12.33	70	70	0.769	0.000	
گوسین	11.64	23.29	2110	3654.6272	0.5	0.072	جنوبی
کروی	0.832	1.665	3110	3110	0.5	0.047	
نمایی	0.819	1.639	1618	4854	0.5	0.059	
خطی	0.895	1.151	951.6192	951.6192	0.222	0.044	
خطی به آستانه	0.888	1.777	3110	3110	0.5	0.044	
گوسین	0.973	1.947	2329	4033.9463	0.5	0.014	



شکل ۳- واریوگرام خطی برازش شده به داده‌های رطوبت خاک در دامنه شمالی

Figure 3- Linear variogram fitted to the soil moisture data in the northern slope



شکل ۴- واریوگرام نمایی برازش داده شده به داده‌های رطوبت خاک در دامنه جنوبی

Figure 4- Exponential variogram fitted to the soil moisture data in the southern slope

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مورد بررسی (جدول ۳)، نشان داد که در دامنه شمالی کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (۰/۴۴) بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشند.

جدول ۳- نتایج صحت‌سنجی سرتاسری برای سه واریوگرام کریجینگ

Table 3- Results of cross-validation for three Kriging variograms

مدل	میانگین مربع ریشه خطا برآورد استاندارد (RMSE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	دامنه
کریجینگ معمولی	1.07	0.001	3.6	3.86	شمالی
کریجینگ ساده	0.79	0.04	4.6	3.77	
کریجینگ عام	2.07	0.38	1.88	4.69	
کریجینگ معمولی	0.44	0.13	3.08	1.25	جنوبی
کریجینگ ساده	0.46	0.16	3	1.33	
کریجینگ عام	1.29	0.45	1.028	1.25	

واریانس داده‌ها را نشان می‌دهند که توسط مدل قابل توجیه است. RMSE و میانگین خطای مطلق (MAE) هرچه کمتر باشند، دقت مدل بیشتر است. میانگین خطای درصدی مطلق (MAPE) برای درک میزان خطای نسبی مدل مفید است. معیار اطلاعات نرمال‌شده (BIC) میزان کیفیت مدل را با در نظر گرفتن پیچیدگی آن ارزیابی می‌کند؛ مقادیر کمتر BIC

نتایج اعتبارسنجی برای ۳۰ درصد داده‌ها و مقادیر تخمینی رطوبت برای این نقاط نیز نشان داد که در دامنه شمالی کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان RMSE (۰/۲۵۸) و در دامنه جنوبی کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان RMSE (۰/۴۵۳) بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشد (جدول ۴). در این جدول ضریب تعیین (RS) درصدی از

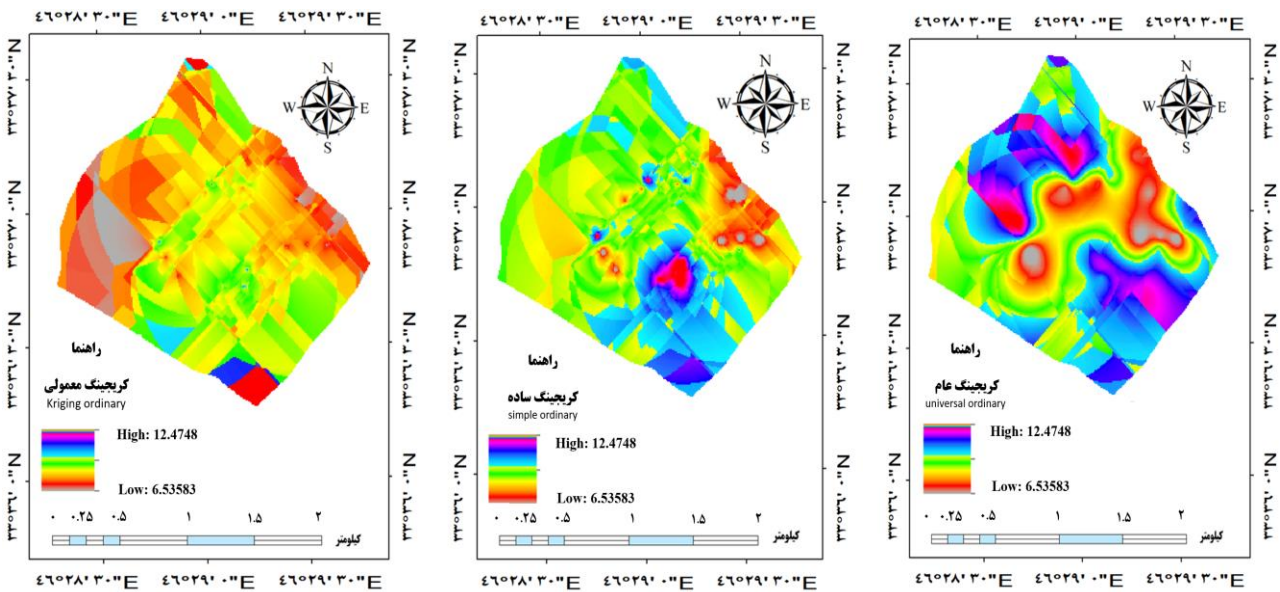
شمالی و واریوگرام نمایی در دامنه جنوبی در این تحقیق نقشه توزیع رطوبت به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام تهیه گردید (شکل‌های ۵ و ۶).

نشان‌دهنده مدل بهتر است، به‌ویژه زمانی که مدل‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. در نهایت با استفاده از روش‌های آماری کریجینگ و واریوگرام خطی در دامنه

جدول ۴- نتایج ارزیابی دقت برای سه واریوگرام کریجینگ با مقادیر واقعی رطوبت خاک

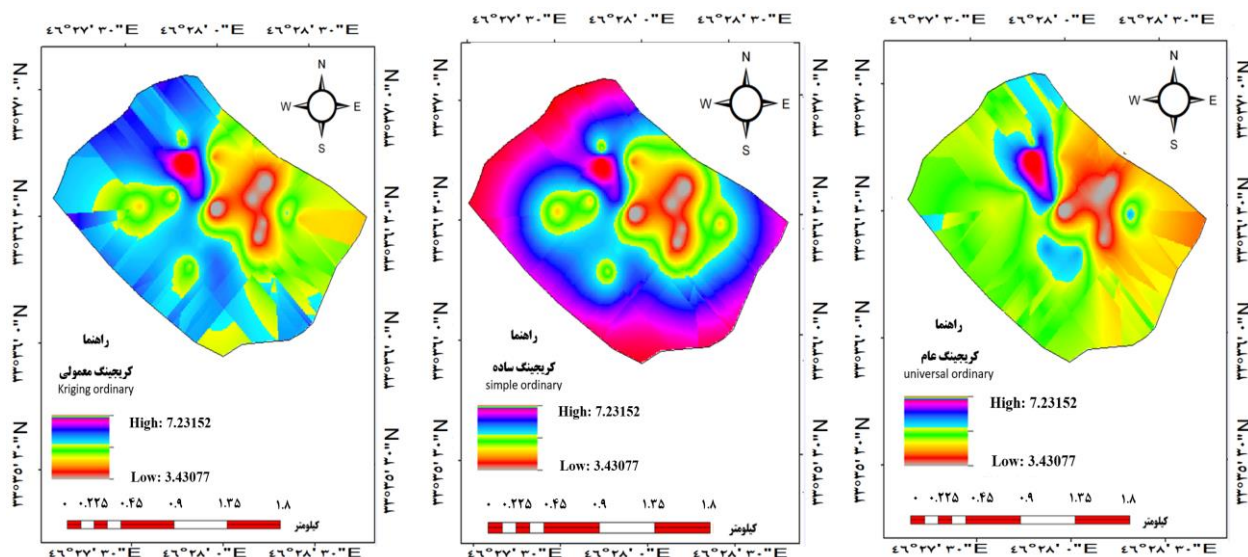
Table 4- Results of accuracy evaluation for three Kriging variograms with actual soil moisture values

مدل	میانگین مربع ریشه خطا برآورد استاندارد (RMSE)	ضریب تعیین (RS)	میانگین خطای درصدی مطلق (MAPE)	میانگین خطای مطلق (MAE)	معیار BIC اطلاعات نرمال شده	دامنه
کریجینگ معمولی	0.367	0.000	3.45	0.38	-1.08	شمالی
کریجینگ ساده	0.258	0.012	1.96	0.179	-2.21	
کریجینگ عام	0.445	0.013	5.11	0.376	-0.35	
کریجینگ معمولی	0.453	0.380	4.724	0.268	-1.72	جنوبی
کریجینگ ساده	0.512	0.596	6.862	0.389	-0.80	
کریجینگ عام	0.645	0.676	7.41	0.395	-0.7	



شکل ۵- نقشه توزیع رطوبت خاک به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام در دامنه شمالی

Figure 5- Soil moisture distribution map using Ordinary, Simple, and Universal Kriging methods in the northern range



شکل ۶- نقشه توزیع رطوبت خاک به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام در دامنه جنوبی

Figure 6- Soil moisture distribution map using Ordinary, Simple, and Universal Kriging methods in the southern range

همکاران (۲۰۱۸) که در جنگل‌های مله سیاه در استان ایلام انجام شد نیز نشان داد که جهت جغرافیایی و عمق خاک به‌طور معنی‌داری بر رطوبت خاک تأثیرگذار است. در این مطالعه، میزان ذخیره رطوبت خاک در جهت جنوبی و شمالی به ترتیب ۹/۲۱ و ۷/۱۹ میلی‌متر ثبت شد و این نشان می‌دهد که جهت جنوبی کمترین میزان رطوبت را دارا بوده و دامنه شمالی دارای بیشترین مقدار رطوبت بوده است. نتایج مطالعه Hosseinzadeh و همکاران (۲۰۱۸) که نشان داد میانگین رطوبت خاک در ماه‌های مختلف سال در جهت شمالی بیشتر از جهت جنوبی است نیز مؤید این مطلب است.

انتخاب نوع واریوگرام تأثیر مهمی بر دقت کریجینگ دارد. نتایج مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی نشان داد که در دامنه شمالی، کریجینگ ساده با استفاده از واریوگرام خطی بهترین عملکرد را داشته و کمترین مقدار RMSE ثبت شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایطی که داده‌ها تغییرات یکنواختی دارند، کریجینگ ساده به دلیل فرض میانگین ثابت می‌تواند گزینه مناسبی باشد (Oliver & Webster, 2014). در دامنه جنوبی نیز استفاده از واریوگرام نمایی و

بحث

نتایج مقایسه رطوبت وزنی خاک نشان داد که در هر سه کلاسه ارتفاعی، رطوبت در جهت شمالی به‌طور معنی‌داری بیشتر از جهت جنوبی بود. همچنین رطوبت در مناطق با پوشش تاجی بسته به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مناطق با پوشش تاجی باز بود. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد. تحقیقات نشان می‌دهند که جهت جغرافیایی (شمالی و جنوبی) یکی از عوامل مهم در توزیع رطوبت خاک است، به‌طوری‌که در نیم‌کره شمالی کره زمین، جهت شمالی به دلیل کاهش تابش خورشید و افزایش سایه‌اندازی، معمولاً رطوبت بیشتری را در خاک حفظ می‌کند (Pelletier et al., 2018; Heydari et al., 2021). همچنین، اختلافات قابل‌توجهی بین رطوبت خاک در دامنه‌های شمالی و جنوبی به دلیل تفاوت در تابش و میزان تبخیر وجود دارد (Varga & Csiszér, 2020). علاوه بر این، پوشش تاجی متراکم‌تر موجب حفظ رطوبت بیشتری در خاک می‌شود، زیرا می‌تواند برخورد نور خورشید با سطح زمین را کاهش داده و تبخیر را کاهش داده و رطوبت را در لایه‌های بالایی خاک حفظ کند (Hayati et al., 2018). نتایج مطالعه Aazami و

معمولی اشاره کرده است که مؤید نتایج این تحقیق است.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که رطوبت خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل فیزیوگرافی و پوشش تاجی قرار دارد. به‌طور خاص، در دامنه‌های شمالی، به دلیل کاهش تابش خورشید و افزایش تراکم تاج‌پوشش (سایه‌اندازی بیشتر)، رطوبت خاک بیشتر از دامنه‌های جنوبی است. علاوه بر این، پوشش تاجی بسته نقش کلیدی در حفظ رطوبت خاک ایفا می‌کند. این یافته‌ها اهمیت رطوبت خاک در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی را نشان می‌دهد، زیرا رطوبت خاک بر فرآیندهایی همچون تغذیه آب‌های زیرزمینی، تثبیت خاک، و حفظ پوشش گیاهی تأثیر مستقیم دارد. با توجه به گستردگی مناطق و نیاز به اندازه‌گیری مداوم رطوبت خاک، استفاده از روش‌های سریع و دقیق برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی رطوبت خاک ضروری است. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزارهایی مؤثر در تحلیل و پیش‌بینی وضعیت‌های جغرافیایی، می‌توانند دقت و سرعت تهیه این نقشه‌ها را افزایش دهند. همچنین، انتخاب صحیح مدل‌های واریوگرام و تکنیک‌های درون‌یابی برای به‌دست آوردن تخمین‌های دقیق ضروری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در دامنه‌های شمالی، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی عملکرد بهتری دارد، در حالی که در دامنه‌های جنوبی، که تغییرات رطوبتی در فواصل کوتاه‌تر رخ می‌دهد، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی دقت بیشتری ارائه می‌دهد. این تحقیق بر اهمیت انتخاب روش‌های مناسب آماری و زمین‌آمار تأکید دارد که می‌تواند دقت نقشه‌های رطوبتی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. به‌طور کلی، این یافته‌ها در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی اکوسیستم‌های جنگلی، به‌ویژه در ارزیابی و حفظ رطوبت خاک، کاربردهای مهمی دارند.

کریجینگ معمولی با کمترین مقدار RMSE نشان می‌دهد که این روش برای شرایطی که وابستگی فضایی قوی‌تری در فواصل کوتاه وجود دارد، مناسب‌تر است. واریوگرام نمایی به دلیل حساسیت بالای خود به تغییرات سریع در فواصل کوتاه، در ترکیب با کریجینگ معمولی نتایج بهتری ارائه می‌دهد؛ زیرا کریجینگ معمولی با تخمین میانگین متغیرها به‌صورت محلی، می‌تواند به‌خوبی با این تغییرات سازگار شود (Cui *et al.*, 1995). جهت شمالی به دلیل داشتن تاج پیوسته‌تر و پوشش کف بیشتر در طول سال، ماده آلی بیشتر و عمق و ساختار بهتر خاک، به‌طور معمول می‌تواند وضعیت بهتری در حفظ رطوبت خاک داشته باشد؛ بنابراین، نسبت به جهت جنوبی که ناهمگن‌تر است، ناهمگنی کمتری در رطوبت خاک دارد؛ به این معنا که در فواصل کوتاه، تغییرات رطوبت خاک کمتر است (Geroy *et al.*, 2011). به‌طور کلی کریجینگ ساده برای واریوگرام‌های خطی یا شرایطی که تغییرات فضایی یکنواخت‌تر هستند مناسب‌تر است، در حالی که کریجینگ معمولی برای واریوگرام نمایی به دلیل توانایی در تخمین تغییرات سریع در فواصل کوتاه، دقت بیشتری دارد (Taharin & Roslee, 2021). نتایج این تحقیق با مطالعات Barry و Hoef (۱۹۹۶) که نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های واریوگرام خطی در کریجینگ ساده می‌تواند به‌طور قابل توجهی خطاها را کاهش دهد همخوانی دارد. در این مطالعه، واریوگرام خطی به‌عنوان گزینه مناسبی برای داده‌های ساده و پیوسته معرفی شده است. Oliver و Webster (۲۰۱۴) نیز در پژوهش خود نتیجه‌گیری کرده‌اند که برای داده‌هایی که تغییرات سریع در فواصل کوتاه دارند، استفاده از واریوگرام نمایی در کریجینگ معمولی می‌تواند نتایج بهتری به همراه داشته باشد. همچنین Matheron (۲۰۱۹) در فصل مربوط به کریجینگ، به کاربرد واریوگرام‌های خطی در کریجینگ ساده و واریوگرام‌های پیچیده‌تر مانند نمایی در کریجینگ

References

- Aazami, A., Hosseini, A., & Hoseinzadeh, J. (2018). The effect of depth and aspect on soil moisture in dieback affected Oak forests (Case study: Meleh Siah Forest, Ilam Province). *Ecology of Iran Forest*, 6(11), 41-50. <https://doi.org/10.29252/ifej.6.11.41> (In Persian)
- Akmal, K. (2023). The role of geographic information systems (GIS) in location-based decision making. *Journal Informatic, Education and Management*, 5(1), 26-30. <https://doi.org/10.61992/jiem.v5i1.73>
- Alavipanah, S. K., Matinfar, H. R., & Rafiei Emam, A. (2008). *The application of information technology in earth sciences (digital soil mapping): radar, hyperspectral and multispectral remote sensing, geographic information systems (GIS), neural networks, fuzzy sets, and geostatistics*. University of Tehran Press, (1st ed., p. 457). (In Persian)
- Azizi, E., Tavakoli, M., Karimi, H., & Faramarzi, M. (2019). Evaluating the efficiency of the neural network compared to other methods in predicting drought in arid and semi-arid regions of western Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 489. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4654-z>
- Barry, R. P., & Hoef, J. (1996). Blackbox Kriging: Spatial prediction without specifying variogram models. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 1(3), 297-322. <https://doi.org/10.2307/1400521>
- Brus, D., & Heuvelink, G. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1-2), 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.016>
- Cui, H., Stein, A., & Myers, D. (1995). Extension of spatial information, Bayesian kriging and updating of prior variogram parameters. *Environmetrics*, 6(4), 373-384. <https://doi.org/10.1002/env.3170060406>
- Denkovski, D., Atanasovski, V., Gavrilovska, L., Riihijärvi, J., & Mähönen, P. (2012). *Reliability of a radio environment map: Case of spatial interpolation techniques*. 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 248-253. <https://doi.org/10.4108/ICST.CROWNCOM.2012.248452>
- Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M., & Jackson, T.J. (2008). Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>
- Fathizad, H., Karimi, H., & Taze, M. (2015). Study of different geostatistical algorithms for annual rainfall zoning in Ilam Province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 14(35), 139-154. (In Persian)
- Fathizadeh, O., Hosseini, S.M., Zimmermann, A., Keim, R.F., & Bolorani, A.D. (2017). Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Science of the Total Environment*, 601-602, 1824-1837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.233>
- Geroy, I.J., Gribb, M.M., Marshall, H.P., Chandler, D.G., Benner, S.G., & McNamara, J.P. (2011). Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes*, 25(25), 3836-3842. <https://doi.org/10.1002/hyp.8281>
- Ghaisvandi, A. (2013). GIS in natural studies. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, 22(85), 98-101. <https://doi.org/10.25883860.1392.2.851.14.3> (In Persian)
- Ghorbani, K., Salarjazi, M., & Farnia, E. (2018). Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in groundwater level zoning. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 165-182. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13571.2826> (In Persian)
- Goebes, P., Schmidt, K., Seitz, S., Both, S., Bruelheide, H., Erfmeier, A., Scholten, T., & Kühn, P. (2019). The strength of soil-plant interactions under forest is related to a Critical Soil Depth. *Scientific Reports*, 9, 8635. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45156-5>
- Han, H., & Suh, J. (2024). Spatial Prediction of Soil Contaminants Using a Hybrid Random Forest–Ordinary Kriging Model. *Applied*

- Sciences*, 14(4), 1666.
<https://doi.org/10.3390/app14041666>
- Hasanipak, A. (2007). *Geostatistics*. Tehran, University of Tehran Press. Pp 380.
- Hayati, E., Abdi, E., Saravi, M., Nieber, J., Majnounian, B., Chirico, G., Wilson, B., & Nazarirad, M. (2018). Soil water dynamics under different forest vegetation cover: Implications for hillslope stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2106-2120.
<https://doi.org/10.1002/esp.4376>
- Heshmati, M., Gheitury, M., & Arabkhedri, M. (2020). Mitigating drought induced-mortality in the semiarid forests through runoff harvesting system; as a short-term adaptation measure. *Desert*, 25, 239-248.
<https://doi.org/10.22059/JDESERT.2020.79489>
- Heydari, M., Cheraghi, J., Omidipour, R., Mirab-Balou, M., & Pothier, D. (2021). Beta diversity of plant community and soil mesofauna along an elevational gradient in a mountainous semi-arid Oak forest. *Community Ecology*, 22, 165-176.
<https://doi.org/10.1007/s42974-021-00046-7>
- Heydari, M., Karami, O., Rostami, N., & Faramarzi, M. (2020). Assessment of protected vs. degraded oak forests: A geostatistical approach based on soil and plant diversity. *Journal of plant Ecosystem conservation*, 8(17), 195-218.
- Hosseinqolizade, A., Zeaiean, P., & Beyranvand, P. (2020). Comparison of different retrieval temperature algorithms with different emissivity by using remote sensing images. *Journal of Geographical Space*, 72, 39-56. (In Persian)
- Hosseinzadeh, J., Tongo, A., Najafifar, A., & Hosseini, A. (2018). Relationship between soil moisture changes and climatic indices in the MeleSiah Forest site of Ilam Province. *Journal of Water and Soil*, 32(4), 821-830.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v32i4.71927>
(In Persian)
- Jamei, M., Mousavi, M., Alizadeh, A., & Irannejad, P. (2017). Validation of soil moisture retrievals from SMOS Microwave Satellite. *Journal of Water and Soil*, 31(2), 660-672.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.59170>
- Khan, M., Almazah, M.M.A., Elahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A.Y., & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary Kriging and Universal Kriging. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2190853.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853>
- Khatami, S., & Khazaei, B. (2014). Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary. *Journal of Water Management and research*, 70, 41-49.
- Laun, S., Rösch, N., Breunig, M., & Doori, M. A. (2016). Implementation of kriging methods in mobile GIS to estimate damage to buildings in crisis scenarios. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 211-216.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-b2-211-2016>
- Matheron, G. (2019). *Kriging*. In: *Matheron's Theory of Regionalised Variables*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198835660.003.0004>
- Moradi, A., & Shabanian, N. (2023). Sacred groves: A model of Zagros forests for carbon sequestration and climate change mitigation. *Environmental Conservation*, 50(3), 163-168.
<https://doi.org/10.1017/S0376892923000127>
- Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56-69.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Pan, X., Zhang, J., Huang, P., & Roth, K. (2012). Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4361-4372.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-4361-2012>
- Pelletier, J., Barron-Gafford, G., Gutiérrez-Jurado, H., Hinckley, E.S., Istanbuloglu, E., McGuire, L., Niu, G., Poulos, M., Rasmussen, C., Richardson, P., Swetnam, T., & Tucker, G. (2018). Which way do you lean? Using slope aspect variations to understand Critical Zone processes and feedbacks. *Earth Surface Processes and*

- Landforms*, 43(6), 1133-1154.
<https://doi.org/10.1002/esp.4306>
- Perrier, E., & Salkini, A. (1991). Soil Water Measurement. In: Perrier, E.R., Salkini, A.B., Ward, C.F. (eds) Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-3766-9_8
- Premudha, R., Kumar, K. D., Prasath, B. H., Sivabalan, M., & Prasath, N. (2024). Data Management System - Water Supply and Channeling with GIS Mapping. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4(3), 101-105.
<https://doi.org/10.48175/ijarsct-18218>
- Rafiei, H., Jafari, A., Salimian, S., & Nateghi, M. B. (2018). *Estimation of soil saturation moisture percentage using kriging and regression-kriging methods*. First International Conference and Third National Conference on Sustainable Management of Soil and Environmental Resources. (In Persian)
- Rebholz, B., & Almekkawy, M. (2020). *Efficacy of Kriging interpolation in ultrasound imaging: Subsample displacement estimation*. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2020, 2137-2141.
<https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9175457>
- Shabani, A., Matinfar, H. R., Arekhi, S., & Rahimi Harabadi, S. (2011). Modeling rainfall erosivity factor using geostatistic techniques (Case study: Ilam Dam watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 2(2), 56-65. (In Persian)
- Stateczny, A., & Włodarczyk-Sielicka, M. (2012). Test results of bathymetric data processing obtained by swath sounder GS+. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 53(4), 105-118.
- Taharin, M. R., & Roslee, R. (2021). The application of semi variogram and ordinary kriging in determining the cohesion and clay percentage distribution in hilly area of Sabah, Malaysia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(5), 525-53.
<https://doi.org/10.18280/ijdne.160506>
- Tu, L., Ha, P., Tram, V., Thuy, N., Phuong, D., Nhat, T., & Loi, N. (2023). GIS application in environmental management: A Review. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*.
<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4957>.
- Varga, C., & Csiszér, L. (2020). The influence of slope aspect on soil moisture. *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, 12, 82-93.
<https://doi.org/10.2478/ausae-2020-0007>
- Wang, M., Shi, S., Lin, F., Hao, Z. Q., Jiang, P., & Dai, P. (2012). Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of Manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in northeastern China. *PLOS One*, 7(2), e30754.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030754>
- Yao, X., Fu, B., Lü, Y., Sun, F., Wang, S., & Liu, M. (2013). Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. *PLOS One*, 8 (1), e54660.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054660>
- Yu, B., Liu, G., Liu, Q., Wang, X., Feng, J., & Huang, C. (2018). Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 165, 125-132.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.020>
- Zhang, J., Li, X., Yang, R., Liu, Q., Zhao, L., & Dou, B. (2017). An Extended Kriging method to interpolate near-surface soil moisture data measured by wireless sensor network. *Sensors*, 17(6), 1390.
<https://doi.org/10.3390/s17061390>

Challenges of conservation management of Hyrcanian forests from the perspective of stakeholders (Case study: Golestan province)

Amereh Teymouri¹, Hannaneh Mohammadi Kangarani^{1*}, Mohammad Hadi Moayeri¹, Mohammad Reza Shahraki²

1. Department of Forest Management, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2. Researcher of rural development and expert in agricultural economics and natural resources of Golestan Governorate, Iran

* Corresponding author: h.kangarani@gau.ac.ir

(Received: 29 September 2024

Revised: 27 November 2024

Accepted: 03 January)

Extended Abstract

Introduction: Governmental conservation management of forests and local communities' claim to traditional forest rights and ownership have always been a source of conflict, limiting the sustainable management of forests. As sustainability of production is one of the important goals of forest management and conservation, it is necessary to consider the assessment, conservation, and improvement of quality in forest management. Therefore, identifying the both governmental and public stakeholders and being aware of their points of view and perspectives are inevitable aspects of forest conservation management. In this regard, the present research has analyzed the indicators of conservation management of Hyrcanian forests while identifying its challenges in basin number 86 of Golestan province (one of the 104 basins in Hyrcanian forests).

Materials and methods: The current research is of an applied study that used grounded theory with a qualitative approach. The statistical population in this research were specialized forestry experts in the General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan province and local communities in four villages of Tuskestan, Qoran-Abad, Taghratepe and Jafarabad in Gorgan County. In-depth semi-structured interview was used as the main tool for collecting data from experts. The interviewees were selected using snowball sampling method and their information was collected through face-to-face interviews. As well as taking notes, all the interviews were recorded for coding, correction and feedback by the interviewees. The criteria for judging when to stop interviewing each person and the number of sampling were based on the theoretical adequacy of the proposed categories. So that theoretical adequacy was achieved by conducting 60 in-depth interviews. Data analysis was conducted in three stages: open, axial, and selective coding. Finally, after calculating the ratio of the repetition of categories to their number in the interviews, the degree of importance and effect of the categories in the conservation management of Hyrcanian forests in the study area was determined and while ranking them, the results in the final template was presented.

Results and Discussion: The results showed that the four categories "uneconomical of livestock farming and lack of other alternative employment opportunities in the village", "lack of involvement of villagers in forest management decisions and preparation of forestry plans", "insufficient support of the government in paying facilities for rural jobs" and "high unemployment rate and lack of income-generating job diversity in villages" were the most important challenges in the conservation management of Hyrcanian forests in the study area, respectively. Based on the final categories and classification made with the final model, according to the calculation of the ratio of repetition of categories to their number, four categories "income and livelihood in villages", "attracting social participation and local communities satisfaction", "illegal exploitation of the forest" and "Upstream policymaking" with the highest numerical value were the most important challenges of forest conservation management in the region under the study and "forest conservation manpower", "organizational management and inter-agency coordination" and "security and land use conservation" have respectively been the least important challenges.

Conclusion: According to the results obtained from the research, the identification of income-generating potentials by villages in different dimensions of industry, agriculture and horticulture, ecotourism and eco-tourism and rewriting forestry plans according to ecological, economic, social and cultural conditions, and following that, targeted investment by providing low-interest facilities for the prosperity and sustainability of rural businesses is one of the most important suggestions of this research. Therefore, the necessity of holding skill-oriented courses and classes with the aim of creating entrepreneurship in villages will be doubled. Identifying the violators of forest areas by village and planning to employ them in mines and factories and providing employment permits in the village based on the ability of individuals are among other recommendations that can be used to bring forest governance to an optimal level.

Keywords: Social forestry, Local stakeholders, Sustainable forest management, Hyrcanian forests.

Citation: Teymouri, A., Mohammadi Kangarani, H., Moayeri, M.H., & Shahraki, M.R. (2025). Challenges of conservation management of Hyrcanian forests from the perspective of stakeholders (Case study: Golestan province). *Integrated Watershed Management*, 5(2), 129-146. doi= 10.22034/iwm.2025.2042075.1176

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>).



چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی از دیدگاه ذینفعان (مطالعه موردی: استان گلستان)

عامره تیموری^۱، حنا محمدی کنگرانی^{۱*}، محمدهادی معیری^۱، محمدرضا شهرکی^۲

۱. گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲. پژوهشگر توسعه روستایی و کارشناس اقتصاد کشاورزی و منابع طبیعی استانداری گلستان، ایران

*نویسنده مسئول: h.kangarani@gau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

چکیده مبسوط

مقدمه: مدیریت حفاظتی دولت بر جنگل‌ها و ادعای جوامع محلی در مورد حقوق و مالکیت سنتی بر آن‌ها، همیشه به عنوان یک منبع تضاد مطرح بوده و مدیریت پایدار جنگل‌ها را با مشکل مواجه کرده است. با توجه به این که پایداری تولید از اهداف مهم مدیریت و حفاظت از جنگل‌ها است، لذا در نظر گرفتن ارزیابی، حفاظت و ارتقاء کیفیت در مدیریت جنگل‌ها ضرورت پیدا می‌کند. بر این اساس، شناسایی ذینفعان اعم از دولتی و مردمی و آگاهی از نقطه‌نظرات و دیدگاه‌های آنان، امری اجتناب‌ناپذیر در مدیریت حفاظتی جنگل‌ها محسوب می‌شود. در این راستا تحقیق حاضر ضمن شناسایی چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه شماره ۸۶ استان گلستان (یکی از حوزه‌های ۱۰۴ گانه در جنگل‌های هیرکانی)، به تحلیل شاخص‌های مطرح شده در آن پرداخته است.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده که برای اجرای آن از نظریه داده بنیاد با رویکرد کیفی بهره گرفته شد. جامعه آماری در این تحقیق کارشناسان تخصصی جنگلداری در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و جوامع محلی در چهار روستای توسکستان، قرن‌آباد، تقرتپه و جعفرآباد در محدوده شهرستان گرگان بودند. مصاحبه عمیق نیمه‌ساختاریافته به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار جمع‌آوری داده‌ها از خبرگان بود. مصاحبه‌شوندگان به شیوه گلوله‌برفی انتخاب و اطلاعات آن‌ها از طریق مصاحبه چهره‌به‌چهره گردآوری شد. کلیه مصاحبه‌ها ضمن یادداشت‌برداری، برای کدگذاری، اصلاح و اخذ بازخورد توسط مصاحبه‌شوندگان ضبط گردید. معیار قضاوت زمان متوقف نمودن مدت مصاحبه با هر فرد و همچنین تعداد نمونه‌برداری، بر اساس کفایت نظری مقوله‌های مطرح شده بود. به طوری که با انجام ۶۰ مصاحبه عمیق کفایت نظری حاصل شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در سه مرحله کدگذاری باز، محوری و انتخابی انجام شد. در نهایت پس از محاسبه نسبت تکرار مقوله‌ها به تعداد آن‌ها در مصاحبه‌ها، درجه اهمیت و اثر مقوله‌ها در مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در منطقه مورد مطالعه مشخص و ضمن رتبه‌بندی آن‌ها، نتایج در قالب الگوی نهایی ارائه گردید.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که چهار مقوله «اقتصادی نبودن دامداری و کمبود سایر فرصت‌های شغلی جایگزین در روستا»، «عدم دخیل نمودن روستائیان در تصمیم‌گیری‌های مدیریت جنگل و تهیه طرح‌های جنگلداری»، «ناکافی بودن حمایت دولت در پرداخت تسهیلات مشاغل روستایی» و «بالا بودن نرخ بیکاری و عدم وجود تنوع شغلی درآمدزا در روستاها» به‌ترتیب مهم‌ترین چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در منطقه مورد مطالعه بوده است. بر اساس مقوله‌های نهایی و طبقه‌بندی صورت گرفته مدل نهایی، با توجه به محاسبه مقدار نسبت تکرار مقوله‌ها به تعداد آن‌ها، چهار مقوله «درآمد و معیشت در روستاها»، «جلب مشارکت اجتماعی و رضایتمندی جوامع محلی»، «بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل» و «سیاستگذاری بالادستی» با بیشترین مقدار عددی به دست آمده بااهمیت‌ترین؛ و مقوله‌های «نیروی انسانی حفاظت از جنگل»، «مدیریت سازمانی و هماهنگی بین دستگاهی» و «امنیت و حفاظت کاربری اراضی» به‌ترتیب کم‌اهمیت‌ترین چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های منطقه مورد مطالعه بوده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق، شناسایی پتانسیل‌های درآمدزا به تفکیک روستاها در ابعاد مختلف صنعت، کشاورزی و باغبانی، اکوتوریسم و بوم‌گردی و بازنویسی طرح‌های جنگلداری متناسب با شرایط اکولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی و به دنبال آن سرمایه‌گذاری هدفمند با ارائه تسهیلات کم‌بهره در جهت رونق و پایداری کسب‌وکارها روستایی از مهم‌ترین پیشنهادها تحقیق حاضر است. از این‌رو ضرورت برگزاری دوره‌ها و کلاس‌های آموزشی مهارت‌محور با هدف ایجاد کارآفرینی در روستاها مضاعف خواهد شد. شناسایی متخلفین عرصه‌های جنگلی به تفکیک روستا و برنامه‌ریزی در جهت بکارگیری آن‌ها در معادن و کارخانجات و ارائه مجوز اشتغال در محدوده روستا بر اساس احراز توانایی افراد، از توصیه‌های دیگری است که می‌توان حکمرانی در عرصه‌های جنگلی را به حد مطلوبی رساند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت حفاظتی، ذینفعان محلی، مدیریت پایدار جنگل، جنگل‌های هیرکانی.

استناد: تیموری، ع.، محمدی، ح.، معیری، م. ه.؛ و شهرکی، م. ر. (۱۴۰۴). چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی از دیدگاه ذینفعان (مطالعه موردی: استان گلستان). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۵(۲)، ۱۴۶-۱۲۹.

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 قابل دسترس است.

مقدمه

عدم مدیریت پایدار جنگل‌ها داشته است (Castro & Lechthaler, 2022; Chan *et al.*, 2023). از سوی دیگر، تحقیقات مرتبط با بررسی ارتباطات میان حفاظت از جنگل‌ها و آگاهی‌رسانی محیط‌زیستی نشان داده‌اند که ضروری است دانش و آگاهی مردم در رابطه با اهمیت جنگل‌ها گسترش یابد، زیرا مشارکت مردم در حفاظت از آن از اهمیت حیاتی برخوردار است.

کنترل گسترده دولت بر جنگل‌ها و ادعای جوامع محلی در مورد حقوق و مالکیت سنتی بر آن‌ها، همیشه به عنوان یک منبع تضاد مطرح بوده و مدیریت پایدار جنگل‌ها را محدود کرده است. همچنین با توجه به این که هدف از مدیریت منابع طبیعی و بالتبع آن، حفاظت از جنگل‌ها پایداری تولید است، ضروری است که مدیریت برای یک منطقه مبتنی بر ارزیابی، حفاظت، مدیریت و ارتقاء کیفیت باشد. شناسایی ذینفعان اعم از دولتی و مردمی و آگاهی از نقطه‌نظرات و دیدگاه‌های آنان، امری اجتناب‌ناپذیر در نیل به اهداف توسعه پایدار و حفاظت از جنگل‌ها محسوب می‌شود. Luyet و همکاران (۲۰۱۲) نیز بیان کرده که توجه به مجموعه‌ای از معیارها مانند مجاورت، منفعت اقتصادی، روش‌های بهره‌برداری و ویژگی‌های اجتماعی برای تعریف ذینفعان لازم است؛ ذینفع می‌تواند اثرگذار یا اثرپذیر بوده و دارای منفعت باشد. چنان که Grimble (۱۹۹۷) مفهوم ذینفع را شامل کسی می‌داند که تحت تأثیر قرار می‌گیرد و یا می‌تواند بر موقعیتی با روشی خاص اثر بگذارد که این به مفهوم دارا بودن منافع مشخص و معلوم توسط ذینفع در مسئله مورد تصمیم‌گیری است (Mousavi & Nokandeh *et al.*, 2015). بر این اساس، شناسایی ذینفعان در مناطق مختلف جنگلی باید در اولویت برنامه‌های مدیریتی و تهیه طرح‌های جنگلداری باشد، چرا که ضرورت به‌کارگیری توانمندی‌های عمومی جوامع در مدیریت جنگل‌ها اجتناب‌ناپذیر بوده و ذینفعان در عرصه‌های منابع طبیعی و جنگل‌ها از مؤلفه‌های حیاتی و اساسی محسوب می‌شوند. همچنین از آنجا که اولویت‌های ذینفعان بسته به نوع

جنگل‌ها از اهمیت ویژه‌ای در تأمین معیشت و منابع علوفه‌ای و سوختی جوامع جنگل‌نشین و حاشیه‌نشین جنگل برخوردار بوده و نقش مهمی در تنظیم اقلیم جهانی دارند (Ekoungoulou *et al.*, 2018). تخمین زده می‌شود ۱/۶ میلیارد نفر با ۲۵ درصد از جمعیت جهان برای نیازهای معیشتی، اشتغال و درآمدهای خود به منابع و تولیدات جنگلی وابسته هستند (Beckline *et al.*, 2022). این نقش‌ها و کارکردهای متفاوت جنگل، تخریب و بهره‌وری پایین زمین را که ناشی از سیاست‌های ضعیف نهادی و استراتژی‌های مدیریتی است، برجسته می‌کند (Ernst *et al.*, 2013; Beckline *et al.*, 2018). بر اساس گزارشات سازمان ملل متحد در بررسی منابع جنگلی جهانی در سال ۲۰۲۰، جنگل‌ها ۳۱ درصد سطح خشکی‌های کره زمین را تشکیل داده که به دلایل مختلفی روند کاهشی داشته‌اند. به طوری که بین سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۰ تقریباً ۱۲ درصد از جنگل‌های طبیعی جهان از بین رفته است (Zhanbossinova *et al.*, 2024). از این‌رو با توجه به افزایش تقاضا برای منابع و محصولات جنگلی، حفاظت و مدیریت جنگل به طور فزاینده‌ای ضرورت پیدا کرده است (Rajora & Mosseler, 2001; Maukonen *et al.*, 2020). همچنین بررسی نتایج تحقیقات حاکی از آن است که حفظ، احیاء، توسعه و بهره‌برداری اصولی و بهینه از منابع طبیعی پایه مانند جنگل‌ها و مراتع باید همسو با اصول توسعه پایدار بوده و حفاظت از منابع طبیعی و بهره‌برداری پایدار از آن‌ها به‌عنوان گامی مهم در توسعه پایدار مطرح و بررسی شده است.

با وجود شیوه‌های مختلف مدیریتی در جنگل‌ها، همچنان چالش‌های مختلفی در مسیر حفاظت از آن‌ها وجود دارند که منجر به تخریب جنگل‌ها با سرعت هشداردهنده‌ای شده‌اند؛ سیاست‌های مختلف کاربری زمین و خلاءهای قانونی مقابله با تخریب جنگل‌ها و عدم آگاهی‌رسانی به جوامع روستایی، نقش مهمی در

نگرش آن‌ها تغییر می‌کند، شناسایی نگرش‌ها در رابطه با تغییر وضعیت جنگل‌ها می‌تواند طراحی اقدامات سیاست‌گذاری و تصمیمات مدیریتی را تسهیل کند (Nijnik et al., 2017).

به طور کلی، سه الگوی ذهنی مختلف شامل «حفاظت همراه با معیشت جایگزین»، «حفاظت مطلق» و «مدیریت مشارکتی همراه با معیشت جایگزین» در بین دینفعان مختلف وجود دارد؛ ذهنیت اول نشان‌دهنده این موضوع است که افرادی که در این دسته قرار گرفته‌اند به اهمیت موضوع حفاظت از جنگل‌ها پی برده‌اند، ولی با توجه به این که معیشت بسیاری از خانوارها وابسته به جنگل است، خواهان ارتقاء وضعیت معیشت با استفاده از راهکارهای دیگر مثل ایجاد شغل‌های جایگزین هستند تا به جنگل آسیبی وارد نکنند و از طرف دیگر وضعیت معیشت آن‌ها نیز بهبود نسبی پیدا کند. بر اساس ذهنیت دینفعان در گروه دوم، ترکیب مناطق مدیریتی و حفاظت‌شده راهی برای حفاظت از جنگل‌ها محسوب می‌شود؛ این نگرش به این دلیل با چالش‌هایی مواجه است که مهم‌ترین دلیل تخریب جنگل‌ها، تبدیل و تغییر کاربری جنگل‌ها و اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی است. ذهنیت سوم در دینفعان محلی، ترکیبی از مدیریت مشارکتی و معیشت جایگزین است. آنچه که در این ذهنیت شاخص و بارز بوده، این است که دینفعان تغییر سبک مدیریتی فعلی به مدیریت مشارکتی را قبول دارند. با این حال ضروری است که در ابتدا در این مناطق، مطالعه کامل و جامعی انجام شده و تمامی جوانب آن سنجیده شود و در نهایت راه حل مناسبی برای مدیریت منابع طبیعی اتخاذ گردد (Abdollahi et al., 2024).

در سال‌های گذشته، پژوهشگران بسیاری در داخل و خارج از کشور روی موضوع حفاظت از جنگل‌ها و نقش دینفعان در آن‌ها مطالعه کرده‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش Shahbaz و همکاران (۲۰۱۱) در پاکستان اشاره نمود؛ تحقیقات آن‌ها نشان داد که عدم توازن قدرت میان دینفعان و مشخص نبودن جایگاه

جوامع محلی در حفاظت از جنگل‌ها، اختلافات و تعارضاتی را در مدیریت جنگل‌های شمال غرب پاکستان به وجود آورده است؛ بنابراین، تنها راه ممکن و اساسی، به کارگیری خود مردم، به ویژه روستاییان جنگل‌نشین و سهمیم کردن آنان در برنامه‌ها است. همچنین نتایج نشان داد، اگر عملیات جنگلکاری از طریق روستاییان جنگل‌نشین انجام شود، کیفیت بهتر، سرعت بیشتر و هزینه کمتری خواهد داشت و روستاییان نیز در حفاظت جنگل‌ها مشارکت خواهند کرد. Nzunda و همکاران (۲۰۱۳) و Heravi و همکاران (۲۰۱۹) نیز مهم‌ترین دلایل تغییر کاربری را نیاز به چراگاه و محصولات جنگلی، گسترش کشاورزی، افزایش قیمت محصولات و فقدان زمین‌های اجاره‌ای دانسته و شناسایی و بررسی نظرات دینفعان را از جمله راهکارهای مقابله با این تخریب ذکر کرده‌اند.

Savari و Naghi Bayranvand (۲۰۲۰) در پژوهشی با موضوع حفاظت از جنگل‌ها بر اساس نظرات دینفعان به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین راهکارهای حفاظت از جنگل‌ها، تغییر شیوه معیشت جنگل‌نشینان و قرق کردن جنگل‌ها برای جلوگیری از ورود بیش از حد دام می‌باشد. همچنین Amini و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که توجه به مسائل اقتصادی، اجتماعی و وضعیت معیشتی بهره‌برداران، مهم‌ترین راهکار حفاظت از جنگل‌ها است. تحقیقات انجام شده در کشور قزاقستان نیز نشان داد که گسترش آتش‌سوزی‌های عرصه‌های جنگلی که ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد، سیستم مدیریت حفاظتی جنگل‌ها در این کشور را مختل کرده و یکی از راهکارهای برون‌رفت از آن، توجه به نظرات دینفعان مردمی است (Zhanbossinova et al., 2024).

در استان گلستان نیز با دارا بودن حدود ۴۵۲ هزار هکتار عرصه جنگلی و استقرار نوار باریکی از جنگل‌های هیرکانی و همچنین وجود ذخیره‌گاه‌های جنگلی، درختان و درختچه‌های متنوع و در حال انقراض، وجود چشم‌اندازهای زیبای طبیعی، اهمیت و جایگاه حفاظت

تیموری و همکاران

از جنگل‌های هیرکانی به عنوان ذخیره‌گاه ژنتیکی دوچندان شده است؛ لذا شناسایی مشکلات و چالش‌های حفاظت از این جنگل‌ها نقش مهمی در تغییر رویکرد مدیریت جنگل دارد؛ چراکه در مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی، علاوه بر جنبه حفاظتی، مداخلات اجتماعی-اقتصادی جوامع محلی در سطح خرد (روستا) نیز مطرح می‌باشد. در همین راستا تحقیق حاضر ضمن شناسایی چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ استان گلستان از دیدگاه ذینفعان، به تحلیل شاخص‌های مطرح شده در آن پرداخته و راهکارهای کاربردی در جهت مدیریت پایدار عرصه‌های جنگلی استان گلستان مطرح نموده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه شماره ۸۶ جنگلی یکی از حوزه‌های ۱۰۴ گانه جنگل‌های هیرکانی با مساحت ۳۱۵۶۶/۱۱ هکتار در محدوده جغرافیایی بین ۳۰' ۵۴° تا ۴۳' ۵۴° طول شرقی ۳۷' ۳۶° تا ۵۱' ۳۶° عرض شمالی در استان گلستان و در محدوده شهرستان گرگان قرار دارد (شکل ۱). این منطقه با متوسط بارش ۵۲۰ میلی‌متر در سال که بخش‌های شمال غربی این حوضه مناطق پربارش و بخش‌های جنوبی با وجود این که از ارتفاعات بالاتری هم برخوردار هستند مناطق کم‌بارش را تشکیل می‌دهند. متوسط دمای سالانه ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد بوده که مردادماه گرم‌ترین ماه سال و بهمن و دی‌ماه سردترین ماه سال می‌باشند. بر این اساس منطقه مورد مطالعه از اقلیمی مدیترانه‌ای تا نیمه‌مرطوب و آب‌وهوایی معتدل برخوردار است. میانگین رطوبت نسبی آن بیش از ۶۳ درصد در سال می‌رسد. به‌طور متوسط ۶ ساعت در روز آفتابی است و به‌طور کلی منطقه‌ای بادخیز نمی‌باشد، اما بادهای با سرعت بیش از ۲۵ متر بر ثانیه یا ۹۰ کیلومتر بر ساعت نیز در این منطقه وزیده است. در این حوزه سه کاربری جنگل، مرتع و مناطق مسکونی وجود دارد که ۲۹۵۶۱/۴ هکتار

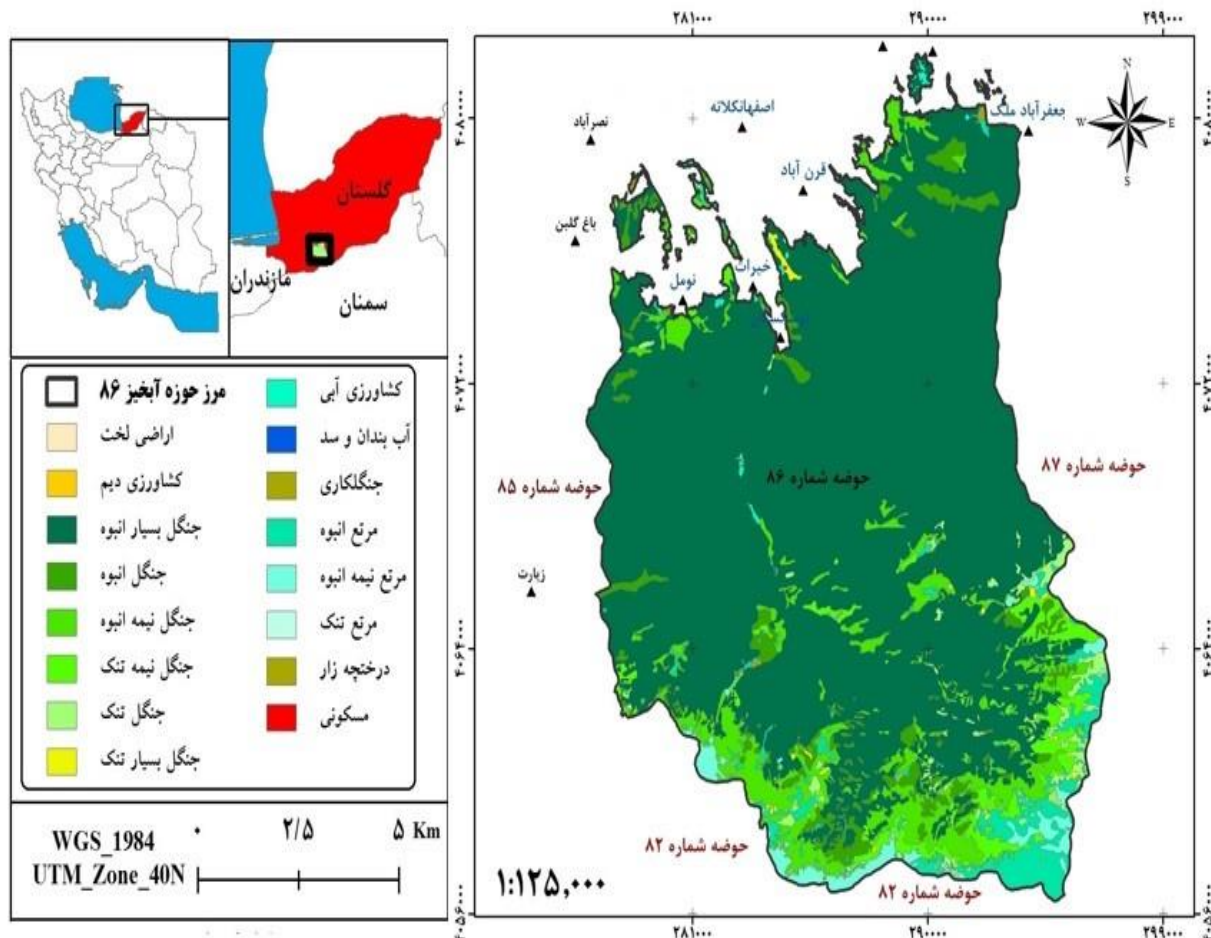
از آن را عرصه‌های جنگلی عمدتاً جنگل‌های پهن‌برگ معتدله تشکیل داده‌اند. تنوع پوشش گیاهی منطقه بسیار غنی بوده که شامل انواعی از گونه‌های درختی، درختچه‌ای و بوته‌ای می‌باشد. برخی از این گونه‌ها عبارت‌اند از افرا، زرشک، ممرز، توسکا، داغداغان، زالزالک، راش، گردو، آرس، سیاه‌تلو، بلوط، تمشک، سرخدار، نمدار، اوجا، آزاد، کلاه میرحسن، گون و آویشن است. این حوزه دارای تیپ‌های اصلی شامل تیپ ارس‌ستان *Juniperetum*، تیپ لور و اوری و جنگل‌های واقع در مناطق مرتفع و بالابند *Montane Forest*، تیپ بلوط، آزاد همراه با توسکا *Oak-Elm*، تیپ بلوط ممرز *Quercu-Carpinetum*، تیپ انجیلی- ممرز *Parrotia-Carpinetum* و تیپ راشستان‌های آهکی *Rusco-Fagetum* می‌باشد.

حوزه آبخیز ۸۶ دارای ۱۱ روستا می‌باشد. دو روستای توسکستان و جعفرآباد در داخل جنگل واقع شده و هر کدام به ترتیب ۱۸۲ و ۷۶۳ نفر جمعیت دارند. نه روستای دیگر نیز در حاشیه شمالی حوزه آبخیز واقع شده‌اند که دو روستای دیگر مورد مطالعه در این محدوده تحقیق (تقریباً و قرن‌آباد) از این بخش هستند و به ترتیب ۳۰۰ و ۵۷۲ نفر جمعیت دارند که در برخی روند جمعیت افزایشی و در برخی دیگر نیز حالت کاهش داشته است. شغل اصلی اغلب ساکنان این روستاها دامداری و کشاورزی بوده و بر اساس آمارهای موجود، ۲۲ اتراقگاه مشمول ۲۹۸ دامدار با تعداد ۲۵۶۶۶ واحد دامی در این حوزه باقیمانده است. دام‌های این حوزه نیز عموماً گوسفند و بز بوده و اکثراً به‌صورت ساکن در داخل یا حومه روستا پرورش داده می‌شوند. همچنین کلیه روستاها از امکانات رفاهی، آموزشی و بهداشتی مناسبی برخوردار می‌باشند (General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province, 2021).

حوزه آبخیز ۸۶ دارای پتانسیل‌های قابل توجهی درخصوص توسعه اکوتوریسم، صنایع دستی، آگروفارستری، آبی‌پروری، زنبورداری، محصولات فرعی جنگل و مرتع، و دورگ کردن دام‌های محلی می‌باشد؛ به

پژوهش نیز در چهار روستای تقرتپه، قرن‌آباد، توسکستان و جعفرآباد از این حوزه انجام شده است که مبنای انتخاب آن‌ها نیز گزارشات موجود در خصوص نوع تخلفات و تعارضات جوامع محلی و روستایی با نیروهای حفاظتی از یگان حفاظت و منابع طبیعی استان گلستان و همچنین معاونت حفاظت استان و ادارات شهرستان بوده است. بر این اساس، روستاهای قرن‌آباد و جعفرآباد از منظر قاچاق چوب، پرچالش عنوان شده و در روستای تقرتپه چالش دام‌مازاد وجود دارد. روستای توسکستان نیز به عنوان کم‌چالش‌ترین روستا در این حوزه معرفی شده است.

طوری که هر کدام از این مشاغل می‌توانند جایگزین دامداری و کشاورزی سنتی شده و یا به‌عنوان شغل مکمل روستاییان حوزه محسوب گردند. از سوی دیگر، مناطق طبیعی بکر و تاریخی و همچنین راه ارتباطی دامنه جنوبی و شمالی البرز و تردد تعداد زیادی از مسافران در طول سال از این جاده، پتانسیل بالایی از توسعه اکوتوریسم را برای این حوزه فراهم نموده است. نکته قابل تأمل در این حوزه این است که در پی ممنوعیت بهره‌برداری از جنگل‌ها و مکلف‌شدن سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور به تهیه طرح جایگزین جنگل‌های هیرکانی در سال ۱۳۹۶، این حوزه به‌عنوان نمونه در استان گلستان انتخاب گردید. این



شکل ۱- نقشه پوشش گیاهی حوزه آبخیز ۸۶ استان گلستان و موقعیت استقرار روستاهای مورد مطالعه
 Figure 1. Vegetation map of the 86th basin of Golestan province and the location of the studied villages

روش تحقیق

مصاحبه جهت پوشش زوایای مختلف تحقیق حاضر، سوالات دیگری توسط محقق مطرح شد. انتخاب مصاحبه‌شوندگان به شیوه گلوله‌برفی^۲ و اطلاعات از طریق مصاحبه چهره‌به‌چهره گردآوری شد. کلیه مصاحبه‌ها ضمن یادداشت‌برداری، برای کدگذاری، اصلاح و اخذ بازخورد توسط مصاحبه‌شوندگان ضبط گردید. معیار قضاوت درباره زمان متوقف نمودن مدت مصاحبه با هر فرد و همچنین تعداد نمونه‌برداری، بر اساس کفایت نظری مقوله‌های مطرح شده بود. به طوری که با انجام ۶۰ مصاحبه عمیق، کفایت نظری حاصل شد. مدت هر مصاحبه با توجه به شرایط و زمان مصاحبه و همچنین عدم تکرار مقوله‌های مطرح شده بین ۳۵ تا ۱۳۵ دقیقه بوده که متوسط مدت زمان کلیه مصاحبه‌ها ۵۲/۷۱ دقیقه به دست آمد.

به‌طورکلی، در پژوهش‌های کیفی، معیارها و ملاک‌های متفاوتی برای اعتبارسنجی وجود دارد. در این راستا و برای اطمینان از روایی و پایایی اطلاعات از چهار معیار زیر استفاده شده است (Azma et al., 2023):

اعتبارپذیری: باورپذیری یک تحقیق و یافته‌های آن با استراتژی‌های متعدد جمع‌آوری و آنالیز اطلاعات حاصل می‌شود. در تحقیق حاضر نیز به منظور گردآوری اطلاعات، پژوهشگر به مدت چهار ماه از منطقه مورد مطالعه بازدید داشته و در سه مرحله فایل‌های مصاحبه مورد بازنگری و بررسی قرار گرفت.

انتقال‌پذیری: این نشان می‌دهد که چقدر می‌توان از یافته‌های به‌دست آمده از تحقیق در زمینه‌های دیگر استفاده کرد؛ از این رو در این تحقیق، نتایج با جزئیات کافی و به صورت عمیق بیان شده است که معیاری از انتقال‌پذیری دقیق در این مرحله است.

اطمینان‌پذیری: اطمینان‌پذیری معادل پایایی در پژوهش‌های کیفی است؛ در واقع، اطمینان‌پذیری از طریق فرآیند حسابرسی قابل‌دستیابی است؛ برای این

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و برای اجرای آن از روش نظریه داده‌بنیاد^۱ با رویکرد کیفی بهره گرفته شد. این نظریه یک روش تحقیق کیفی است که برای نظریه‌پردازی پیرامون پدیده مورد مطالعه، در زمانی استفاده می‌شود که ادبیات پژوهش پیرامون موضوع از غنای لازم برخوردار نباشد. در نظریه داده‌بنیاد، با استفاده از شیوه‌های منظم گردآوری داده‌ها از طریق بررسی اسناد و مدارک موجود و همچنین مصاحبه با اهل فن، به تشخیص مقوله‌ها، مضمون‌ها و برقراری رابطه میان این مقوله‌ها پرداخته و مدلی برای تبیین یک فرآیند عرضه می‌کنند (Azma et al., 2023). هدف عمده در نظریه داده‌بنیاد تبیین یک پدیده از طریق مشخص کردن عناصر کلیدی مفاهیم و مقوله‌های آن پدیده و سپس طبقه‌بندی روابط این عناصر درون بستر و فرآیند آن پدیده است (Rezaei et al., 2023). در همین راستا پژوهش حاضر علاوه بر شناسایی چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ استان گلستان، به دنبال تحلیل و ارائه الگوی روابط بین مقوله‌ها است.

جامعه آماری در این تحقیق کارشناسان تخصصی جنگلداری در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و جوامع محلی در چهار روستای توسکستان، قرن‌آباد، تقرتپه و جعفرآباد در حوزه ۸۶ محدوده شهرستان گرگان در استان گلستان بودند. در این تحقیق، مصاحبه عمیق نیمه‌ساختاریافته به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار جمع‌آوری داده‌ها از خبرگان بود. مصاحبه‌ها به شکل حضوری و در منطقه مورد مطالعه انجام و گفتگوها ضبط گردید. در این روش، محقق با پرسش "به نظر شما مشکل اصلی مدیریت جنگل در این منطقه چیست؟" مصاحبه خود را با جوامع محلی جنگل‌نشین و کارشناسان شروع نموده و در فرآیند

منظور مصاحبه‌های ضبط‌شده، متون نسخه‌برداری شده مصاحبه‌ها، و مشخصات مصاحبه‌شوندگان و یادداشت‌های محققین، ثبت و مستندسازی شدند.

تأییدپذیری: تأییدپذیری زمانی اتفاق می‌افتد که گزارشات، دست‌نوشته‌ها و یادداشت‌های پژوهش به محقق دیگری داده شود و سرانجام، هر دو به یافته‌های مشابهی دست یابند؛ در این راستا مفاهیم و مقوله‌های استخراج‌شده به همراه یافته‌ها دوباره به اطلاع مصاحبه‌شوندگان رسید و نظرات اصلاحی آنان اعمال گردید.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسیدن به نظریه نیز از روش کدگذاری نظری استفاده شد. مراحل کدگذاری نظری شامل کدگذاری باز، محوری و انتخابی است. کدگذاری باز در مرحله اول با مفهوم‌سازی اظهارات مصاحبه‌شوندگان شروع شد. به بیان دیگر، کدگذاری باز در واقع ترجمه اظهارات افراد به صورت ارائه شاخص می‌باشد. عملیاتی که طی آن داده‌ها تجزیه، مفهوم‌سازی و به شکل تازه‌ای در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند. در مرحله دوم کدگذاری (محوری) از طریق طبقه‌بندی مفاهیم مشابه و مقوله‌پردازی آن‌ها صورت گرفته و مقوله‌هایی که با هم مشابهت داشتند، حول محور مشترکی قرار گرفتند. در کدگذاری محوری، طبقات به مقوله‌های اولیه خود ربط داده شده تا با کوچک‌سازی دامنه شاخص‌ها تبیین‌های دقیق‌تر و کامل‌تری از موضوع تحقیق ارائه گردد. به بیان دیگر، کدهای با محتوای مشترک را در هم ادغام کرده و با فاصله‌دادن از مفهوم‌پردازی باز، مفاهیم را به سوی اختصاصی‌تر نمودن سوق داده شد. مرحله کدگذاری انتخابی به عنوان سطح سوم نظریه داده‌بنیاد به صورت فرآیند یکپارچه‌سازی و پالایش مقوله‌ها صورت گرفت. به طوری که بر اساس مقوله‌های نهایی و طبقه‌بندی صورت گرفته تئوری و مدل نهایی ارائه گردید. به همین منظور پس از انجام مصاحبه‌های صورت گرفته با خبرگان در خصوص چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ استان گلستان،

کدگذاری مطالب مطرح شده و استخراج مفاهیم در سه مرحله کدگذاری (باز، محوری و انتخابی) صورت پذیرفت. همچنین نکات کلیدی و مواردی که مصاحبه‌شوندگان تأکید بیشتری بر آن‌ها داشتند، از مصاحبه‌ها استخراج گردید. سپس کدهای ثانویه از کدهای اولیه ایجاد و در مرحله بعدی به مفهوم‌سازی از کدهای ثانویه پرداخته شد. در نهایت پس از محاسبه نسبت تکرار مقوله‌ها به تعداد آن‌ها در مصاحبه‌ها، درجه اهمیت و اثر مقوله‌ها در مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در منطقه مورد مطالعه مشخص و ضمن رتبه‌بندی آن‌ها، نتایج در قالب الگوی نهایی ارائه گردید.

نتایج

ویژگی‌های فردی مصاحبه‌شوندگان: با توجه به بررسی صورت گرفته، ۳۳/۳ درصد از مصاحبه‌شوندگان جزء نمایندگان دولتی (کارشناسان تخصصی جنگلداری، حفاظت و امور اراضی) و ۶۶/۷ درصد را نمایندگان مردمی از جمله جوامع محلی پیشرو، دهیار و اعضای شورای اسلامی روستا، تشکیل دادند. ۷۵ درصد از مصاحبه‌شوندگان را مردها و ۲۵ درصد را زن‌ها تشکیل دادند. میانگین سنی آن‌ها ۴۷/۵ سال بود که کمترین و بیشترین سطح سنی مصاحبه‌شوندگان به ترتیب ۳۲ و ۵۸ سال بود. نتایج نشان داد ۸۰ درصد از افراد مورد مطالعه با بیشترین درصد فراوانی دارای تحصیلات دانشگاهی و مابقی که کم‌سواد و یا بی‌سواد بودند جزء نمایندگان مردمی بودند.

پیاده‌سازی مصاحبه‌ها و استخراج شواهد گفتاری

(کدگذاری باز): با توجه به ۵۸ مصاحبه در ۳۰۵۷ دقیقه، کمترین زمان مصاحبه مربوط به کد var39 با ۳۵ دقیقه و بیشترین زمان مصاحبه مربوط به کد var06 با ۱۳۵ دقیقه به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۱). مصاحبه‌ها و کدگذاری شاخص‌ها در سه مرحله جهت بالا بردن سطح دقت استخراج شاخص‌ها مورد بررسی و بازبینی قرار گرفت. به طوری که پس از

تیموری و همکاران

مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ استان گلستان استخراج و لیست گردید که شاخص‌های مشابه در مرحله بعد تلفیق شدند.

اجرای مرحله سوم، نسبت به پیاده‌سازی شواهد گفتاری و استخراج شاخص‌های مورد نظر اقدام گردید. بر اساس دسته‌بندی صورت گرفته به تفکیک مصاحبه‌شوندگان، ۲۷۲ کد مرتبط با چالش‌های

جدول ۱- استخراج و کدگذاری باز شاخص‌های مستخرج از مصاحبه‌های خبرگان

Table 1. Extraction and open coding of indicators extracted from experts interviews

تعداد شاخص مطرح شده در مصاحبه	تعداد مصاحبه	مدت زمان مصاحبه (دقیقه)	جایگاه مصاحبه شونده	کد مصاحبه شونده
9	1	75	رئیس اداره جنگلکاری	var01
6	1	50	جانشین یگان حفاظت	var02
5	1	54	کارشناس جنگلداری	var03
3	1	35	کارشناس حفاظت و حمایت	var04
10	2	105	کارشناس حفاظت و حمایت	var05
9	2	135	کارشناس یگان حفاظت	var06
3	1	58	سرجنگلیان	var07
5	1	50	کارشناس ساماندهی خروج دام از جنگل	var08
3	1	46	کارشناس جنگلداری	var09
8	1	122	کارشناس جنگلکاری	var10
8	1	85	معاونت امور جنگل	var11
5	1	54	رئیس اداره شهرستان گرگان	var12
10	2	90	کارشناس جنگلداری	var13
3	1	45	سرجنگلیان	var14
5	1	58	کارشناس حفاظت و حمایت	var15
5	1	50	رئیس اداره بهره برداری	var16
6	1	64	کارشناس جنگلداری	var17
12	2	130	کارشناس یگان حفاظت	var18
8	2	75	مدیر حوزه آبخیز	var19
5	1	50	رئیس اداره جنگلداری	var20
3	1	45	دهیار تقرتپه	var21
2	1	48	شورای تقرتپه	var22
5	1	55	دامدار تقرتپه	var23
3	1	40	شورای تقرتپه	var24
5	1	62	تولیدکننده نهال تقرتپه	var25
3	1	38	بوم‌گردی جعفرآباد	var26
2	1	45	زنبوردار قرن آباد	var27
5	1	65	کشاورز قرن آباد	var28
8	1	75	دامدار قرن آباد	var29
7	2	68	دامدار قرن آباد	var30
5	1	62	شورای قرن آباد	var31
3	1	40	دامدار توسکستان	var32
6	1	58	دهیار توسکستان	var33
5	1	45	مغازه‌دار توسکستان	var34
5	1	60	معدن دار شن توسکستان	var35
4	1	48	شورای توسکستان	var36

5	1	65	کشاورز توسکستان	var37
3	1	50	دامدار جعفرآباد	var38
5	1	35	کشاورز قرن‌آباد	var39
8	2	65	بومگردی توسکستان	var40
5	1	58	دهیار جعفرآباد	var41
7	1	63	دهیار قرن‌آباد	var42
10	1	75	فعال محیط‌زیست قرن‌آباد	var43
5	1	50	جوامع محلی قرن‌آباد	var44
3	1	48	جوامع محلی تقرتپه	var45
6	1	65	بومگردی جعفرآباد	var46
5	1	40	دامدار قرن‌آباد	var47
3	1	48	دامدار تقرتپه	var48
2	1	40	کشاورز تقرتپه	var49
6	2	65	شورای جعفرآباد	var50
272	58	3057	50	کل

از چالش‌های سیاست‌گذاری بالادستی و درآمد و معیشت در روستاها با ۱۵ تکرار، مهم‌ترین چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در منطقه مورد مطالعه بوده است.

همان‌طور که نتایج نشان داد، وضعیت درآمدی و معیشتی روستاییان اصلی‌ترین و کلیدی‌ترین چالش مدیریت جنگل‌ها در منطقه مورد مطالعه بوده است. در این روستاها با توجه به وجود دام خرده‌پا و شرایط اقتصادی و درآمدی نامناسب مردم، دامداری اقتصادی نبوده و اغلب مردم دام‌ها را رها کرده و به بهره‌برداری غیرقانونی محصولات چوبی و غیرچوبی جنگلی روی می‌آورند. همچنین علاوه بر اقتصادی نبودن، چرای دام‌ها در جنگل‌ها جهت تعلیف، باعث تخریب گیاهان علفی و فورب‌های کف جنگل و همچنین نهال‌های نورسیده شده است. ادامه روند دامداری بدون برنامه‌ریزی و غیرهدفمند در بین جوامع جنگل‌نشین می‌تواند ناشی از رشد نرخ بیکاری در خانوارها به دلیل کمبود فرصت‌های شغلی جایگزین دامداری در روستاها باشد (Wong et al., 2020; Giakoumi & Arabatzis, 2023). همچنین نادیده گرفتن پتانسیل‌های اکوتوریسمی و بوم‌گردی در منطقه مورد مطالعه توسط نهادهای متولی حفاظت از منابع طبیعی در طرح‌ها و برنامه‌ها مطرح‌شده، با توجه به اثرگذاری

طبقه‌بندی چالش‌های مدیریت حفاظتی

جنگل‌های هیرکانی (کدگذاری محوری): بر این اساس، تعداد مقوله‌های پایه (۲۶۲ مقوله) شناسایی شده به عنوان چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی منطقه مورد مطالعه به ۴۴ مقوله در قالب ۱۱ نوع چالش درآمد و معیشت در روستاها، نگهداری دام و دامسراها در جنگل، بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل، جلب مشارکت اجتماعی و رضایت‌مندی جوامع محلی، مدیریت تعارضات و اعتماد اجتماعی، سطح دانش و مهارت جوامع محلی، امنیت و حفاظت کاربری اراضی، نیروی انسانی حفاظت از جنگل، مدیریت سازمانی و هماهنگی بین دستگاهی، سیاست‌گذاری بالادستی و همچنین نظارت و بازدارندگی، تقلیل یافت (جدول ۲). نتایج حاصل از تکرار مقوله‌های دسته‌بندی شده نشان می‌دهد که سه مقوله «اقتصادی نبودن دامداری و کمبود سایر فرصت‌های شغلی جایگزین در روستا» با ۲۱ تکرار از چالش درآمد و معیشت در روستاها، «عدم دخیل نمودن روستاییان در تصمیم‌گیری‌های مدیریت جنگل و تهیه طرح‌های جنگلداری» با ۱۷ تکرار از چالش جلب مشارکت اجتماعی و رضایت‌مندی جوامع محلی و «ناکافی بودن حمایت دولت در پرداخت تسهیلات مشاغل روستایی» و «بالا بودن نرخ بیکاری و عدم وجود تنوع شغلی درآمدزا در روستاها» به ترتیب

تیموری و همکاران

کمر خواهد شد (Nath et al., 2010; Roy et al., 2021). همپوشانی در تصمیم‌گیری‌های کلان و سیاست‌گذاری‌های بالادستی دولت در تزریق اعتبارات به دستگاه‌های تکلیف شده از جمله بنیاد برکت، کمیته امداد امام خمینی (ره)، میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی و غیره جهت حمایت از کسب‌وکارهای روستایی از طریق پرداخت تسهیلات عامل مهم دیگری است که به دلایلی همچون عدم تناسب فرصت‌های شغلی مورد حمایت دولت با پتانسیل‌های روستایی و همچنین نظارت ضعیف بر پایداری مشاغل ایجاد شده در سطوح مختلف در روستاها، تأثیر چندانی در اقتصاد روستایی نداشته است. در واقع تدوین سند راهبردی دگردیسی کسب‌وکارهای روستایی می‌تواند ضمن هماهنگی درون‌دستگاهی و تعریف وظایف حمایتی هر یک از سازمان‌ها، مسیر حمایت و پشتیبانی تسهیلاتی را مشخص و تعیین نماید.

بوم‌گردی بر اقتصاد روستایی (Azizi et al., 2022)، فرصت‌های درآمدزایی و ارزآوری به روستاها را با مشکل مواجه نموده است. عدم دخیل نمودن جوامع محلی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت جنگل (Niedziałkowski & Chmielewski, 2023) و تهیه طرح‌های جنگلداری، باعث شده است که روستاییان به دلیل عدم شفافیت در جایگاه‌شان انگیزه پایینی در مشارکت مدیریت حفاظتی جنگل‌ها داشته باشند. با توجه به تأثیرگذاری عوامل اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی بر سطح مشارکت جامعه محلی در مدیریت پایدار جنگل (Marnelly et al., 2023)، جلب مشارکت اجتماعی و رضایت‌مندی جوامع محلی در اجرای طرح‌ها و پروژه‌های حفاظتی، احیایی و اصلاحی در جنگل می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت پایدار عرصه‌های جنگلی داشته باشد. لذا هر چه میزان سرمایه اجتماعی در روستاها بهبود یابد، احتمال کاهش بروز بهره‌برداری غیرقانونی از محصولات جنگلی

جدول ۲- طبقه‌بندی چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ در قالب کدگذاری محوری

Table 2. Classification of the challenges of conservation management of Hyrcanian forests in the 86th basin in the form of axial coding

تعداد تکرار	مقوله گزینشی نهایی	کد مقوله	نوع چالش
21	اقتصادی نبودن دامداری و کمبود سایر فرصت‌های شغلی جایگزین در روستا	In1	
15	بالا بودن نرخ بیکاری و عدم وجود تنوع شغلی درآمدزا در روستاها	In2	
9	پایین بودن سطح درآمد جوامع روستایی	In3	
10	در نظر نگرفتن پتانسیل‌های روستایی در مشاغل غیر دامداری	In4	درآمد و معیشت در روستاها
4	عدم توجه به فعالیت‌های گردشگری و بومگردی در جهت درآمدزایی در طرح‌های جنگلداری	In5	
5	عدم توجه به پتانسیل‌های محصولات فرعی جنگل در درآمدزایی جوامع محلی و نادیده گرفتن آن در طرح‌های جنگلداری	In6	
3	عدم استفاده مناسب از پتانسیل معادن موجود جهت اشتغالزایی روستاییان	In7	
8	حضور دامداران در جنگل به دلیل نبود چراگاه تعلیف دام	Li1	نگهداری دام و دامسراها در جنگل
3	بالا بودن قیمت نهاده‌های مکمل و علوفه دامی	Li2	
3	تعدد دام‌سراهای موقت در جنگل	Li3	
5	بازگشت مجدد دام به جنگل و عدم برنامه مناسب مدیریت آن	Li4	
8	سرشاخه‌زنی در جنگل جهت چراندن دام‌ها	Li5	
12	قطع درختان جنگلی و قاچاق چوب	Ie1	بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل
1	وجود معادن غیرقانونی و بهره‌برداری از آن‌ها در منطقه	Ie2	
10	وجود کارگاه‌های غیرقانونی تولید ذغال در روستاها	Ie3	
3	عدم رضایت‌مندی مردم بومی در مدیریت جنگل‌های منطقه	Pa1	جلب مشارکت اجتماعی و
7	انگیزه پایین مشارکت روستاییان در حفاظت جنگل	Pa2	

17	عدم دخیل نمودن روستاییان در تصمیم‌گیری‌های مدیریت جنگل و تهیه طرح‌های جنگلداری	Pa3	رضایت‌مندی جوامع محلی
8	اختلافات و تعارضات بین روستاییان و نیروهای حفاظت از جنگل در موارد مختلف از جمله ورود دام به جنگل	Co1	مدیریت تعارضات و اعتماد
5	عدم توجه به مشکلات دامداران روستایی	Co2	
5	عدم اعتماد بین روستاییان به اداره منابع طبیعی	Co3	اجتماعی
5	دینفع نبودن جوامع محلی در اجرای پروژه‌های حفاظتی، احیایی و اصلاحی جنگل	Co4	
7	عدم استفاده از دانش بومی مردم در مدیریت و برنامه‌ریزی حفاظت از جنگل	Kn1	سطح دانش و مهارت جوامع محلی
5	سطح پایین آگاهی و دانش لازم روستاییان در مدیریت جنگل	Kn2	
4	عدم برگزاری کلاس‌های آموزشی مهارتی متناسب با پتانسیل‌های روستایی	Kn3	
7	بالا رفتن ارزش ریالی اراضی در روستاها، ویلاسازی غیرمتعارف و تغییر کاربری اراضی جنگلی	Se1	امنیت و حفاظت
2	آتش‌سوزی و حریق در جنگل به شیوه‌های مختلف به ویژه سرایت از اراضی کشاورزی هم‌مرز	Se2	کاربری اراضی
1	هجوم آفات و بیماری‌های جنگلی	Se3	
6	عدم تناسب تعداد قرقبانان با وسعت عرصه مورد حفاظت	Ma1	نیروی انسانی
2	ضعف مدیریت حفاظتی و پایین بودن دغدغه حفاظتی قرقبانان در منطقه	Ma2	حفاظت از جنگل
4	عدم انگیزه نیروهای حفاظتی جهت مقابله با قاچاقچیان به دلیل شرایط نامناسب شغلی	Ma3	
4	عدم برنامه‌ریزی در استفاده از چوب‌های کف جنگل	Or1	مدیریت سازمانی و هماهنگی بین دستگاهی
1	عدم بهره‌برداری مناسب از پتانسیل ایستگاه‌های سرچنگلبانی	Or2	
9	عدم مسئولیت‌پذیری سایر سازمان‌های دولتی در مدیریت جنگل‌های هیرکانی	Or3	
1	وجود مسیرهای فرعی زمینه‌ساز قاچاق چوب در جنگل و عدم مدیریت مناسب آن	Or4	
5	کمبود اعتبارات دولتی در تکمیل تجهیزات لجستیکی حفاظت از جنگل	Po1	سیاستگذاری بالادستی
15	ناکافی بودن حمایت دولت در پرداخت تسهیلات مشاغل روستایی	Po2	
6	عدم تناسب فرصت‌های شغلی مورد حمایت دولت با پتانسیل‌های روستایی	Po3	
1	دخالت افراد بالادستی و اعمال فشار در نحوه مدیریت جنگل	Po4	
5	عدم برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مناسب در مدیریت حفاظتی جنگل	Po5	
5	عدم مدیریت سازمانی مناسب و کارآمد جنگل در قالب جنگلداری اجتماعی	Po6	
2	بازدارنده نبودن جریمه‌های دولت در تخلفات ایجاد شده	Mo1	نظارت و بازدارندگی
5	نظارت ناکافی و بدون برنامه بر مدیریت حفاظتی جنگل به دلیل محدودیت منابع خودرویی و تأسیسات نامناسب	Mo2	
8	وجود اماکن غیرقانونی دپوی چوب و نامشخص بودن متولی نظارت آن	Mo3	

«سیاستگذاری بالادستی» با بیشترین مقدار عددی به دست آمده از بااهمیت‌ترین و مقوله‌های «نیروی انسانی حفاظت از جنگل»، «مدیریت سازمانی و هماهنگی بین دستگاهی» و «امنیت و حفاظت کاربری اراضی» به ترتیب کم اهمیت‌ترین چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های منطقه مورد مطالعه نشانه‌های روند بوده است (جدول ۳). همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد هرچه اهمیت مقوله‌ها در مدیریت جنگل‌های هیرکانی منطقه بیشتر می‌شود، اندازه قطر دایره بزرگ‌تر و در فاصله نزدیک‌تری از حول محور مرکزی قرار گرفته‌اند.

مقوله‌های گزینشی و الگوی نهایی سطح چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی در حوزه ۸۶ (کدگذاری انتخابی): در این مرحله با کنار هم قرار دادن نوع چالش‌ها حول محور مرکزی مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی حوزه ۸۶ با توجه به محاسبه مقدار نسبت تکرار مقوله‌ها به تعداد آن‌ها، یک روایت تئوریک و نظامند طراحی گردید (شکل ۲). به بیان دیگر، چهار مقوله «درآمد و معیشت در روستاها»، «جلب مشارکت اجتماعی و رضایت‌مندی جوامع محلی»، «بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل» و

بر این اساس مقوله‌هایی که نسبت تکرار شاخص‌ها به تعداد آن‌ها در فاصله نزدیک‌تری از مرکز قرار گرفته‌اند، اهمیت بیشتری در مدیریت حفاظتی جنگل‌های منطقه مورد مطالعه داشته است.

جدول ۳- تعیین میزان اهمیت چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی حوزه ۸۶

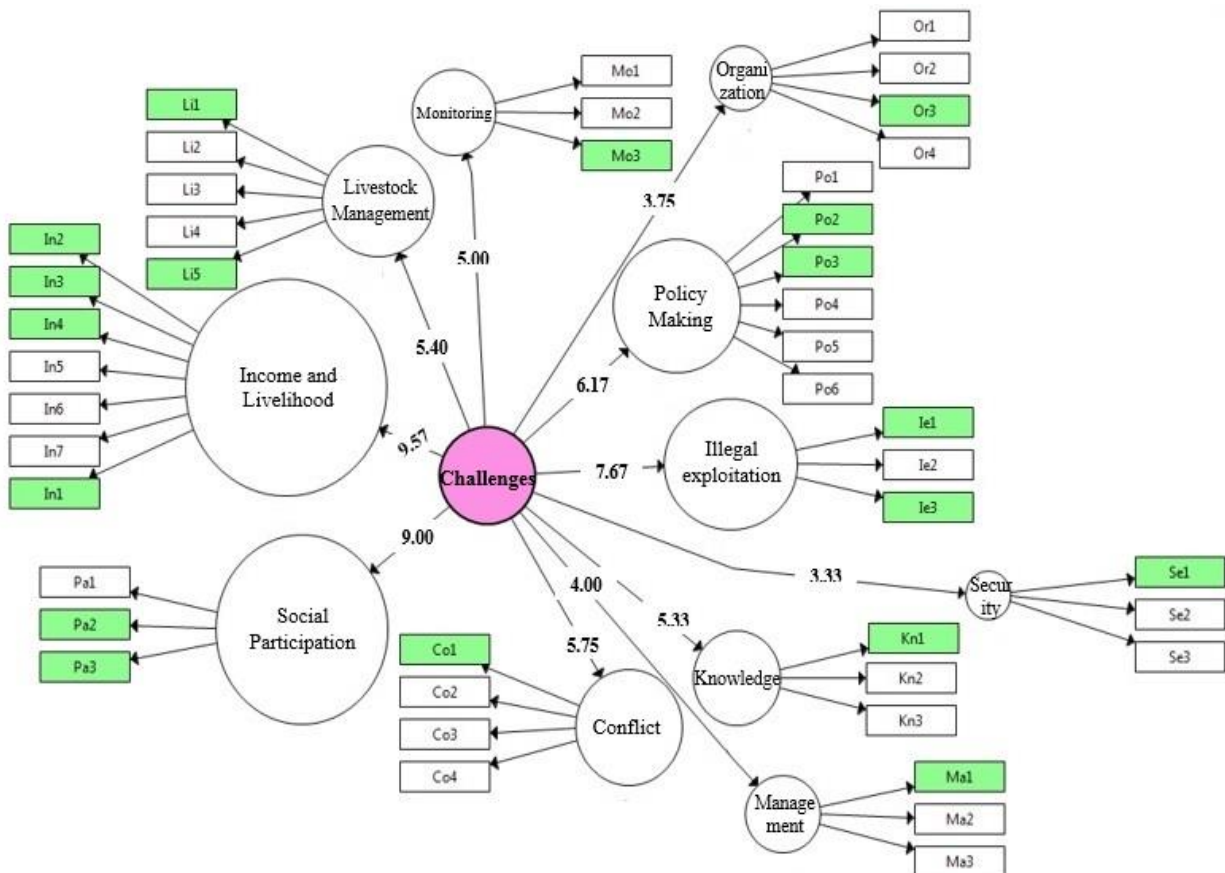
Table 3. Determining the importance of the challenges of conservation management of Hyrcanian forests in the 86th basin

رتبه	نسبت تکرار به تعداد شاخص***	درصد تکرار	تعداد تکرار**	درصد فراوانی در شاخص	تعداد شاخص*	نوع چالش
1	9.57	24.63	67	15.91	۷	درآمد و معیشت در روستاها
6	5.40	9.93	27	11.36	۵	نگهداری دام و دام‌سراها در جنگل
3	7.67	8.46	23	6.82	۳	بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل
2	9	9.93	27	6.82	۳	جلب مشارکت اجتماعی و رضایتمندی جوامع محلی
5	5.75	8.46	23	9.09	۴	مدیریت تعارضات و اعتماد اجتماعی
7	5.33	5.88	16	6.82	۳	سطح دانش و مهارت جوامع محلی
11	3.33	3.68	10	6.82	۳	امنیت و حفاظت کاربری اراضی
9	4	4.41	12	6.82	۳	نیروی انسانی حفاظت از جنگل
10	3.75	5.51	15	9.09	۴	مدیریت سازمانی و هماهنگی بین دستگاهی
4	6.17	13.60	37	13.64	۶	سیاستگذاری بالادستی
8	5	5.51	15	6.82	۳	نظارت و بازدارندگی

* تعداد کل شاخص‌های نهایی ۴۴ مقوله می‌باشد.

** تعداد کل شاخص‌ها با تکرار ۲۷۲ مقوله می‌باشد.

*** مقادیر ارائه شده در روابط شکل ۲ بر اساس مقدار به دست آمده از نسبت تکرار شاخص‌ها به تعداد آن‌ها است.



شکل ۲- الگوی نهایی مقوله‌های گزینشی از چالش‌های مدیریت حفاظتی جنگل‌های هیرکانی حوزه ۸۶

Figure 2. The final model of the selective categories of the challenges of protection management of Hyrcanian forests in the 86th basin

بحث

و دادوستدهای غیرقانونی آن باشد. در همین راستا Danlami (۲۰۱۹) و Chivuraise و همکاران (۲۰۱۶) معتقدند سطح قیمت هیزم در الگوهای مصرف روستاییان با انگیزه کسب درآمد مؤثر است. از طرفی، برداشت غیرقانونی چوب و هیزم زمینه را برای سوء استفاده دلالان فراهم نموده و باعث می‌شود محصولات چوبی جمع‌آوری شده از جنگل زیرقیمت از آن‌ها خریداری شود (Pacheco et al., 2016). تعداد کارگاه‌های غیرقانونی تولید ذغال در روستاهای منطقه مورد مطالعه عامل دیگری است که در ادامه فرآیند قاچاق چوب و خروج واریزه‌های چوبی از جنگل اتفاق می‌افتد که در اغلب موارد منشأ درآمدی و معیشتی دارد. به طوری که مطالعات متعددی سوزاندن چوب‌های جنگلی برای تهیه ذغال را از مهم‌ترین عوامل تخریب جنگل دانسته و معتقدند فقر و سطح پایین معیشتی افراد آن را تشدید می‌کند (Jagger & Kittner, 2017; Koech, 2020).

همپوشانی در تصمیم‌گیری‌های کلان و سیاست‌گذاری‌های بالادستی دولت در تزیق اعتبارات به دستگاه‌های تکلیف شده از جمله بنیاد برکت، کمیته امداد امام خمینی (ره)، میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی جهت حمایت از کسب‌وکارهای روستایی از طریق پرداخت تسهیلات عامل مهم دیگری است که به دلایلی همچون عدم تناسب فرصت‌های شغلی مورد حمایت دولت با پتانسیل‌های روستایی و همچنین نظارت ضعیف بر پایداری مشاغل ایجاد شده در سطوح مختلف در روستاها، تأثیر چندانی در اقتصاد روستایی نداشته است. در واقع تدوین سند راهبردی دگردیسی کسب‌وکارهای روستایی می‌تواند ضمن هماهنگی درون‌دستگاهی و تعریف وظایف حمایتی هر یک از سازمان‌ها، مسیر حمایت و پشتیبانی تسهیلاتی مشخص و تعیین خواهد شد.

در دهه اخیر پروژه‌ها و طرح‌های مختلفی در زمینه جلب مشارکت جوامع محلی به صورت ملی و استانی صورت گرفته است، اما آنچه که از میزان موفقیت

نتایج نشان داد که چهار عامل درآمد و معیشت در روستاها، جلب مشارکت اجتماعی و رضایت‌مندی جوامع محلی، بهره‌برداری غیرقانونی از جنگل و همچنین سیاست‌گذاری بالادستی به‌عنوان مهم‌ترین چالش‌های مدیریت حفاظتی در مدیریت جنگل‌های هیرکانی حوزه ۸۶ استان گلستان معرفی شده است. در این راستا، Giliba و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقات خود بیان داشتند که جایگزین نمودن منابع درآمدی و معیشتی در مدیریت جنگل‌ها یکی از راهکارهای حفاظت از جنگل و کاهش وابستگی افراد به جنگل است. مطالعات مختلف نشان دادند که حکمرانی جنگل به صورت جنگل‌داری اجتماعی می‌تواند وضعیت اشتغال و درآمد را در بین جوامع روستایی جنگل‌نشین بهبود ببخشد (Essoungong et al., 2019; Hajjar et al., 2021; Marnelly et al., 2023). لذا با سیاست‌گذاری حمایتی دولت در امر اشتغال‌زایی و پشتیبانی تسهیلاتی و فیزیکی آن می‌توان با کاهش میزان بیکاری (Ujih et al., 2016)، در جلوگیری از بهره‌برداری‌های غیرقانونی گام اثرگذاری برداشت. با توجه به مدیریت تک‌بعدی حفاظت از عرصه‌های جنگلی توسط دولت، روند تخریبی جنگل‌ها نشان از آن دارد که سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته متمرکز بالا به پایین موفقیت چندانی نداشته است. در واقع عدم به مشارکت گرفتن مردم و تشکل‌های محلی در مدیریت جنگل‌ها، عاملی برای شیوه‌های مختلف تخریب جنگل‌ها در روستاها می‌شوند (Giliba et al., 2011; Sayasane et al., 2016; Wong et al., 2020).

قطع درختان جنگلی و خروج غیرقانونی چوب‌آلات از جنگل به صورت واریزه‌های هیزمی ریز و درشت و همچنین به شکل الوارهای منظم و فروش آن در بازارهای غیررسمی، مهم‌ترین عامل تخریبی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود. این یافته می‌تواند ناشی از رونق بازار و افزایش قیمت چوب

نتیجه‌گیری کلی

شناسایی پتانسیل‌های درآمدزا به تفکیک روستاها در ابعاد مختلف صنعت، کشاورزی و باغبانی، اکوتوریسم و بوم‌گردی و بازنویسی طرح‌های جنگلداری متناسب با شرایط اکولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، و به دنبال آن سرمایه‌گذاری هدفمند با ارائه تسهیلات کم‌بهره در جهت رونق و پایداری کسب‌وکارهای روستایی از مهم‌ترین پیشنهاد تحقیق حاضر است. از این رو ضرورت برگزاری دوره‌ها و کلاس‌های آموزشی مهارت‌محور با هدف ایجاد کارآفرینی در روستاها مضاعف خواهد شد. شناسایی متخلفین عرصه‌های جنگلی به تفکیک روستا و برنامه‌ریزی در جهت بکارگیری آن‌ها در معادن و کارخانجات و ارائه مجوز اشتغال در محدوده روستا بر اساس احراز توانایی افراد، از توصیه‌های دیگری است که می‌توان حکمرانی در عرصه‌های جنگلی را به حد مطلوبی رساند. شناسایی اماکن غیرقانونی دپوی چوب و دادوستدهای حاصل از آن و همچنین گارگاه‌های بدون مجوز ذغال چوب و تعیین دستگاه متولی پیگیر فعالیت‌های مربوط به آن یکی از پیشنهادات این تحقیق است که می‌توان بر اساس تدوین دستورالعمل تولید و عرضه ذغال چوب در بازار در جهت جلوگیری از فعالیت‌های غیرقانونی اقدام لازم صورت داد.

سیاسگزاری

از کارشناسان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، دهیاران، اعضای شورای اسلامی و جوامع محلی روستاهای توسکستان، قرن‌آباد، تقرتیه و جعفرآباد به دلیل همکاری صادقانه در راستای دستیابی به دقت در نتایج تحقیق حاضر، تشکر و قدردانی می‌شود.

پروژه‌های مذکور می‌کاهد عدم برنامه‌ریزی منسجم و بلندمدت سازمان‌های متولی به ویژه یگان حفاظت در سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در امر حفاظت از جنگل‌ها از طریق مشارکت خودجوش مردمی، مشخص نبودن جایگاه جوامع محلی در آن‌ها (Ranjit, 2012; Ombogoh *et al.*, 2022) و همچنین انجام فعالیت‌های سلیقه‌ای کوتاه‌مدت مدیران و عدم ادامه و اجرای آن در مدیریت بعدی در این بخش است. از طرفی عدم تناسب اعتبارات پیش‌بینی‌شده و تخصیص‌یافته در حفاظت از جنگل‌ها با توجه به تراکم نیروهای حفاظتی در این بخش و همچنین ضرورت فراهم بودن تجهیزات لجستیکی، عامل دیگری است که مدیریت حفاظتی در جنگل‌ها را با مشکل مواجه می‌نماید؛ بنابراین حفاظت فیزیکی از این عرصه‌ها نیازمند امکانات و تجهیزات بیشتر است (Fallah *et al.*, 2018; Moayeri, 2023). به طوری که بخش زیادی از اعتبارات در جلوگیری از تخلفات در عرصه‌های جنگلی هزینه شده و برنامه‌ریزی در زمینه پیشگیری و فرهنگ‌سازی عمومی در تشکیلات حفاظت از جنگل‌ها کم‌رنگ است. به بیان دیگر، دو نکته وجود دارد که یکی مربوط به کمبود اعتبارات در بخش حفاظت از جنگل‌ها است که باعث شده است تا یگان حفاظت از منابع طبیعی نتواند وظیفه‌مندی تشکیلاتی خود را در راستای فرهنگ‌سازی و فعالیت‌های آموزشی-اجتماعی به حد مطلوب رسانده و خود را مجهز به تجهیزات مقابله‌ای و کنترلی سیستم‌های مدرن دنیا نماید. دیگر این که عدم تناسب هزینه‌کرد اعتبارات تخصیص‌یافته در دو بخش پیشگیری و مقابله با بهره‌برداری غیرقانونی از عرصه‌های جنگلی، عملیات مقابله‌ای در حفاظت از جنگل نسبت به فعالیت‌های پیشگیری بیشتر صورت گرفته و باعث هزرت کوتاه‌مدت منابع دولتی می‌گردد (Moayeri, 2023).

References

Abdollahi, F., Banj Shafiei, A., Beygi Heidarlou, H., & Mousavi Mirkala, S.R. (2024). Analysis of forest stakeholders' attitudes toward participatory management

in the Sardasht forests, Iranian northern Zagros. *Forest Research and Development*, 9(4), 437-461. <https://doi.org/10.30466/JFRD.2023.54848.1686> (In Persian)

- Amini, J., Malek Mohammadi, B., & Jafari, H.R. (2020). Elaboration of wetlands management framework based on the ecological approach (case study: Anzali International Wetland). *Environmental Science and Technology Quarterly*, 23(10), 119-132. <https://doi.org/10.30495/jest.2022.50015.49> (In Persian)
- Azizi, K., Rastgar, S., Heydari, G., & Jafarian, Z. (2022). Structural modeling the effects of ecotourism based on local community approach (Case study: Baladeh-e-Noor Summer Rangelands). *Journal of Rangeland*, 16(4), 860-875. <https://doi.org/20.1001.1.20080891.1401.16.4.14.2> (In Persian)
- Azma, F., Kargozar, B., & Saeidi, P. (2023). An analysis of entrepreneurial intuition in small and medium businesses under economic uncertainty. *Journal of Studies in Entrepreneurship and Sustainable Agricultural Development*, 10(4), 155-178. <https://doi.org/10.22069/JEAD.2022.20824.1671> (In Persian)
- Beckline, M., Manan, A., Dominic, N., Mukete, N., & Hu, Y. (2022). Patterns and challenges of forest resources conservation in Cameroon. *Open Access Library Journal*, 9(5), 1-13. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108683>
- Beckline, M., Yujun, S., Etongo, D., Saeed, S., Mukete, N., & Richard, T. (2018). Cameroon must focus on SDGs in its economic development plans. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 60(2), 25-32. <https://doi.org/10.1080/00139157.2018.1419008>
- Castro, L. M., & Lechthaler, F. (2022). The contribution of bio-economic assessments to better informed land-use decision making: An overview. *Ecological Engineering*, 174, 106449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106449>
- Chan, C. K., Ling, G. H. T., Ho, C. S., & Kanniah, K. D. (2023). Sustainable Forest Management and Effective Land Use Policies for Mitigating Forest Loss: The Case of Malaysia. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 799-804. <https://doi.org/10.3303/CET23106134>
- Chivuraise, C., Chamboko, T., & Chagwiza, G. (2016). An assessment of factors influencing forest harvesting in smallholder tobacco production in Hurungwe District, Zimbabwe: An application of binary logistic regression model. *Advances in Agriculture*, 2016(1), 4186089. <https://doi.org/10.1155/2016/4186089>
- Danlami, A. H. (2019). Assessment of factors influencing firewood consumption in Bauchi state, Nigeria. *Journal of Sustainability Science and Management*, 14(1), 99-109.
- Ekoungoulou, R., Folega, F., Mukete, B., Ifo, S. A., Loumeto, J. J., Liu, X. D., & Niu, S. K. (2018). Assessing the effectiveness of protected areas on floristic diversity in tropical forests. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(1), 837-853. <http://doi.org/10.15666/aeer/1601837853>
- Ernst, C., Mayaux, P., Verhegghen, A., Bodart, C., Christophe, M., & Defourny, P. (2013). National forest cover change in Congo Basin: deforestation, reforestation, degradation and regeneration for the years 1990, 2000 and 2005. *Global Change Biology*, 19(4), 1173-1187. <https://doi.org/10.1111/gcb.12092>
- Essougong, U. P. K., Foundjem-Tita, D., & Minang, P. A. (2019). Addressing equity in community forestry. *Ecology and Society*, 24(1), 9. <https://doi.org/10.5751/ES-10656-240109>
- Fallah, A., Imani Rastabi, M., & Nazariani, N. (2018). Investigation Some Affecting Indicators on Participation in the Sustainable Management of Forests (Case study: traditional area of Kalgachi, Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Forest Research and Development*, 4(3), 273-288. (In Persian)
- General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province. 2021. *Studies on the semi-detailed plan of sustainable management of forests in the north of the country in the 86th district of Golestan province*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran's Natural Resources and Watershed Organization. (In Persian)
- Giakoumi, E., & Arabatzis, G. (2023). *Financing for the protection and development of forests and the forest environment in Greece*. In E3S Web of

- Conferences (Vol. 436, p. 09003). EDP Sciences.
- Giliba, R. A., Mafuru, C. S., Paul, M., Kayombo, C. J., Kashindy, A. M., Chirenje, L. I., & Musamba, E. B. (2011). Human activities influencing deforestation on meru catchment forest Reserve, Tanzania. *Journal of Human Ecology*, 33(1), 17-20. <https://doi.org/10.1080/09709274.2011.11906344>
- Hajjar, R., Oldekop, J. A., Cronkleton, P., Newton, P., Russell, A. J., & Zhou, W. (2021). A global analysis of the social and environmental outcomes of community forests. *Nature Sustainability*, 4(3), 216-224. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00633-y>
- Heravi, A. F., Zali, N., & Rezayan Ghiehashi, A. (2019). Investigating the challenges of forest ecosystem by causal layered analysis (CLA) and its role in sustainable development of region. *Journal of Strategic Management and Future Studies*, 1(2), 147-192. (In Persian)
- Jagger, P., & Kittner, N. (2017). Deforestation and biomass fuel dynamics in Uganda. *Biomass and Bioenergy*, 105, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.005>
- Koeh, C. K. (2020). Household factors affecting the implementation of forest conservation strategies. A case of South Nandi forest, Nandi County, Kenya. *Open Journal of Social Sciences*, 8, 125-144. <https://doi.org/10.4236/jss.2020.86012>
- Luyet, V., Schlaepfer, R., Parlange, M. B., & Buttler, A. (2012). A framework to implement stakeholder participation in environmental projects. *Journal of Environmental Management*, 111, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.026>
- Marnelly, T. R., Dahril, T., Saam, Z., & Nofrizal, N. (2023). Ecological and socio-economic factors on the rate of participation and sustainable forest management. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(3), 92-101. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14369>
- Maukonen, P., Donn, P., & Snook, L. K. (2020). Addressing potential conflict using participatory mapping: Collection of forest foods from timber trees around industrial concessions in Cameroon. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 72. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00072>
- Moayeri, M.H. (2023). *Identifying factors affecting wood smuggling in the forests of Golestan Province: an analysis of strategies and protection requirements in the future*. Research project of Forestry Department of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 135pp. (In Persian)
- Mousavi Nokandeh, S.M., Moayeri, M.H., & Salmanmahiny, A. (2015). Stakeholders and criteria for their identification in natural resources management (Case study: Golestan province forests). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 21(4), 23-40. <https://doi.org/20.1001.1.23222077.1393.214.2.3> (In Persian)
- Nath, T. K., Inoue, M., & Pretty, J. (2010). Formation and function of social capital for forest resource management and the improved livelihoods of indigenous people in Bangladesh. *Journal of Rural and Community Development*, 5(3), 104-122.
- Niedziałkowski, K., & Chmielewski, P. (2023). Challenging the dominant path of forest policy? Bottom-up, citizen forest management initiatives in a top-down governance context in Poland. *Forest Policy and Economics*, 154, 103009. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.10300>
- Nijnik, A., Nijnik, M., Kopyi, S., Zahvoyska, L., Sarkki, S., Kopyi, L., & Miller, D. (2017). Identifying and understanding attitudinal diversity on multi-functional changes in Ukrainian Carpathians. *Climate Research*, 73, 45-46. <https://doi.org/10.3354/cr01448>
- Nzunda, N. G., Munishi, P. K. T., Soka, G. E., & Monjare, J. F. (2013). Influence of socio-economic factors on land use and vegetation cover changes in and around Kagoma forest reserve in Tanzania. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 6(5), 480-488. <https://doi.org/10.4314/ejesm.v6i5.5>
- Ombogoh, D. B., Mwangi, E., & Larson, A. M. (2022). Community participation in forest and water management planning in Kenya: challenges and opportunities. *Forests, Trees and Livelihoods*, 31(2), 104-122. <https://doi.org/10.1080/14728028.2022.2059790>
- Pacheco, P., Cerutti, P. O., Edwards, D. P., Lescuyer, G., Mejia, E., Navarro, G., & Sist,

- P. (2016). *Multiple and intertwined impacts of illegal forest activities*. IUFRO.
- Rajora, O. P., & Mosseler, A. (2001). Challenges and opportunities for conservation of forest genetic resources. *Euphytica*, 118, 197-212. <https://doi.org/10.1023/A:1004150525384>
- Ranjit, Y. (2012). Economic impact of people's participation in forest management (a case study of KabhrePalanchwok, Nepal). *Economic Journal of Development Issues*, 1, 139-151.
- Rezaei, F., Azma, F., Samiee, R., & Shojaei, S. (2023). An analysis of academic entrepreneurship based on capability in Golestan Islamic Azad university based on foundation data theory. *Journal of Studies in Entrepreneurship and Sustainable Agricultural Development*, 10(3), 117-142. <https://doi.org/10.22069/JEAD.2022.20455.1624> (In Persian)
- Roy, J., Hossen, S., Nath, T.K., & Hoque, R. (2021). Social capital and forest conservation: Do they have any relationship? *International Journal of Biosciences*, 18(2), 242-251. <https://doi.org/10.12692/ijb/18.2.242-251>
- Savari, M., & Naghi Bayranvand, F. (2020). The role of social capital on self-efficacy of rural women in Zagros forest conservation by mediating environmental awareness. *Environmental Education and Sustainable Development*, 9(1), 59-80. <https://doi.org/10.39473/EE.2020.7227> (In Persian)
- Sayasane, R., Kawasaki, A., Shrestha, S., & Takamatsu, M. (2016). Assessment of potential impacts of climate and land use changes on stream flow: a case study of the Nam Xong watershed in Lao PDR. *Journal of Water and Climate Change*, 7(1), 184-197. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.050>
- Shahbaz, B., Ali, T., & Suleri, A. Q. (2011). Dilemmas and challenges in forest conservation and development interventions: Case of Northwest Pakistan. *Forest Policy and Economics*, 13(6), 473-478. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.05.002>
- Ujih, U.O., Sabiu, N., Musa, D.M., & Azare, I.M. (2016). Effects of fuel wood exploitation on the environment: a case study of Nasarawa local government area, Nasarawa state, Nigeria. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(1), 195-201.
- Wong, G. Y., Moeliono, M., Bong, I. W., Pham, T. T., Sahide, M. A., Naito, D., & Brockhaus, M. (2020). Social forestry in Southeast Asia: Evolving interests, discourses and the many notions of equity. *Geoforum*, 117, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.10.010>
- Zhanbossinova, A., Mazhitova, Z., Saktaganova, Z., Atantayeva, B., Kulshanova, A., & Akhmetova, R. (2024). *Forests in Kazakhstan: Issues of conservation and environmental safety*. In E3S Web of Conferences, 524, 02010.

Assessing the impact of crescent-shaped water harvesting systems on increasing soil moisture (Case study: A Part of the Manesht and Qhalarang Region)

Alireza Mohammadi¹, Mohsen Tavakoli^{1*}, Freidoon Soleimani²

1. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

2. Agriculture and Natural Resources Research Center, Ilam, Iran

* Corresponding authors; Email: m.tavakoli@ilam.ac.ir

(Received: 13 January 2025

Revised: 28 February 2025

Accepted: 24 April 2025)

Extended Abstract

Introduction: The depletion of water resources in forested protected areas poses a critical environmental challenge, necessitating innovative watershed management strategies. In this regard, the implementation of water harvesting systems, such as crescent-shaped runoff capture terraces, is of paramount importance for enhancing surface water infiltration and increasing soil moisture retention. The present study investigates the effects of these systems on runoff infiltration and soil moisture content within a part of the Manesht and Qhalarang protected area in Ilam Province. The objective of this research is to assess the impact of crescent-shaped water harvesting terraces on soil moisture storage and to compare it with the natural conditions (control area) in sloped terrains.

Materials and methods: This study was conducted experimentally using a randomized block design. In the first step, several rows of crescent-shaped water harvesting terraces were constructed in a zigzag pattern along the sloping terrain of the study area. These systems were designed such that the runoff between two adjacent water harvesting systems was captured and managed by the lower-row terrace. Following the installation of the systems, soil moisture content was measured at three locations in the control area and at 15 locations within the treatment area (various points of the crescent-shaped water harvesting system) after five precipitation events, from November 2022 to May 2023. Soil moisture measurements were taken at two depths: 0-15 cm and 15-30 cm, and the data were recorded accordingly. Data analysis was performed using the SAS software, and mean comparisons were conducted using the Duncan's Multiple Range Test.

Results and Discussion: The results of this study indicated that depth, system type, and precipitation amount significantly affect soil moisture retention. Specifically, the crescent-shaped system at a depth of 15 cm exhibited the highest soil moisture retention compared to the other systems. In particular, at the 15 cm depth, soil moisture in the crescent-shaped system increased by approximately 15% compared to the control area. Additionally, the results revealed that the water harvesting point inside the pit had the highest soil moisture retention, with an average of 27.38%, while this value did not show a statistically significant difference from the water harvesting point at the top of the ridge, which had an average of 36.50%. Further analysis of the interactions between different water harvesting points at varying depths indicated that the point inside the pit, at a depth of 15 cm, exhibited the highest soil moisture retention, with an average of 51.70%. Conversely, the lowest soil moisture retention at the 30 cm depth was observed at the point located on the ridge, with an average of 20.49%. These findings suggest that the crescent-shaped system, particularly at the water harvesting points inside the pit, plays a critical role in enhancing soil moisture retention.

Conclusion: The results of this study clearly demonstrated that the use of crescent-shaped water harvesting systems can significantly contribute to soil moisture retention in sloped terrains. Specifically, the water harvesting points inside the pit exhibited the greatest impact on increasing soil moisture retention compared to other locations. Additionally, the increase in soil depth generally led to a reduction in soil moisture retention across all treatments. Furthermore, data analysis revealed that the effectiveness of the water harvesting systems in improving soil moisture retention is influenced by factors such as precipitation intensity, soil depth, and the type of system employed. In instances of sufficient precipitation, the crescent-shaped system, particularly inside the pit, played a prominent role in collecting and storing water, thereby significantly increasing soil moisture compared to natural conditions (control area). These findings suggest that the crescent-shaped system can be a highly effective tool in improving soil moisture conditions in arid and semi-arid regions facing water scarcity. The results emphasize that the design and application of water harvesting systems can serve as an efficient and sustainable strategy for water resource management and ecological restoration in forested areas, particularly in regions with limited precipitation and steep slopes. Such systems offer a promising solution for addressing drought crises and mitigating the depletion of water resources.

Keywords: Soil moisture, Runoff, Water harvesting systems, Sloped terrains, Infiltration

Citation: Mohammadi, A., Tavakoli, M., & Soleimani, F. (2025). Assessing the impact of crescent-shaped water harvesting systems on increasing soil moisture (Case study: A Part of the Manesht and Qhalarang Region). *Integrated Watershed Management*, 5(2), 147-159. doi= 10.22034/iwm.2025.2050619.1202

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>).



بررسی تأثیر سامانه‌های هلالی آبگیر در افزایش رطوبت خاک (مطالعه موردی: بخشی از منطقه مانشت و قلا رنگ)

علی‌رضا محمدی^۱، محسن توکلی^{۱*}، فریدون سلیمانی^۲

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، ایلام، ایران

* نویسنده مسئول: m.tavakoli@ilam.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

چکیده مبسوط

مقدمه: کاهش منابع آب در مناطق جنگلی، به‌ویژه در نواحی حفاظت‌شده، یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی است که نیازمند ارائه راه‌کارهای مدیریتی نوین می‌باشد. در این راستا، استفاده از سامانه‌های مدیریت آب مانند سطوح هلالی آبگیر برای بهبود نفوذ رواناب و افزایش ذخیره رطوبت خاک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، اثرات این سامانه‌ها بر نفوذ رواناب و میزان رطوبت خاک در بخشی از منطقه حفاظت‌شده مانشت و قلا رنگ در استان ایلام بررسی شد. این پژوهش به‌منظور ارزیابی تأثیر سطوح هلالی آبگیر بر ذخیره رطوبت خاک و مقایسه آن با وضعیت طبیعی (ناحیه شاهد) در مناطق شیب‌دار صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر به‌صورت آزمایشی و با استفاده از طراحی بلوک‌های تصادفی انجام شد. ابتدا چندین ردیف از سامانه‌های سطوح هلالی آبگیر با الگوی شکسته و پیوسته در دامنه‌های شیب‌دار منطقه موردنظر احداث شد. این سامانه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شدند که رواناب حفاصل دو سامانه آبگیر کناری توسط سامانه آبگیر ردیف پایینی جمع‌آوری و مهار شود. پس از احداث سامانه‌ها، از آبان‌ماه ۱۴۰۱ تا اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۲، میزان رطوبت خاک در سه نقطه از عرصه شاهد و ۱۵ نقطه از عرصه تیمار (نقاط مختلف سیستم سطوح هلالی آبگیر) پس از پنج واقعه بارش اندازه‌گیری شد. برای این منظور، اندازه‌گیری رطوبت خاک در دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری سطح زمین انجام و داده‌ها ثبت گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث: نتایج این تحقیق نشان داد که عمق، نوع سامانه و میزان بارندگی تأثیر معنی‌داری بر ذخیره رطوبت خاک دارند. به‌ویژه، سامانه هلالی در عمق ۱۵ سانتی‌متری بیشترین ذخیره رطوبت را در مقایسه با سایر سامانه‌ها به خود اختصاص داد. به‌طور خاص، در عمق ۱۵ سانتی‌متری، ذخیره رطوبت خاک در سامانه هلالی نسبت به عرصه شاهد حدود ۱۵ درصد افزایش داشت. همچنین، نتایج نشان داد که نقطه استحصال داخل چاله با میانگین ۳۸/۲۷ درصد، بیشترین ذخیره رطوبت خاک را داشت، در حالی که این میزان با نقطه استحصال در انتهای پشته که میانگین ۳۶/۵۰ درصد بود، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. بررسی اثرات متقابل دوگانه نقطه‌های استحصال آب باران در عمق‌های مختلف نشان داد که نقطه استحصال داخل چاله در عمق ۱۵ سانتی‌متری با میانگین ۵۱/۷۰ درصد، بیشترین ذخیره رطوبت خاک را به خود اختصاص داد. همچنین، کمترین ذخیره رطوبت خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متری در نقطه استحصال روی پشته با میانگین ۲۰/۴۹ درصد مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند که سامانه هلالی به‌ویژه در نقاط استحصال داخل چاله، نقش مهمی در افزایش ذخیره رطوبت خاک ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان داد که استفاده از سامانه‌های سطوح هلالی آبگیر می‌تواند به‌طور مؤثری به ذخیره رطوبت خاک در مناطق شیب‌دار کمک کند. به‌ویژه نقاط استحصال داخل چاله در مقایسه با سایر نقاط، بیشترین تأثیر را در افزایش ذخیره رطوبت خاک داشته‌اند. همچنین، افزایش عمق خاک به‌طور کلی موجب کاهش ذخیره رطوبت در همه تیمارها شد. علاوه بر این، تحلیل داده‌ها نشان داد که تأثیر سامانه‌های آبگیر بر ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر میزان بارندگی، عمق خاک و نوع سامانه قرار دارد. در شرایطی که بارش باران کافی بوده است، سامانه هلالی به‌ویژه در نقاط داخل چاله، نقش بارزی در جمع‌آوری و نگهداری آب ایفا کرده و توانسته است رطوبت خاک را در مقایسه با شرایط طبیعی (ناحیه شاهد) به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سامانه هلالی می‌تواند در بهبود وضعیت رطوبت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، کمک شایانی کند. این یافته‌ها تأکید دارند که طراحی و استفاده از سامانه‌های آبگیر در مدیریت منابع آب و بهبود شرایط اکولوژیکی مناطق جنگلی، به‌ویژه در نواحی با بارش محدود و شیب‌های بالا، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد و پایدار در مقابله با بحران‌های خشکسالی و کاهش منابع آب مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، رواناب، سامانه‌های هلالی آبگیر، مناطق شیب‌دار، نفوذ

استناد: محمدی، ع.، توکلی، م. و سلیمانی، ف. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر سامانه‌های هلالی آبگیر در افزایش رطوبت خاک (مطالعه موردی: بخشی از منطقه مانشت و قلا رنگ). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۱۵۹-۱۴۷.

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

رطوبت خاک به آبی که بین ذرات خاک موجود است اطلاق می‌شود و نقش مهمی در آب‌شناسی و احیای پوشش گیاهی دارد. این عامل الگوهای مکانی و زمانی نفوذ آب، تبخیر و توزیع پوشش گیاهی را کنترل می‌کند (Penna et al., 2013; Chaney et al., 2015). با این حال، رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، بسیار متفاوت است (Wang et al., 2015; Xu et al., 2021)، که به شدت تحت تأثیر توپوگرافی، دما، کاربری اراضی، نوع پوشش گیاهی، تقاضای آب و ویژگی‌های خاک قرار دارد (Kassaye et al., 2021). کمبود منابع آبی، بارش‌های غیرقابل پیش‌بینی و تنش آبی در خاک، باعث می‌شود که شیوه‌های مدیریت منابع آب، از جمله جمع‌آوری آب باران، به‌عنوان اقدامات حیاتی برای تأمین آب و تولید مواد غذایی اهمیت زیادی پیدا کنند (Mucheru-Muna et al., 2017). جمع‌آوری آب ناشی از بارش‌ها، به جای رها شدن و ایجاد فرسایش، به‌عنوان روشی امیدوارکننده برای تقویت کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی مطرح شده است (Tadros et al., 2021). با بهره‌برداری از بارش‌ها و جلوگیری از روان‌آب‌ها، جمع‌آوری آب نه‌تنها منابع آب را حفظ می‌کند، بلکه اثرات منفی خشکسالی را نیز کاهش می‌دهد. این روش‌ها به‌دلیل توانایی در افزایش دسترسی به منابع آب، به‌ویژه در مناطقی که با چالش کمبود آب مواجه هستند، توجه جهانی زیادی را به خود جلب کرده‌اند (Shaikh and Birajdar, 2024). ذخیره آب باران یک منبع ارزشمند می‌باشد که می‌توان از آن برای پشتیبانی از فعالیت‌های کشاورزی، حمایت از جوامع و حفظ محیط‌زیست محلی استفاده کرد. در نهایت، این روش به کاهش آسیب‌پذیری این مناطق در

برابر اثرات خشکسالی کمک می‌کند (Dile et al., 2013). علاوه‌براین، سیستم‌های جمع‌آوری آب باران در کاهش سیلاب‌ها نقش مهمی دارند (Yannopoulos et al., 2019; Londra et al., 2021).

مدیریت و جمع‌آوری رواناب‌های سطحی می‌تواند از طریق روش‌های مختلف زیست‌سازه‌ای و سازه‌ای مانند پخش سیلاب^۱، کنکور فارو^۲، هلالی آبخیز^۳، چاله فلسی^۴ و دیگر فناوری‌های زیست‌سازه‌ای، انجام شود. به‌طور ویژه، استفاده از هلالی‌های آبخیز به‌عنوان یکی از روش‌های زیست‌سازه‌ای مؤثر در مدیریت و جمع‌آوری نزولات جوی، با هدف اصلاح و احیای مراتع مورد توجه قرار دارد (Ahmadpour et al., 2022). هلالی‌های آبخیز در واقع بانکت‌های افقی و کوتاهی هستند که به‌صورت کم‌انرژی یا قوسی طراحی و ساخته می‌شوند. این ساختارها به‌منظور ایجاد خرده آبخیزهایی طراحی شده‌اند که در جمع‌آوری آب و کنترل رواناب‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کنند (Moghim et al., 2024). مهم‌ترین و بارزترین اهداف ساخت هلالی‌های آبخیز شامل کنترل و ذخیره‌سازی آب‌های سطحی رواناب، افزایش نفوذ آب به درون خاک، کنترل فرسایش و جلوگیری از هدررفت خاک، ایجاد شرایط خرداقلیمی مناسب برای رشد گیاهان و در نهایت، فراهم آوردن بستر مناسب برای اجرای طرح‌های اصلاح و احیای مراتع می‌باشد (Moghim, 2014).

مطالعات متعددی مزایای استفاده از سیستم‌های جمع‌آوری آب را بر افزایش رطوبت خاک و بهبود عملکرد گیاهان نشان داده‌اند. نتایج یک مطالعه در جنگل‌های زاگرس نشان داد که بانکت هلالی موجب افزایش دو برابری رطوبت خاک و احیای درختان خشکیده و کاهش خشکیدگی شده است (Heshmati et al., 2017b). در پژوهشی در روستای کبوده علیا واقع در استان کرمانشاه، از دو نوع عایق (پلاستیک با

- 1- Floodwater Spreading
- 2- Contour Furrow
- 3- Water harvesting
- 4- Half-Moon Pit

آبخیز چدرویه در استان فارس به‌طور معنی‌داری موجب افزایش پوشش گیاهی و بهبود ویژگی‌های خاک شد و در ابعاد بزرگ، تأثیر بیشتری در حفظ رطوبت و تقویت اکوسیستم‌های مرتعی دارند (Moghimi *et al.*, 2024). با توجه به کاهش چشمگیر منابع آبی مناطق جنگلی بلوط در منطقه حفاظت‌شده مانشت و قلازنگ واقع در استان ایلام و همچنین پدیده خشکیدگی این جنگل‌ها (Heshmati *et al.*, 2017a)، لزوم به‌کارگیری راه‌کارهای مؤثر مدیریت منابع آب در این عرصه‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. وقوع خشکسالی‌های مکرر، شیب‌دار بودن اراضی و پایین بودن ظرفیت نگه‌داری آب در خاک، فشار مضاعفی بر پوشش گیاهی و پایداری اکولوژیکی این مناطق وارد می‌کند. در چنین شرایطی، ارزیابی کارایی سامانه‌های آبگیر، به‌ویژه سطوح هلالی آبگیر، در بهبود نفوذ رواناب و افزایش ذخیره رطوبت خاک، از اهمیت بالایی برخوردار است. این سامانه‌ها به‌عنوان یک راه‌کار طبیعی و کم‌هزینه، می‌توانند در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، تسهیل فرایند احیای پوشش گیاهی و ارتقاء پایداری زیست‌بوم‌های جنگلی نقش مؤثری ایفا کنند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی این سامانه‌ها در حفظ رطوبت خاک و کمک به پایداری اکولوژیکی در این منطقه، ضرورتی علمی و کاربردی دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند تأییدی بر کارایی این روش‌ها باشد و زمینه را برای استفاده گسترده‌تر از آن‌ها در بهبود رطوبت خاک و کاهش خشکی در جنگل‌های بلوط این منطقه و سایر جنگل‌های زاگرس را فراهم نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

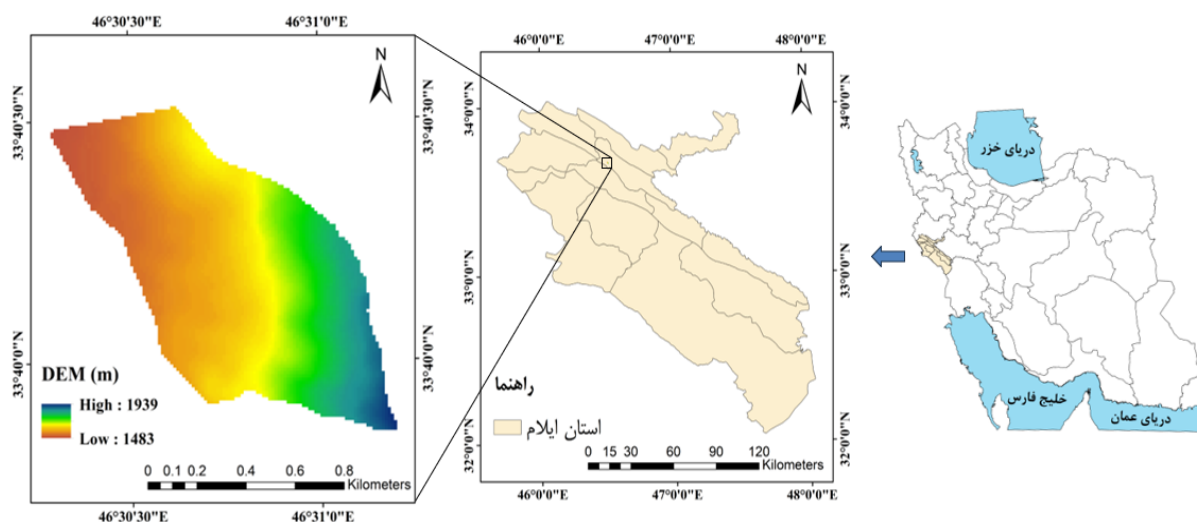
منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، بخشی از منطقه کوهستانی و حفاظت‌شده مانشت و قلازنگ با مساحت

سنگفرش و مخلوط خاک و کاه کوبیده شده) و سه شکل مختلف برای سطوح آبگیر (مسطح، هلالی و لوزی) استفاده شد. طبق نتایج، تیمار عایق با ۹۲ درصد استحصال بارش، بالاترین کارایی را در افزایش رطوبت خاک داشت، در حالی که شکل سامانه تأثیر معنی‌داری بر رطوبت خاک نداشت (Gheitury *et al.*, 2019). نتایج پژوهشی دیگر در بررسی تأثیر پنج تکنیک جمع‌آوری آب (مالچ‌پاشی، کشت مخلوط، موانع سنگی، بندهای خاکی هلالی و L شکل) بر وضعیت رطوبت خاک و عملکرد گیاه سورگوم نشان داد که این تکنیک‌ها به‌طور معنی‌داری بر پارامترهای خاک و گیاه تأثیر می‌گذارند. مالچ‌پاشی بهترین عملکرد را در حفظ رطوبت و بهبود عملکرد گیاه داشت. بندهای خاکی هلالی نیز در ذخیره رطوبت مؤثر بودند (Saeed *et al.*, 2019). در مطالعه‌ای نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های RIM1^۵ (شامل دو ناحیه برداشت آب باران، دو لوله نفوذ و مالچ‌پاشی) و RIM2 (شامل یک ناحیه برداشت آب باران، یک لوله نفوذ و مالچ‌پاشی) منجر به افزایش قابل توجه رطوبت خاک در عمق‌های مختلف شده و به بهبود عملکرد محصول سیب کمک کرده است (Ding *et al.*, 2021). نتایج مطالعه دیگری در مراتع دشتی آهنگران خراسان جنوبی نشان داد که در سال‌های پرباران ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸، اجرای سامانه هلالی آبگیر باعث افزایش پوشش گیاهی نسبت به منطقه شاهد شد، اما در سال‌های خشک ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، این سامانه تأثیر کمی بر افزایش پوشش گیاهی داشت (Rostampour *et al.*, 2023). نتایج مطالعه‌ای در باغ زیتون در بائنا (کوردوبا، اسپانیا) نیز نشان داد که استفاده از سامانه نفوذ آب باران (HRHS^۶) باعث افزایش رطوبت خاک به میزان تقریباً سه برابر و افزایش تولید زیتون شده است (Rojano-Cruz *et al.*, 2023). علاوه بر این، اجرای سامانه‌های هلالی آبگیر در حوزه

5- Rainwater harvesting + Infiltration enhancement + Mulching
6- Hydroinfiltrator Rainwater Harvesting System

بلوط با ۷۰ هکتار اختصاص دارد. براساس داده‌های بلندمدت (۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲) ایستگاه هواشناسی ایلام، متوسط بارش سالانه منطقه ۵۶۷ میلی‌متر است که ۳۸ درصد آن به صورت برف می‌بارد. همچنین اقلیم این منطقه بر اساس روش دومارتن، مدیترانه‌ای و میانگین دمای سالانه آن ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Fathizadeh et al., 2017).

۹۲ هکتار در استان ایلام و در طول جغرافیایی $46^{\circ}31'12''$ تا $46^{\circ}30'16''$ شرقی و عرض جغرافیایی $39^{\circ}33'51''$ تا $33^{\circ}40'31''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه با محدوده ارتفاعی ۱۴۸۳ تا ۱۹۳۹ متر از سطح دریا، دارای ارتفاع متوسط ۱۶۵۶ متر و متوسط شیب ۳۷ درصد می‌باشد. کاربری‌های اراضی غالب در این منطقه شامل جنگل، مرتع مشجر، زراعت دیم و باغ است که عمده مساحت آن به جنگل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان ایلام و کشور ایران
Figure 1- Location of the study area in Ilam province, Iran

عرصه شاهد و سامانه‌های هلالی آبگیر در پلات‌های جنگل بلوط منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. هر سامانه دارای ۵ تا ۷ متر طول، ۰/۵ متر عمق و ۱ متر شعاع بود و ۳/۵ متر با سامانه کناری و ۷ متر با سامانه‌های بالادستی و پایین‌دستی فاصله داشت. پس از آماده‌سازی، اندازه‌گیری رطوبت خاک از آبان‌ماه ۱۴۰۱ تا اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۲، پس از پنج رویداد بارش، به تعداد پنج بار انجام شد. به طوری که پنج روز بعد از هر رویداد بارش در عرصه شاهد، ۶ نمونه از سه نقطه در دو عمق (۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری) و در منطقه تیمار، ۶ نمونه از سه نقطه بین سامانه‌های هلالی در دو عمق جمع‌آوری شد. همچنین، ۲۴ نمونه از سه نقطه مختلف سامانه هلالی (داخل چاله، روی

روش تحقیق

در سال ۱۴۰۱، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام سامانه‌های هلالی آبگیر را در منطقه حفاظت‌شده مانشت و قارنگ احداث کرد. در پژوهش حاضر، دو عرصه انتخاب شد که یکی از آن‌ها دارای سامانه‌های هلالی آبگیر (تیمار) و دیگری یک عرصه طبیعی بدون سامانه (شاهد) بود. تا حد امکان سعی شد که این دو عرصه به لحاظ زمین‌شناسی، بافت خاک، شیب و ارتفاع از سطح دریا به هم نزدیک باشند. در ابتدا، چندین ردیف سامانه هلالی آبگیر با الگوی شکسته و پیوسته در هر دامنه به‌سازی شد تا رواناب بین دو سامانه آبگیر کناری توسط سامانه آبگیر ردیف پایین‌تر جمع‌آوری و مهار گردد. شکل ۲ تصویری از

چهار نمونه برداری دیگر) انجام شد. همچنین به دلیل نزدیکی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ایلام به منطقه مورد مطالعه، اطلاعات ۵ رویداد بارش مربوط به این ایستگاه از اداره کل هواشناسی استان ایلام اخذ گردید که خصوصیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

پشته خاکی و انتهای پشته هلالی) در دو عمق فوق‌الذکر از ۴ سامانه برداشت شد. اندازه‌گیری رطوبت خاک به دو روش برداشت نمونه و محاسبه اختلاف وزنی نمونه تر و خشک‌شده (در اولین نمونه برداری) و اندازه‌گیری مستقیم با دستگاه رطوبت‌سنج پرتابل (در



شکل ۲- نمایی از عرصه شاهد و سامانه‌های هلالی آبگیر ذخیره رطوبت خاک در پلات‌های جنگل بلوط

Figure 2- A view of the control area and water harvesting soil moisture retention systems in the oak forest plots

جدول ۱- خصوصیات پنج رویداد بارش مورد استفاده در تحقیق

Table 1- Characteristics of the 5 precipitation events used in the study

تاریخ نمونه برداری	تاریخ بارندگی	میزان بارندگی (میلی‌متر)	ردیف
1401/8/27	1401/8/22	9	1
1401/9/10	1401/9/04	11	2
1401/10/30	1401/10/25	72	3
1401/12/29	1401/12/22-24	36	4
1402/01/28	1402/01/23	20	5

دو عمق و پنج سطح بارندگی بر رطوبت خاک بررسی شد. سپس اثرات متقابل سامانه با عمق و سامانه با میزان بارندگی بررسی و در صورت معنی‌دار بودن، مقایسه میانگین‌ها انجام شد. همچنین به منظور ارزیابی اثر نقطه استحصال آب، اثر نقاط مختلف استحصال آب در دو عمق و پنج سطح بارندگی با روش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بررسی شد. اثرات متقابل نیز در صورت معنی‌دار بودن با آزمون دانکن مقایسه شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. این تحلیل شامل دو عامل سامانه (هلالی یا شاهد)، چهار نقطه استحصال آب (داخل چاله، روی پشته، داخل پشته، بین پشته‌ها)، دو عمق نمونه برداری (۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری) و ۵ سطح بارندگی بود. داده‌ها در نرم‌افزار SAS تحلیل و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. به منظور ارزیابی اثر نوع سامانه، ابتدا اثر سامانه‌های هلالی آبگیر و شاهد در

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثرات عمق خاک، سامانه و میزان بارندگی بر ذخیره رطوبت خاک در جدول ۲ ارائه شده است. طبق این جدول، تأثیر میزان بارندگی و عمق خاک بر مقدار رطوبت خاک در سطح یک درصد معنی‌دار است، که نشان می‌دهد با اطمینان ۹۹ درصد می‌توان گفت هر یک از این عوامل به‌طور مستقل بر رطوبت خاک تأثیر دارند. این یافته با پژوهش‌های پیشین که بر نقش کلیدی بارندگی و ویژگی‌های فیزیکی خاک در حفظ رطوبت تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد (Mimeau *et al.*, 2020; Dai *et al.*, 2022; Da Silva-Dias *et al.*, 2024). به‌ویژه، افزایش میزان بارندگی باعث افزایش ذخیره رطوبت در لایه‌های مختلف خاک می‌شود، زیرا بخش زیادی از آب ناشی از بارش توسط خاک جذب و ذخیره می‌شود. برای مثال، پژوهشی در منطقه بین‌النهرین نشان داد که کاهش بارش‌ها منجر به کاهش رطوبت خاک و افزایش پدیده‌های غباری شده است (NasrAzadani *et al.*, 2015).

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر عمق، سامانه و میزان بارش بر ذخیره رطوبت خاک

Table 2- ANOVA of the effect of depth, system, and precipitation on soil moisture storage

ذخیره رطوبت (%)	درجه آزادی	منابع تغییرات (SOV)
97.02	2	تکرار
8721.79**	1	عمق
481.66**	1	سامانه
2140.95**	4	میزان بارندگی
41.66*	1	عمق × سامانه
375.29**	4	عمق × میزان بارندگی
3.30 ^{ns}	4	سامانه × میزان بارندگی
3.30 ^{ns}	4	عمق × سامانه × میزان بارندگی
31.35	38	خطای آزمایش
16.04	-	ضریب تغییرات

همچنین، تأثیر همزمان عمق خاک و میزان بارندگی نیز در سطح یک درصد معنی‌دار است و این دو عامل به‌طور مشترک بر حفظ رطوبت خاک تأثیرگذار هستند. با این حال، اثر ترکیب عمق خاک و نوع سامانه کمی متفاوت است و سطح معنی‌داری آن به ۵ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت که ترکیب این دو عامل بر رطوبت خاک پس از بارش تأثیرگذار است. در نهایت، سایر منابع تغییر، هیچ اثر معنی‌داری بر ذخیره رطوبت خاک نداشتند.

همچنین بر اساس نتایج جدول ۳، موقعیت نقطه استحصال آب باران بر میزان ذخیره رطوبت خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود؛ بنابراین، با ۹۹ درصد اطمینان می‌توان اظهار کرد که درصد رطوبت خاک پس از رویداد بارش، بسته به موقعیت اندازه‌گیری آن (نقاط شاهد، بین دو سامانه، چاله سامانه، روی خاک پشته سامانه و انتهای خاک پشته سامانه)، متفاوت است و تفاوت‌های معنی‌داری بین این نقاط وجود دارد. این یافته ممکن است به عوامل متعددی نسبت داده شود. یکی از مهم‌ترین عوامل می‌تواند تأثیر ویژگی‌های هندسی و فیزیکی سامانه‌های آبیاری یا پشته‌های خاک باشد که بر توزیع و نگهداری رطوبت در مناطق مختلف تأثیر می‌گذارد. برای مثال، در مناطقی که بارش‌های متمرکز رخ می‌دهند، مانند نواحی نزدیک به چاله‌های سامانه، مقدار رطوبت بیشتر تجمع می‌یابد، در حالی که در نقاطی که تحت تأثیر وزش باد یا حرکت آب قرار دارند، رطوبت کاهش می‌یابد.

علاوه‌براین، اثرات ساده عمق خاک و میزان بارندگی بر ذخیره رطوبت و همچنین اثرات ترکیبی عمق در نقطه استحصال و عمق در میزان بارندگی نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند. این نتایج بیانگر آن است که رفتار تیمارهای مختلف در نقاط استحصال آب باران در عمق‌های متفاوت خاک، تفاوت‌هایی دارند. در حالی که اثرات متقابل سه‌گانه عمق در نقطه استحصال و میزان بارندگی بر ذخیره رطوبت تأثیر نشان ندادند.

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر عمق، نقطه استحصال و

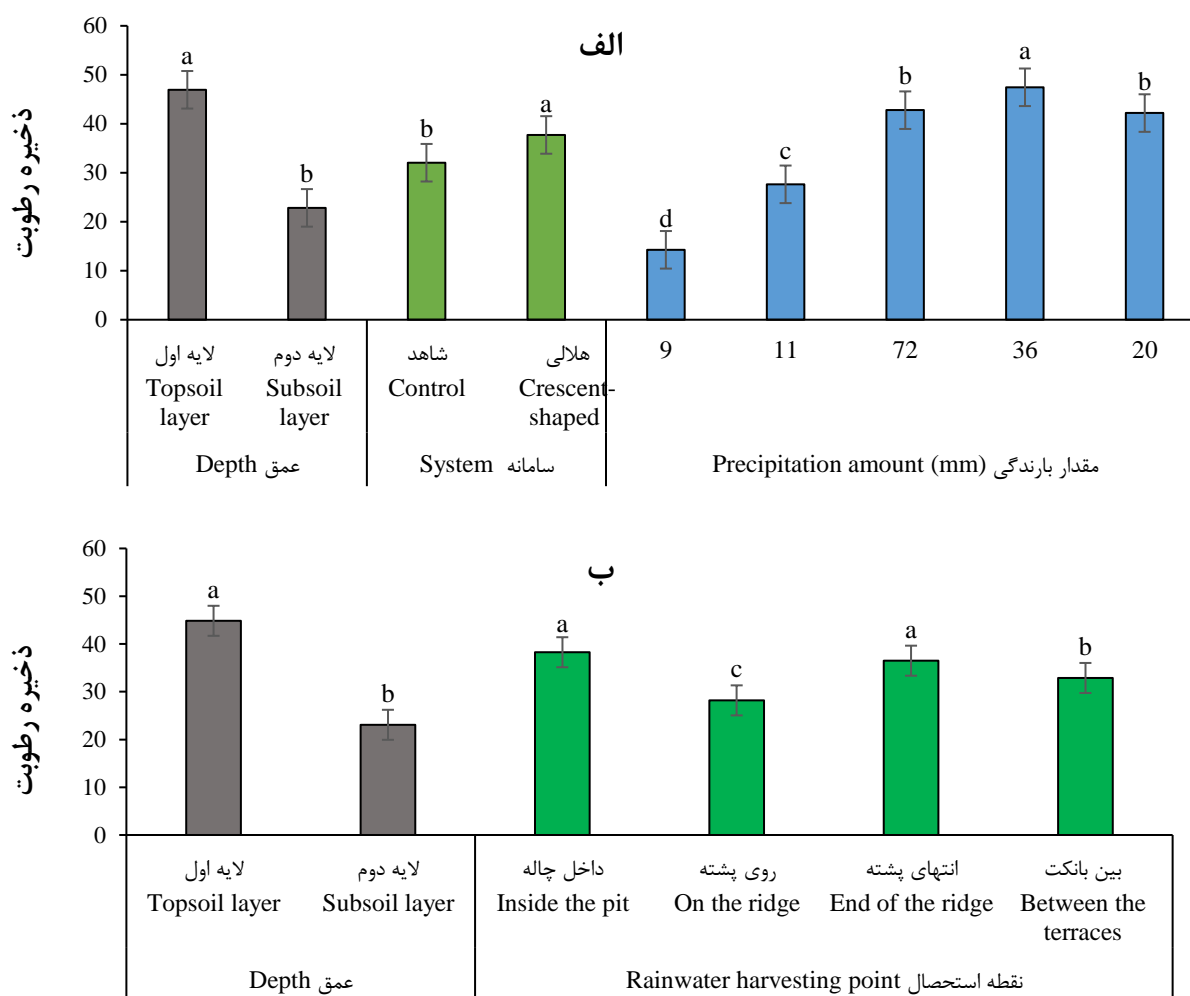
میزان بارندگی بر ذخیره رطوبت خاک

Table 3- ANOVA of the effect of depth, rainwater harvesting point, and precipitation amount on soil moisture storage

منابع تغییرات	درجه آزادی	ذخیره رطوبت (%)
تکرار	2	68.62
عمق	1	14224.51**
نقطه استحصال	3	594.89**
میزان بارندگی	4	3645.8**
عمق × نقطه استحصال	3	204.49**
عمق × میزان بارندگی	3	577.49**
نقطه استحصال × میزان بارندگی	4	44.83 ^{ns}
عمق × نقطه استحصال × میزان بارندگی	12	33.11 ^{ns}
خطای آزمایش	78	36.50
ضریب تغییرات	-	16.04

براساس نتایج شکل ۳ سامانه هلالی آبگیر به‌طور معنی‌داری باعث افزایش ذخیره رطوبت خاک نسبت به تیمار شاهد می‌شود. در این شکل، میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن ندارند. این نتیجه در تطابق با نتایج پژوهش Mahmoodimoghadam و همکاران (۲۰۱۵) در مراتع استپی شهرستان سربیشه واقع در استان خراسان جنوبی و پژوهش Gheitury و همکاران (۲۰۱۹) در روستای کبوده علیا واقع در استان کرمانشاه می‌باشد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، بیشترین ذخیره رطوبت در لایه اول نمونه‌برداری با عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک با ۳۷/۷۲ درصد، مشاهده گردید که ۵ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین بیشترین ذخیره رطوبت در لایه اول خاک (۴۶/۹۴ درصد) مشاهده شد که حدود ۲۵ درصد بیشتر از لایه دوم بود. این تفاوت به وضوح نشان‌دهنده تأثیر عمق خاک بر ذخیره رطوبت است. این یافته حاکی از آن است که بخش سطحی خاک توانایی بالاتری در نگهداری آب دارد که می‌تواند ناشی از ترکیبی از ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک باشد. از سوی دیگر، در عمق‌های بیشتر، کاهش میزان مواد آلی و افزایش فشردگی خاک

می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب شود. همان‌طور که مطالعه Leu و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که افزایش محتوای ماده آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهد. علاوه‌براین، میانگین ذخیره رطوبت در دو رویداد بارش با مقادیر ۷۲ و ۲۰ میلی‌متر تقریباً برابر بود و نشان داد که میزان بارندگی در این شرایط تأثیر معنی‌داری بر ذخیره رطوبت نداشته است. به‌طورکلی، وجود سامانه هلالی آبگیر و عمق خاک به‌عنوان عوامل مؤثر در افزایش ذخیره رطوبت خاک شناسایی شدند که نتایج این بخش از تحقیق با نتایج مطالعات Jangjo (۲۰۰۹) و Sadeghzadeh و همکاران (۲۰۱۷) که بر تأثیر مثبت حوضچه‌های هلالی بر ذخیره رطوبت خاک تأکید دارند، مطابقت دارد. مقایسه میانگین ذخیره رطوبت در نقاط نیز مختلف نشان داد که نقطه استحصال داخل چاله با میانگین ۳۸/۲۷ درصد، بالاترین میزان ذخیره رطوبت را به خود اختصاص داده است که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با نقطه استحصال در انتهای پشته نداشت. این یافته ممکن است به دلایل مختلفی مربوط باشد. یکی از دلایل ممکن می‌تواند این باشد که در نقاط داخل چاله، تجمع آب باران به‌طور مؤثرتری انجام می‌شود، زیرا سطح آب در این نقاط می‌تواند بیشتر تجمع یابد و از تبخیر آن جلوگیری شود. همچنین، در این نقاط، خاک ممکن است بیشتر قادر به جذب آب باشد. در مقابل، کمترین میزان ذخیره رطوبت مربوط به نقطه استحصال روی پشته با میانگین ۲۸/۱۹ درصد بود. این موضوع ممکن است به دلیل شیب و ویژگی‌های فیزیکی پشته‌ها باشد که باعث می‌شود آب باران در این نقاط سریع‌تر از خاک خارج شود یا به سرعت تبخیر گردد. این یافته‌ها نشان داد که استفاده از نقطه استحصال داخل چاله، تأثیر بیشتری در افزایش ذخیره رطوبت خاک نسبت به سایر نقاط داشت. مطالعه Gheitury و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داد که نقاط استحصال مختلف اثرات متفاوتی بر ذخیره رطوبت دارند.



شکل ۳- مقایسه میانگین (الف) اثرات ساده عمق، سامانه و مقدار بارندگی و (ب) اثرات ساده عمق و نقطه استحصال بر ذخیره رطوبت خاک

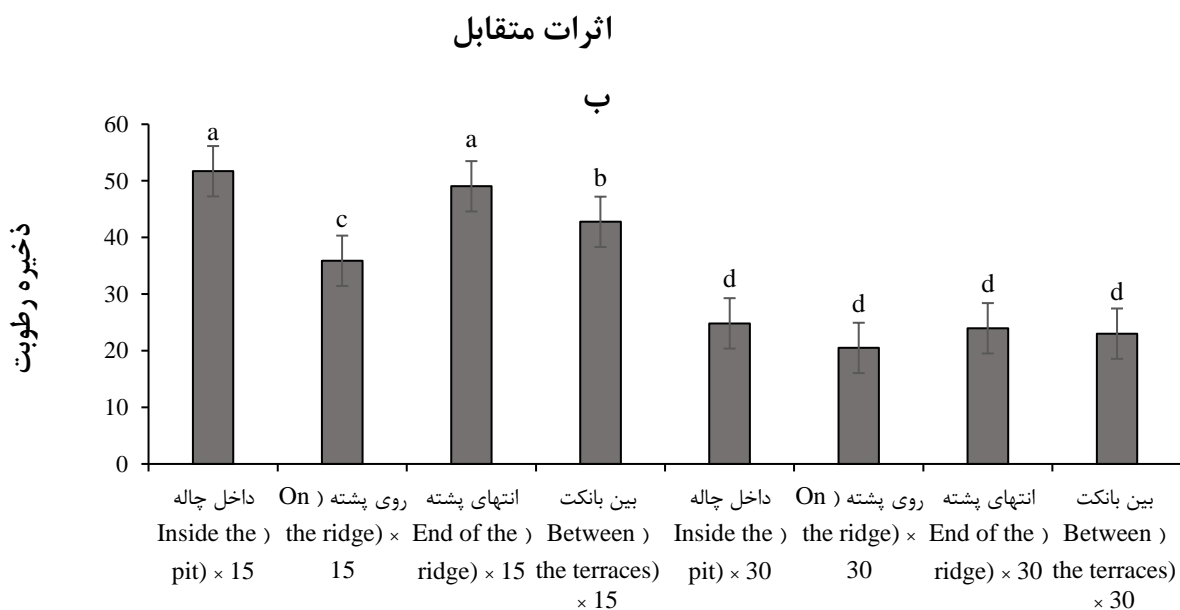
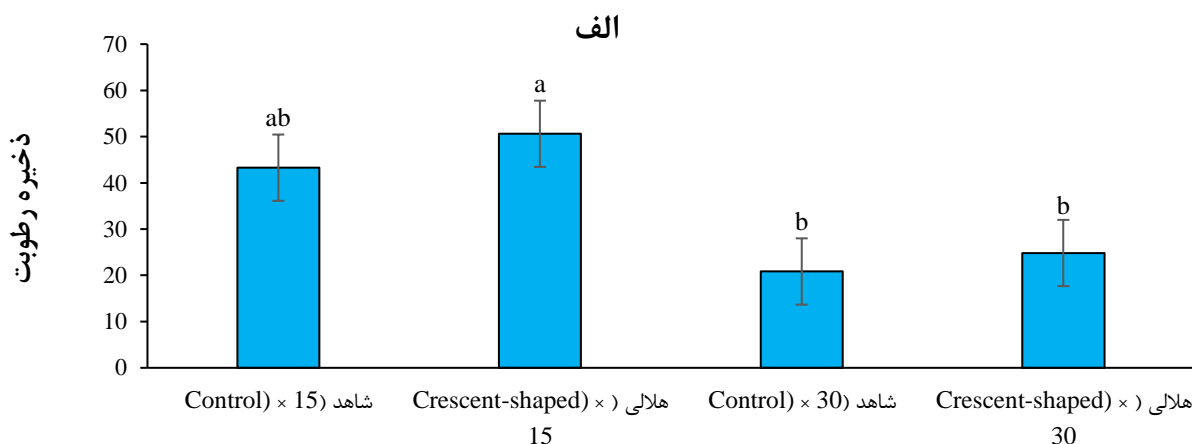
Figure 3- Comparison of the mean (a) simple effects of depth, system, and precipitation amount, and (b) simple effects of depth and extraction point on soil moisture storage

استحصال آب باران و در عمق‌های متفاوت نیز نشان داد که پنج روز پس از بارندگی، با افزایش عمق خاک، ذخیره رطوبت در تمامی تیمارها کاهش یافته است. به‌طور خاص، نقطه استحصال داخل چاله در لایه اول با میانگین ۵۱/۷۰ درصد بالاترین میزان ذخیره رطوبت را داشت، درحالی‌که کمترین ذخیره رطوبت در لایه دوم مربوط به نقطه استحصال روی پشته مشاهده شد. این موضوع می‌تواند در ارتباط با عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های توپوگرافی، خصوصیات فیزیکی خاک و توزیع آب در نقاط مختلف باشد. در لایه اول خاک، با توجه به تجمع آب باران در نقاط چاله‌ای، رطوبت

براساس نتایج مقایسه اثرات متقابل دوگانه عمق و نوع سامانه (شکل ۴)، میزان ذخیره رطوبت خاک پس از پنج روز از بارندگی بین ۲۱ تا ۵۱ درصد متغیر بود. بیشترین ذخیره رطوبت در سامانه هلالی در لایه اول مشاهده شد. همچنین، در لایه دوم، تفاوت معنی‌داری بین سامانه شاهد و هلالی از نظر ذخیره رطوبت وجود نداشت و میزان ذخیره رطوبت در این عمق بین ۲۱ تا ۲۵ درصد بود. در این شکل میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن ندارند. مقایسه میانگین ذخیره رطوبت خاک در نقاط مختلف

نفوذ آب در خاک کاهش یابد، به‌ویژه در نقاطی مانند روی پشته که سرعت تبخیر و خروج آب از خاک بیشتر است.

بیشتری در این نواحی حفظ می‌شود، زیرا تجمع آب و کاهش تبخیر به دلیل موقعیت توپوگرافی باعث می‌شود که خاک بتواند آب بیشتری جذب کند. در مقابل، در لایه دوم، این ویژگی‌ها ممکن است به دلیل حرکت و



اثرات متقابل

شکل ۴- مقایسه میانگین (الف) اثرات متقابل دوگانه عمق در سامانه و (ب) اثرات متقابل دوگانه عمق در نقطه استحصال بر ذخیره رطوبت خاک

Figure 4- Comparison of the mean (a) dual interaction effects of depth and system, and (b) dual interaction effects of depth and collection point on soil moisture storage

مناطق شیب‌دار نقش مهمی ایفا کنند. نتایج این پژوهش نشان داد که سامانه‌های هلالی آبگیر تأثیر مثبتی بر افزایش رطوبت خاک دارند. به‌طور کلی،

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق به‌طور مؤثری نشان داد که سامانه‌های هلالی آبگیر می‌توانند در بهبود ذخیره رطوبت خاک در

آینده، بررسی اثرات دیگر پارامترهای محیطی مانند نوع خاک، پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی می‌تواند در گسترش تعمیم‌پذیری نتایج این تحقیق مفید واقع شود. از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های بهینه‌سازی بیشتری برای طراحی سامانه‌های آبیگر هلالی و بررسی اثرات بلندمدت آن‌ها در ذخیره آب و جلوگیری از فرسایش خاک در مناطق مختلف به‌ویژه در مناطق حفاظت‌شده و مناطق مستعد خشکسالی انجام شود. این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان راهکارهای کاربردی در مدیریت منابع آب و حفاظت از خاک در مناطق جنگلی و شیب‌دار مورد استفاده قرار گیرند و در کاهش بحران‌های آبی و تقویت تاب‌آوری اکوسیستم‌های طبیعی مؤثر واقع شوند.

میزان رطوبت خاک در تیمارهای دارای سامانه آبیگر بیشتر از تیمار شاهد بود.

در عین حال، این تحقیق نشان داد که با افزایش عمق خاک، میزان ذخیره رطوبت کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از محدودیت نفوذ آب در لایه‌های عمیق‌تر و نیز کاهش حرکت رطوبت به سمت پایین در نتیجه تبخیر بیشتر در لایه‌های سطحی باشد. بنابراین، این نتایج می‌توانند مبنای مناسبی برای بهینه‌سازی طراحی و اجرای سامانه‌های هلالی در مناطق مختلف به‌ویژه در شیب‌های تند و مناطق با بارش محدود باشند.

این پژوهش همچنین به‌طور غیرمستقیم بر اهمیت توجه به عواملی چون نوع طراحی، عمق خاک و میزان بارندگی تأکید داشت. برای گسترش این پژوهش در

References

- Ahmadpour, H., Jahantab, E., Sharafatmandrad, M., & Khosravi Mashizi, A. (2022). The effect of rainfall storage methods on soil properties of arid rangelands (Case study: Bastak, Hormozgan Province). *Desert Management*, 10(3), 37-48. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.55471.1.1386> (In Persian)
- Chaney, N.W., Roundy, J.K., Herrera-Estrada, J.E., & Wood, E.F. (2015). High-resolution modeling of the spatial heterogeneity of soil moisture: Applications in network design. *Water Resources Research*, 51(1), 619-638. <https://doi.org/10.1002/2013WR014964>
- Da Silva-Dias, R., Raposo-Díaz, X., García-Tomillo, A., & López-Vicente, M. (2024). Response time of soil moisture to rain in a vineyard with permanent cover. *Geoderma*, 444, 116866. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116866>
- Dai, L., Fu, R., Guo, X., Du, Y., Zhang, F., & Cao, G. (2022). Soil moisture variations in response to precipitation across different vegetation types on the northeastern Qinghai-Tibet plateau. *Frontiers in Plant Science*, 13, 854152. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.854152>
- Dile, Y. T., Karlberg, L., Temesgen, M., & Rockström, J. (2013). The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.014>
- Ding, W., Wang, F., Dong, Y., Jin, K., Cong, C., Han, J., & Ge, W. (2021). Effects of rainwater harvesting system on soil moisture in rain-fed orchards on the Chinese Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 243, 106496. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106496>
- Fathizadeh, O., Marvi Mohajer, M. R., Jafari, M., & Zahedi Amiri, G. (2014). Temporal stability of throughfall spatial patterns under an individual Persian oak tree in the Zagros region (case study: Forests around Ilam city, Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 67(2), 397-409. (In Persian)
- Gheitury, M., Heshmati, M. & Roghani, M. (2019). The effects of micro catchment runoff harvesting system on soil moisture enhancement. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13 (47), 107-114. (In Persian)
- Heshmati, M., Gheitouri, M., Sheikhvaisi, M., Arabkhedri, M., & Hosini, M. (2017a). Combating the forest mortality crises in Zagros regions, Iran through adaptive

- approaches solutions. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(3), 125-141. <https://doi.org/10.22067/geo.v6i2.60466> (In Persian)
- Heshmati, M., Ghaitury, M., Parvizi, Y., Ahmadi, M., Shaikhvaisy, M., Arabkhedri, M., Hosini, M., & Shademani, A. (2017b). Effect of runoff harvesting trough crescent shaped bounds on oak dieback curtailing and increasing soil organic carbon in the Zagros Forest, Kermanshah, Iran. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 5(1), 1-10. (In Persian)
- Jangjo, M. (2009). *Rangeland improvement and development*. Mashhad Academic Publications. 239p. (In Persian)
- Kassaye, K.T., Boulange, J., Saito, H., & Watanabe, H. (2021). Soil water content and soil temperature modeling in a vadose zone of Andosol under temperate monsoon climate. *Geoderma*, 384, 114797. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114797>
- Leu, J.M., Traore, S., Wang, Y.M., & Kan, C.E. (2010). The effect of organic matter amendment on soil water holding capacity change for irrigation water saving: Case study in Sahelian environment of Africa. *Scientific Research and Essays*, 5(23), 3564-3571.
- Londra, P.A., Kotsatos, I.E., Theotokatos, N., Theocharis, A.T., & Dercas, N. (2021). Reliability analysis of rainwater harvesting tanks for irrigation use in greenhouse agriculture. *Hydrology*, 8(3), 132. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030132>
- Mahmoodimoghdam, G., Saghari, M., Rostampour, M., & Chakoshi, B. (2015). Effects of constructing small arc basins system on rangeland production and some soil properties in arid lands (case study: Steppic rangelands of Sarbishe, South Khorasan Province). *Journal of Rangeland*, 9(1), 66-75. (In Persian)
- Mimeau, L., Trambly, Y., Brocca, L., Massari, C., Camici, S., & Finaud-Guyot, P. (2020). Modeling the response of soil moisture to climate variability in the Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2020, 1-29. <https://doi.org/10.5194/hess-25-653-2021>
- Moghim, H. (2014). *Watershed Engineering*. Sobeh-e-Entezar publications. p.651 (In Persian)
- Moghim, H., Naghibi, A., Sabzi, M., & Faramandian, Z. (2024). Investigating the Effect of Crescent Catchment Systems on Runoff Collection and Management (Case study: Chadroyeh watershed, Fars). *Desert Management*, 12(3), 15-30. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2024.2040142.1478> (In Persian)
- Mucheru-Muna, M., Waswa, F., & Mairura, F.S. (2017). Socio-economic factors influencing utilisation of rain water harvesting and saving technologies in Tharaka South, Eastern Kenya. *Agricultural Water Management*, 194, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.005>
- NasrAzadani, A., Shams, S., & Khalasifard, H. R. (2015). *Investigation of soil moisture and precipitation variations and their impact on dust production in the Mesopotamian region from 2001 to 2014*. Proceedings of the 3rd Regional Conference on Climate Change and Global Warming, Zanjan, Iran, March 9. (In Persian)
- Penna, D., Brocca, L., Borga, M., & Dalla Fontana, G. (2013). Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. *Journal of Hydrology*, 477, 55-71. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.052>
- Rojano-Cruz, R., Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Lamas, F., González-Castillo, L., Delgado, G., Párraga, J., Ramírez-González, V., Durán-Zuazo, V.H., Cárceles-Rodríguez, B., & Martín-García, J.M. (2023). Impacts of a hydroinfiltrator rainwater harvesting system on soil moisture regime and groundwater distribution for olive groves in semi-arid Mediterranean regions. *Geoderma*, 438, 116623. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116623>
- Rostampour, M., Saghari, M. & Chabok Estend, H. (2023). Comparison of the effect of a semi-circular bunds system on vegetation and soil moisture levels in drought and wet conditions (Case study: Zirkouh rangelands - South Khorasan). *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 11(3), 30-53. (In Persian)
- Sadeghzadeh, M.E., Yarahmadi, J., Mehrvarz Moghanlou, K., Niknezad, D. (2017). The effect of rainwater catchment systems on increasing soil moisture and growth of

- Elaeagnus angustifolia in Oun Ibn Ali, Tabriz. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 5(1), 19-28. (In Persian)
- Saeed, A.B., Hamid, A. M. N., Abdalhi, M. A., & Mohamed, A.A. (2019). Evaluation the Effects of Water Harvesting Techniques in Improving Water Conservation and Increasing Crop Yields. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 8(86), 106-114.
- Shaikh, M. A. J., & Birajdar, F. (2024). Water harvesting: Importance and techniques for mitigating drought in solapur district. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 7(2), 74-83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10684207>
- Tadros, M.J., Al-Mefleh, N.K., Othman, Y.A., & Al-Assaf, A. (2021). Water harvesting techniques for improving soil water content, and morpho-physiology of pistachio trees under rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 243, 106464. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106464>
- Wang, Y., Hu, W., Zhu, Y., Shao, M.A., Xiao, S., & Zhang, C. (2015). Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. *Journal of Hydrology*, 527, 543-554. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.010>
- Xu, Y., Zhu, G., Wan, Q., Yong, L., Ma, H., Sun, Z., Zhang, Z., & Qiu, D. (2021). Effect of terrace construction on soil moisture in rain-fed farming area of Loess Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100889>
- Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water*, 11(10), 2168. <https://doi.org/10.3390/w11102168>

Content

Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province

Amin Salehpour Jam, Jamal Mosaffaie, Samad Shadfar, Faramarz Sarfaraz

1-24

Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators

Sadaf Piri, Hamidreza Moradi, Vahid Mousavi

25-50

The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todeh watershed

GholamReza Shojaei, Mehdi Ghorbani, Arash Malekian, Amir Alambeigi, Maryam Rostami

51-73

Predicting Groundwater Level Changes Using Deep Learning and Influencing Factors Through Remote Sensing

Maryam Heydarzadeh, Hadi Siasar

74-93

Generalized reconnaissance quantification of soil erosion damage due to potassium and phosphorus loss in second-order watersheds of Iran

Reza Chamani, Seyed Hamidreza Sadeghi, Marjan Bahlekeh

94-112

Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam)

Nargess Pordel, Jaafar Hosseinzadeh, Mehdi Heydari, Reza Omidipour

113-128

Challenges of conservation management of Hyrcanian forests from the perspective of stakeholders (Case study: Golestan province)

Amereh Teymouri, Hannaneh Mohammadi Kangarani, Mohammad Hadi Moayeri, Mohammad Reza Shahraki

129-146

Assessing the impact of crescent-shaped water harvesting systems on increasing soil moisture (Case study: A part of the Manesht and Qhalarang region)

Alireza Mohammadi, Mohsen Tavakoli, Freidoon Soleimani

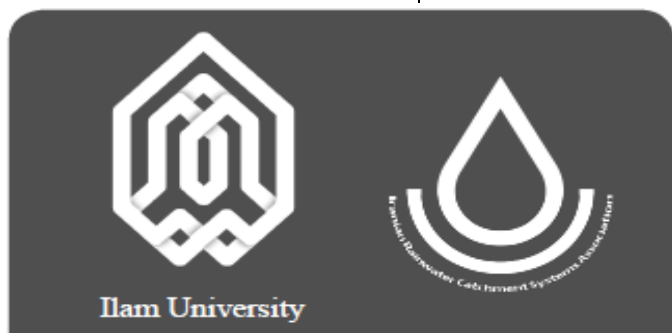
147-159



Integrated Watershed Management

Vol: 5, No: 2. Summer 2025

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 Agricultural, 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 Pourbabaee (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, University of Ilam, Ilam, Iran) Dr. Mohsen Tavakoli (Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran) Dr. Noredin Rostami (Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agricultural, Ilam University, Ilam, Iran) Dr. Marzban Faramarzi (Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture, 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



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: 5, No: 2. Summer 2025

Online ISSN: 2783-4581

Landslide hazard mapping using hybrid Multi-Attribute Decision-Making methods in the Qezel Owzan Watershed, Qazvin Province

1-24

Amin Salehpour Jam, Jamal Mosaffaie, Samad Shadfar, Faramarz Sarfaraz

Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators

24-50

Sadaf Piri, Hamidreza Moradi, Vahid Mousavi

The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todeshk watershed

51-73

GholamReza Shojaei, Mehdi Ghorbani, Arash Malekian, Amir Alambeigi, Maryam Rostami

Predicting Groundwater Level Changes Using Deep Learning and Influencing Factors Through Remote Sensing

74-93

Maryam Heydarzadeh, Hadi Siasar

Generalized reconnaissance quantification of soil erosion damage due to potassium and phosphorus loss in second-order watersheds of Iran

94-112

Reza Chamani, Seyed Hamidreza Sadeghi, Marjan Bahlekeh

Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam)

113-128

Nargess Pordel, Jaafar Hosseinzadeh, Mehdi Heydari, Reza Omidipour

Challenges of conservation management of Hyrcanian forests from the perspective of stakeholders (Case study: Golestan province)

129-146

Amereh Teymouri, Hannaneh Mohammadi Kangarani, Mohammad Hadi Moayeri, Mohammad Reza Shahraki

Assessing the impact of crescent-shaped water harvesting systems on increasing soil moisture (Case study: A part of the Manesht and Qhalarang region)

147-159

Alireza Mohammadi, Mohsen Tavakoli, Freidoon Soleimani