



مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۵۸۱

سال ششم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵

۱-۲۳

طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی (مطالعه موردی: استان ایلام)

جلال عزیز، علی مهدوی، شعبان شتایی جویباری

۲۴-۴۲

بررسی تغییرات پوشش گیاهی در استان خراسان شمالی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش از دور

(مطالعه موردی: مراتع جیرانسو)

رضا امیدپور، محبت نداف

۴۳-۶۰

بررسی تغییرات زمانی و مکانی پاسخ هیدرولوژیک در سیل خیزی حوزه آبخیز بالیخلوچای

پیام آموزگاری، ناهیده پرچی

۶۱-۸۴

بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست

مهدیه شاکر، هادی اسکندری دامنه، حسن خسروی

۸۵-۱۰۶

توسعه مدل ناپارامتریک K نزدیکترین همسایه با کاتالیزور فراالبتکاری PSO به منظور مدل‌سازی طوفان‌های گرد و غباری در غرب ایران

محمد انصاری قوجقار، هانیه محمدی

۱۰۷-۱۲۵

پتانسیل‌یابی منابع آب کارست جهت استحصال آب با استفاده از روش‌های هیدروژئولوژی (مطالعه موردی: پهنه کارستی گرموک

شهرستان سمیرم، استان اصفهان)

احمدرضا کریمی، حاجی کریمی، سید یحیی میرزایی ارجنکی

۱۲۶-۱۴۶

بررسی ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان

ایمان داوودی، مصطفی مرادی، رضا بصیری، پژمان طهماسبی کهیانی

۱۴۷-۱۶۳

ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST

محمد رحمتی، سیامک دخانی، رضا قضاوی، علیرضا دانشی، حمید نوری



مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز

سال ششم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵

۲۷۸۲-۴۵۸۱

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 زرغام 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: ۰۸۴۳۲۲۲۷۰۳

صندوق پستی: ۵۱۶-۶۹۳۱۵

پست الکترونیک: iwm@ilam.ac.ir

وب سایت مجله: <http://iwm.ilam.ac.ir>



فهرست

طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی (مطالعه موردی: استان ایلام)

جلال عزیز، علی مهدوی، شعبان شتایی جویباری

۱-۲۳

بررسی تغییرات پوشش گیاهی در استان خراسان شمالی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش از دور (مطالعه

موردی: مراتع جیرانسو)

رضا امیدی‌پور، محبت نداف

۲۴-۴۲

بررسی تغییرات زمانی و مکانی پاسخ هیدرولوژیک در سیل‌خیزی حوزه آبخیز بالیخلوچای

پیام آموزگاری، ناهیده پرچی

۴۳-۶۰

بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست

مهديه شاکر، هادی اسکندری دامنه، حسن خسروی

۶۱-۸۴

توسعه مدل ناپارامتریک K نزدیکترین همسایه با کاتالیزور فراابتنکاری PSO به منظور مدل‌سازی طوفان‌های گرد و غباری در

غرب ایران

محمد انصاری قوجقار، هانیه محمدی

۸۵-۱۰۶

پتانسیل‌یابی منابع آب کارست جهت استحصال آب با استفاده از روش‌های هیدروژئولوژی (مطالعه موردی: پهنه کارستی

گرموک شهرستان سمیرم، استان اصفهان)

احمدرضا کریمی، حاجی کریمی، سید یحیی میرزایی ارجنکی

۱۰۷-۱۲۵

بررسی ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان

ایمان داوودی، مصطفی مرادی، رضا بصیری، پژمان طهماسبی کهیانی

۱۲۶-۱۴۶

ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST

محمد رحمتی، سیامک دخانی، رضا قضاوی، علیرضا دانشی، حمید نوری

۱۴۷-۱۶۳

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 بطنه 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 پژوهش وی 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 خلأ 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 iwam.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

Design and implementation of a spatial data infrastructure for planning and sustainable natural resource management (Case study: Ilam Province)

Jalal Aziz¹, Ali Mahdavi^{1*}, Shaban Shatai Jouibari²

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

2. Department of Forestry, Faculty of Forestry Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

* Corresponding author: a.mahdavi@ilam.ac.ir

(Received: 18 May 2025

Revised: 05 Jun 2025

Accepted: 10 August 2025)

Extended Abstract

Introduction: Due to existing limitations in sharing spatial data, numerous studies conducted within various organizations suffer from high costs and are not suitable for dissemination or reuse. Furthermore, incompatibility among data generated by different organizations, or even between departments within a single organization, poses a significant challenge to cross-sector decision-making. This inconsistency stems from differences in data standards, foundational principles, and production processes. Additionally, due to security concerns, organizations tend to produce redundant data repeatedly, leading to resource wastage and reduced efficiency. This study aims to design and implement an integrated spatial data infrastructure (SDI) for sustainable natural resource management in Ilam Province. A conceptual model was developed, and a systematic approach was adopted to propose a framework for integrating spatial data across the Department of Natural Resources.

Materials and Methods: To achieve the research objectives, the department's organizational structure was analyzed in terms of its chart and the information layers required. This was followed by a needs assessment and the design of conceptual, logical, and physical models. The selected open-source software environment was used to deploy the SDI on a server. For data processing, open-source PostgreSQL and PostGIS databases were employed, while ENVI and ArcGIS were used for satellite imagery analysis. To disseminate the generated maps according to OGC standards, GeoServer was utilized.

Results and Discussion: Findings indicate that establishing such an infrastructure can enhance interdepartmental coordination, accelerate organizational workflows, reduce operational costs, and support sustainable natural resource management through centralized information. The fully operational implementation within the Department of Natural Resources and Watershed Management represents a significant advancement in spatial data management. Unlike many theoretical studies in this field, the system developed in this research actively provides services to real users, distinguishing it from purely conceptual work. Its primary advantage lies in the integrated data approach and the practical delivery of services. Implementation of this infrastructure has reduced decision-making time. For example, in monitoring and controlling violations, the system decreased the time required to detect land encroachment by up to 60%, thanks to the simultaneous display of ownership and land-use layers and the capability for online measurement of violations. In disaster management, the system identified a 70-hectare wildfire in Ilam County and automatically calculated the affected areas, reducing response times by up to 50%. A unique aspect of this research is its adaptation of advanced technologies to local and country-specific conditions. The system is not only theoretically sound but also addresses operational challenges such as infrastructural limitations, organizational resistance, and user-specific needs. The development of a mobile service with offline data upload capabilities and field mapping tools has addressed the needs of experts in remote areas, reducing reliance on specialized hardware by 75%. Despite these successes, the study encountered several limitations. The practical and indigenous nature of the project makes direct comparison with theoretical studies or systems implemented in other countries difficult. Challenges such as inter-organizational discrepancies, resistance to change, and hardware constraints were valuable learning experiences, often overlooked in experimental and theoretical research.

Conclusion: This research confirms that, despite various limitations, establishing a unified spatial data system is not only feasible within the country but can also significantly improve natural resources management processes. The practical experiences gained through this project can serve as a valuable guide for other organizations seeking to implement similar systems.

Keywords: Spatial Data Infrastructure, Geographic Information System, Sustainable Management, Natural Resources, Ilam Province

Citation: Aziz, J., Mahdavi, A., & Shatai Jouibari, Sh. (2026). Design and implementation of a spatial data infrastructure for planning and sustainable natural resource management (Case study: Ilam Province). *Integrated Watershed Management*, 6(1), 1-23. doi=10.22034/iwm.2025.2060312.1228

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>).



طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی (مطالعه موردی: استان ایلام)

جلال عزیز^۱، علی مهدوی^{۱*}، شعبان شتایی جویباری^۲

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

۲. گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

*نویسنده مسئول: a.mahdavi@ilam.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

چکیده مبسوط

مقدمه: محدودیت‌های موجود در به اشتراک‌گذاری داده‌های مکانی موجب شده تا بسیاری از مطالعات با هزینه‌های بالا در سازمان‌های مختلف، قابلیت انتشار و استفاده مجدد پیدا نکند. همچنین ناسازگاری میان داده‌های تولیدشده توسط سازمان‌های مختلف یا حتی بخش‌های داخلی یک سازمان، چالشی اساسی در تصمیم‌گیری‌های فراهنگی محسوب می‌شود. این ناسازگاری ناشی از تفاوت در مبناها، استانداردها و فرآیندهای تولید داده‌هاست. از سوی دیگر، به دلیل ملاحظات امنیتی، سازمان‌ها تمایل به تولید مکرر داده‌های تکراری دارند که این امر منجر به هدررفت منابع و کاهش کارایی می‌شود. این پژوهش با هدف طراحی و پیاده‌سازی یک زیرساخت داده مکانی یکپارچه برای مدیریت پایدار منابع طبیعی در استان ایلام انجام شده است. در این راستا، با ارائه یک مدل مفهومی و اتخاذ رویکرد سیستمی، چارچوبی برای یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی در ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری پیشنهاد شده است.

مواد و روش‌ها: به منظور دستیابی به اهداف پژوهش ابتدا ساختار ادارات کل منابع طبیعی از نظر چارت سازمانی و نوع لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز بررسی گردید. در مرحله بعد پس از نیازسنجی، اقدام به طراحی مدل مفهومی، منطقی و فیزیکی و در نهایت زیرساخت داده مکانی طراحی شده بر بستر نرم‌افزارهای متن‌باز روی سرور پیاده‌سازی شد. در این پژوهش به منظور طراحی مدل از پایگاه داده متن‌باز نرم‌افزارهای PostGIS و Postgresql و جهت پردازش داده‌های ماهواره‌ای از سمت سرور از نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS استفاده شد. در نهایت به منظور انتشار نقشه‌های تهیه شده به کاربران بر اساس استانداردهای OGC از نرم‌افزار Geoserver بهره گرفته شد.

نتایج و بحث: یافته‌های این تحقیق نشان داد که ایجاد یک زیرساخت داده مکانی می‌تواند هماهنگی بین‌بخشی را افزایش دهد، جریان کاری سازمان را تسریع کند، هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و با تمرکز اطلاعات، به اهداف مدیریت پایدار منابع طبیعی کمک نماید. نتایج این پژوهش که به صورت کاملاً عملیاتی و اجرایی در بستر ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری پیاده‌سازی شده است، نشان‌دهنده تحولی چشمگیر در مدیریت داده‌های مکانی منابع طبیعی است. برخلاف بسیاری از مطالعات نظری در این حوزه، سیستم طراحی شده در این تحقیق می‌تواند به صورت فعال به کاربران واقعی سرویس‌دهی کند و این ویژگی اجرایی، آن را از سایر پژوهش‌های صرفاً نظری متمایز می‌سازد. مزیت اصلی این سیستم در رویکرد یکپارچه‌سازی داده‌ها و ارائه سرویس‌های کاربردی به صورت عملیاتی است. نتایج نشان داد که پیاده‌سازی این زیرساخت موجب کاهش زمان تصمیم‌گیری‌های مدیریتی می‌شود. در بخش پایش و کنترل تخلفات، سیستم توانسته زمان تشخیص تصرفات اراضی ملی را تا ۶۰ درصد کاهش دهد که این امر به لطف نمایش هم‌زمان لایه‌های مالکیت و کاربری و امکان اندازه‌گیری آنلاین مساحت تخلفات محقق شده است. همچنین در مدیریت بحران، سیستم با شناسایی به موقع آتش‌سوزی ۷۰ هکتاری در شهرستان ایلام و محاسبه خودکار سطح آسیب‌دیده، زمان واکنش به حوادث را تا ۵۰ درصد کاهش داده است. ویژگی منحصر به فرد این پژوهش، تطبیق فناوری‌های پیشرفته با شرایط بومی و واقعی کشور است. سیستم طراحی شده نه تنها از نظر نظری کارآمد است، بلکه توانسته با چالش‌های عملیاتی مانند محدودیت‌های زیرساختی، موانع سازمانی و نیازهای واقعی کاربران کنار بیاید. توسعه سرویس موبایل با قابلیت‌های بارگذاری آفلاین داده‌ها و ابزارهای نقشه‌برداری میدانی، پاسخگوی نیاز کارشناسان در مناطق دورافتاده بوده و نیاز به سخت‌افزارهای تخصصی را تا ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. با وجود موفقیت‌های به دست آمده، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز داشته است. ماهیت اجرایی و بومی پروژه باعث شده که مقایسه مستقیم آن با مطالعات نظری یا سیستم‌های پیاده‌سازی شده در دیگر کشورها به سادگی میسر نباشد. چالش‌هایی مانند ناهماهنگی بین‌سازمانی، مقاومت در برابر تغییر و محدودیت‌های سخت‌افزاری، تجربیات ارزشمندی بودند که در مطالعات آزمایشگاهی و نظری معمولاً مورد توجه قرار نمی‌گیرند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش ثابت کرد که با وجود تمام محدودیت‌ها، ایجاد یک سیستم یکپارچه داده‌های مکانی در کشور نه تنها ممکن است، بلکه می‌تواند به بهبود قابل توجهی در فرآیندهای مدیریت منابع طبیعی منجر شود. تجربیات عملی به دست آمده از این پروژه می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای ارزشمند برای سایر سازمان‌ها و نهادهایی باشد که قصد پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی را دارند.

واژه‌های کلیدی: زیرساخت داده مکانی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدیریت پایدار، منابع طبیعی، استان ایلام

استناد: عزیز، ح، مهدوی، ع؛ و شتایی جویباری، ش. (۱۴۰۵). طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی (مطالعه موردی: استان ایلام). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۱)، ۲۳-۱.

حق چاپ:



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

مقدمه

در فرآیند رشد و توسعه پایدار هر کشور، داده‌های مکانی به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی در ارائه اطلاعات پایه، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. با توجه به اهمیت این داده‌ها در مدیریت بهینه منابع و جلوگیری از هزینه‌های اضافی ناشی از دوباره‌کاری، ضروری است که سیاست‌گذاری یکپارچه‌ای در سطح ملی برای تولید، توزیع و مدیریت داده‌های مکانی صورت پذیرد (Kalantari Oskouei et al., 2018).

تعریف زیرساخت‌های ملی داده‌های مکانی^۱ نه تنها موجب صرفه‌جویی اقتصادی و زمانی می‌شود، بلکه از طریق تسهیل تبادل اطلاعات، جلب مشارکت بخش خصوصی و حذف موازی‌کاری‌های سازمانی، بستری برای تحقق توسعه پایدار فراهم می‌کند (Baktash, 2012). با این حال، باورهای سنتی مبنی بر محرمانه‌نگاری داده‌ها به‌عنوان منبع قدرت، حتی در عصر فناوری اطلاعات، همچنان به‌عنوان مانعی در دسترسی آزاد و کارآمد به اطلاعات مکانی عمل می‌کنند. این نگرش منجر به عدم شفافیت داده‌ها، تکرار هزینه‌بر تولید اطلاعات و در نهایت ناکامی پروژه‌های کلان شده است (Mohamadzadeh et al., 2020). از سوی دیگر، عدم وجود استانداردهای ملی و سیاست‌گذاری منسجم در حوزه داده‌های مکانی، سازمان‌ها را با چالش‌های عمیقی در یکپارچه‌سازی و بهره‌برداری مؤثر از این داده‌ها روبه‌رو کرده است (Mansourian & Valadan Zoej, 2009). در همین راستا، کمیته استانداردهای سازمان نقشه‌برداری کشور در ابتدای دهه ۸۰، پیشنهاد ایجاد مرکز هماهنگی داده‌های مکانی را به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش دوباره‌کاری ارائه داد. متأسفانه به‌رغم تشکیل کمیته‌ای متشکل از وزارت کشور، مرکز آمار ایران و سازمان نقشه‌برداری کشور، این طرح به دلیل ناهماهنگی‌های بین‌سازمانی و عدم

اجرای استانداردهای مشخص، هرگز محقق نشد. اکنون پس از گذشت بیش از دو دهه، عدم تحقق یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی به یکی از چالش‌های زیربنایی کشور تبدیل شده است که نمونه بارز آن تأخیر در اجرای قانون جامع حدنگار است. این پژوهش با هدف طراحی یک زیرساخت یکپارچه داده‌های مکانی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی در استان ایلام، درصد ارائه راهکارهای عملی برای فائق آمدن بر این چالش‌ها است.

مدیریت یکپارچه داده‌های مکانی در حوزه منابع طبیعی از دهه ۱۹۸۰ در کشورهای پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است. Klein و Ehrlenspiel (۱۹۹۲) در مطالعه‌ای با همکاری دانشگاه فرایبورگ و فائو، اولین سیستم اطلاعات مدیریت جنگل در کشور قبرس پیاده‌سازی گردید که منجر به بهبود ۴۰ درصدی در سرعت تصمیم‌گیری شد. در ادامه، Fegghi (۱۹۹۷) در کشور سوئیس نیازمندی‌های اطلاعاتی را در سه سطح استراتژیک، راهبردی و عملیاتی شناسایی و مدلی برای یکی از استان‌های کشور سوئیس طراحی کرد. تجربه موفق دیگر مربوط به Garg (۲۰۰۲) در کشور هند است که با ایجاد سیستم جامع هفت‌بخشی، کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌های عملیاتی را محقق ساخت. در ایران نیز Mahdavi و همکاران (۲۰۰۸) با طراحی یک مدل از سیستم جامع اطلاعاتی مدیریت جنگل^۲ (IFMIS) در نوشهر قابلیت اجرایی چنین سیستم‌هایی را برای سازمان منابع طبیعی ایران بررسی کرد و به نتایج مطلوبی از جمله کاهش زمان دسترسی و بهبود دقت تصمیم‌گیری دست یافتند. از دیدگاه نظری، Manso و همکاران (۲۰۰۹) مدلی سه‌بعدی برای تعامل‌پذیری زیرساخت‌های داده مکانی ارائه دادند که بر تعامل‌پذیری فنی، سازمانی و معنایی تأکید دارد. این مدل سه‌بعدی، یک چارچوب جامع برای تحلیل و

پرداختند و نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از نتیجه مثبت استفاده از این فناوری‌ها در بحث مدیریت پایدار منابع طبیعی بود. Kornejady و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی را در مورد بررسی نقش زیرساخت داده‌های مکانی در مدیریت منابع طبیعی انجام دادند. براساس نتایج پژوهش، این محققین پیشنهاد کردند که تلفیق این زیرساخت با موتورهای بازی‌سازی می‌تواند به درک بهتر محیط و فرآیندهای مدیریتی در حوزه منابع طبیعی کمک کند. Bandibas & Takarada (۲۰۱۹) در یک تحقیق به بررسی نقش به اشتراک‌گذاری اطلاعات مکانی و استفاده از سرویس‌های تحت‌وب در بحث مدیریت منابع طبیعی در شرق آسیا پرداختند که نتایج آن‌ها حاکی از بازدهی بسیار بالای این سیستم در اجرای اهداف مدیریتی بوده است.

تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد پیاده‌سازی موفق زیرساخت داده‌های مکانی معمولاً بین ۳ تا ۷ سال زمان برده و نرخ موفقیت حدود ۷۵ درصد داشته‌اند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان چارچوبی ارزشمند برای پروژه‌های مشابه در سایر استان‌ها از جمله ایلام مورد استفاده قرار گیرد (Fairbairn & Al Haidan, 2009). در ایران سازمان نقشه‌برداری کشور به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین نهادهای متولی در حوزه‌های مکانی و نقشه‌برداری، نقش کلیدی در طراحی، توسعه و مدیریت زیرساخت داده‌های مکانی ایفا می‌کند. این سازمان با دارا بودن تجهیزات پیشرفته، نیروهای متخصص و دسترسی به داده‌های مکانی دقیق، به‌عنوان متولی و مرجع زیرساخت داده‌های مکانی کشور شناخته می‌شود (Baktash, 2012)؛ اما متأسفانه با گذشت بیش از دو دهه از ابلاغ سیاست‌های یکپارچه‌سازی اطلاعات مکانی هنوز اقدام مؤثری در راستای پیاده‌سازی آن صورت نگرفته است؛ که یکی از دلایل اصلی آن عدم وجود داده‌های یکپارچه حتی در بخش‌های مختلف هر سازمان بوده است. این وضعیت در ارتباط با وزارتخانه‌های وسیعی از قبیل وزارت

طراحی زیرساخت‌های داده مکانی فراهم می‌آورد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا موانع تعامل‌پذیری را در سطوح مختلف شناسایی و رفع کنند. Li و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه مروری به بررسی چالش‌ها و راهکارهای مدیریت کلان‌داده‌های مکانی پرداختند و استفاده از معماری‌های توزیع‌شده^۱ و الگوریتم‌های پیشرفته پردازش داده^۲ را پیشنهاد دادند. این مطالعه به ویژه از این جهت حائز اهمیت است که راهکارهای عملی برای مدیریت حجم عظیم داده‌های مکانی در محیط‌هایی با منابع محاسباتی محدود ارائه می‌دهد، چالشی که در بسیاری از سازمان‌های ایرانی نیز مشاهده می‌شود.

Dwivedi (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به نقش فناوری‌های مکانی در مدیریت منابع طبیعی تأکید کرد و نتایج بررسی‌های وی نشان داد که استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کمک کند. Hasnat و همکاران (۲۰۲۴) نیز در پژوهشی به بررسی کاربرد علوم مکانی و طراحی سیستم‌های مرتبط با آن در بخش مدیریت منابع طبیعی پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد که ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند تغییرات مکانی و زمانی در منابع طبیعی را به‌طور دقیق‌تر شناسایی کند و به برنامه‌ریزی بهتر کمک کند. همچنین در سال ۲۰۲۱ در اجلاس تجارت و توسعه سازمان ملل متحد مطالعه‌ای در خصوص نقش فناوری‌های فضایی در توسعه پایدار انجام شد که نتایج آن حاکی از این است که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ایجاد یک زیرساخت داده مکانی می‌تواند در نظارت بر تغییرات محیطی و مدیریت منابع طبیعی بسیار مؤثر باشند (United Nations Conference on Trade and Development, 2021).

Faraji و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی تلفیق فناوری‌های نوین در بحث زیرساخت داده مکانی

عزیز و همکاران

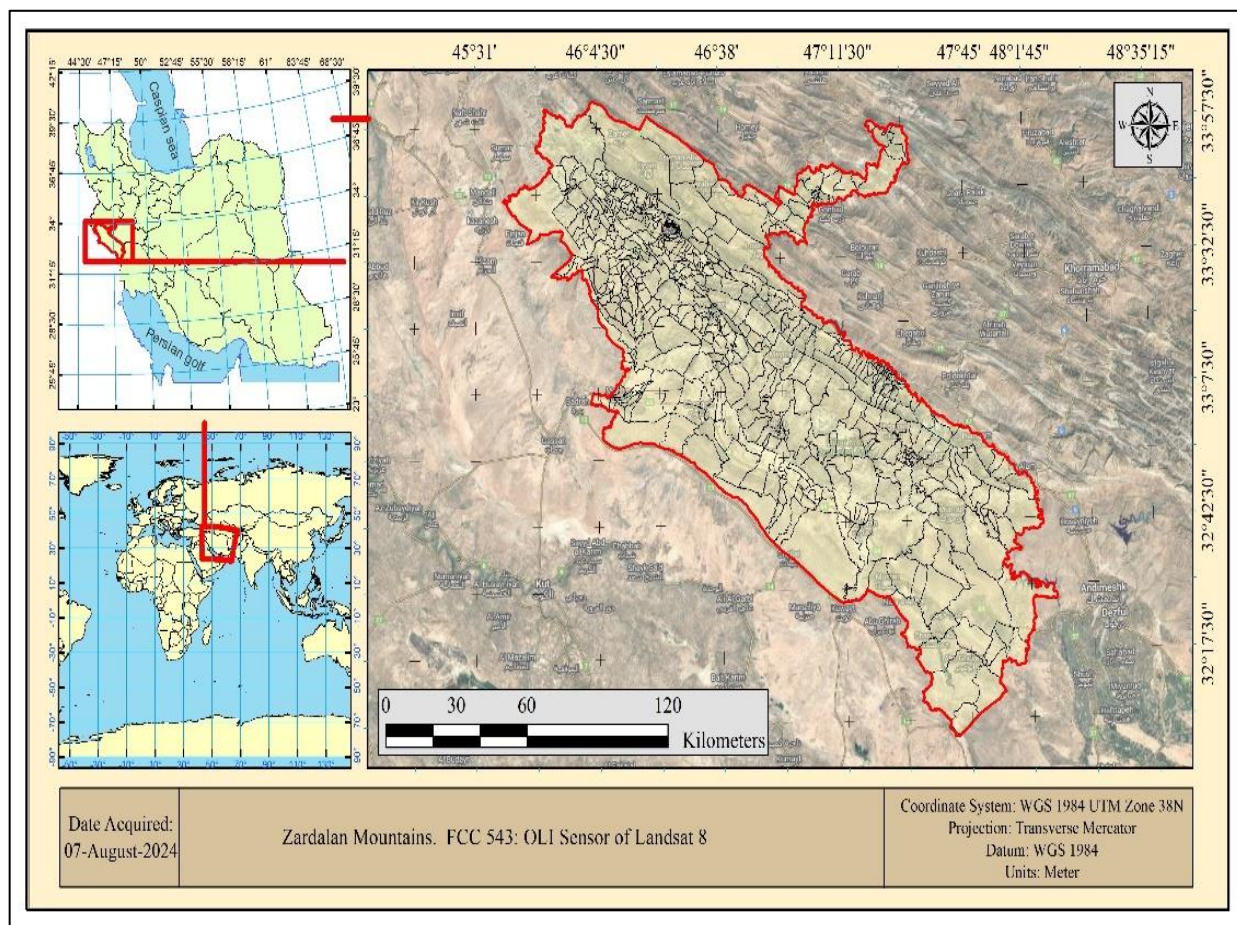
جغرافیایی $32^{\circ} 01' 22''$ تا $34^{\circ} 02' 40''$ شمالی قرار گرفته است. استان ایلام یکی از استان‌های غربی ایران است که با طبیعت کوهستانی و چشم‌اندازهای بکر خود شناخته می‌شود. این استان در مرز ایران و عراق قرار دارد و از نظر جغرافیایی، بخشی از رشته‌کوه زاگرس را در بر می‌گیرد که نقشه محدوده مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدیریت پایدار منابع طبیعی یکی از چالش‌های اساسی در عصر حاضر است که نیازمند استفاده از فناوری‌های پیشرفته و سیستم‌های اطلاعاتی کارآمد است. زیرساخت داده‌های مکانی به‌عنوان یک چارچوب فنی و سازمانی، نقش کلیدی در جمع‌آوری، مدیریت، تحلیل و توزیع داده‌های مکانی مرتبط با منابع طبیعی را ایفا می‌کند (Goharian & Azizpour, 2020).

جهادکشاورزی که تنوع داده‌های مورد استفاده در آن زیاد است محسوس‌تر می‌باشد. پژوهش حاضر درصدد است با بررسی ساختاری یکی از زیرمجموعه‌های مهم وزارت جهادکشاورزی یعنی ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری و همچنین اطلاعات تهیه شده در هر بخش، اقدام به یکپارچه‌سازی، طراحی و پیاده‌سازی یک زیرساخت داده‌های مکانی در بحث مدیریت منابع طبیعی در بخش‌های مختلف آن گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کل محدوده جغرافیایی استان ایلام می‌باشد که در محدوده طول جغرافیایی $48^{\circ} 38' 41''$ تا $48^{\circ} 09' 01''$ شرقی و عرض



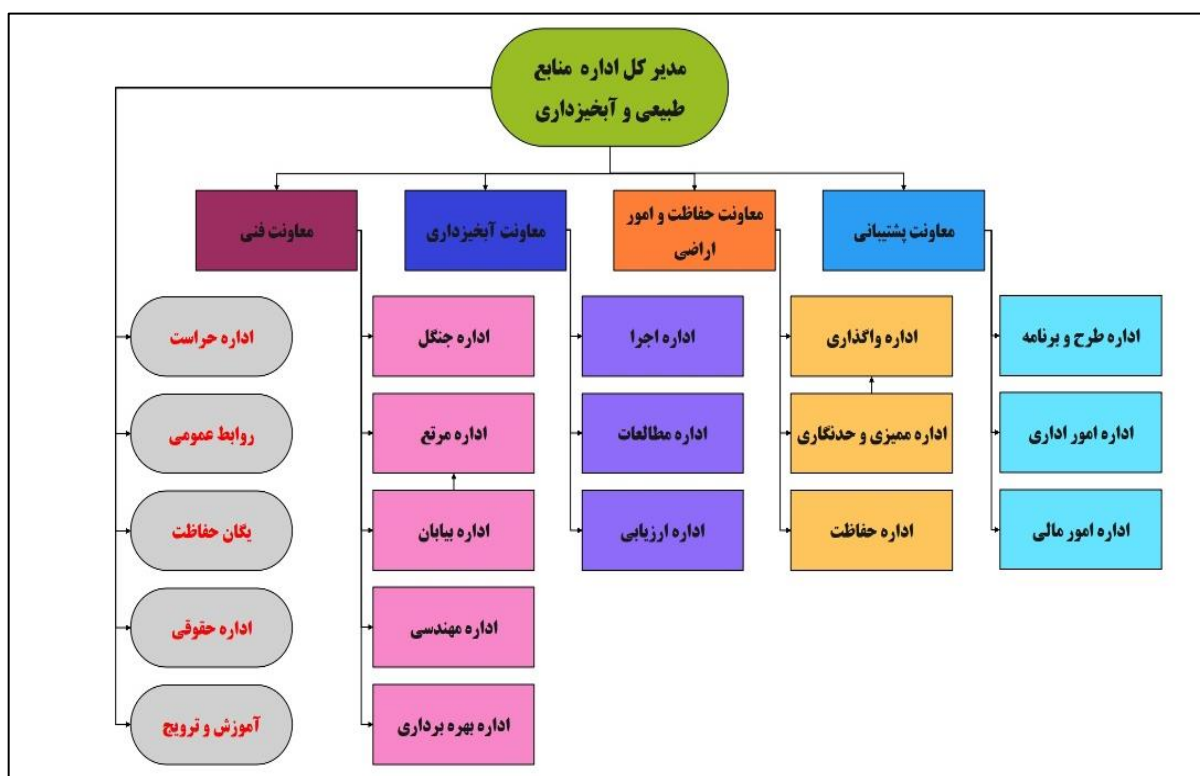
شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Study Area

مشارکت ذینفعان: برگزاری جلسات و کارگاه‌ها برای شناسایی نیازها و انتظارات ذینفعان براساس بررسی‌های صورت گرفته جهت اجرای زیرساخت داده مکانی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی در گام نخست باید بخش‌های مختلف ادارات کل از نظر چارت‌های سازمانی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا در شکل ۲ چارت سازمانی ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری را نشان می‌دهد.

پیاده‌سازی یک زیرساخت داده‌های مکانی فرآیندی پیچیده و چندمرحله‌ای است که نیازمند شناخت، برنامه‌ریزی دقیق، همکاری بین سازمانی و حتی درون سازمانی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته می‌باشد که مراحل اجرای آن به شرح ذیل می‌باشد.
گام ۱: نیازسنجی و تعیین اهداف
۱،۱ شناسایی ذینفعان

ذینفعان اصلی: سازمان‌های دولتی، پژوهشگران، بخش خصوصی، جوامع محلی و سازمان‌های غیردولتی



شکل ۲- چارت سازمانی ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری (Nourian Tel Zali & Gholami, 2015)

2- The organizational chart of the Departments of Natural Resources and Watershed Management
(Nourian Tel Zali & Gholami, 2015)

به ذکر است این چارت مربوط به ساختار ادارات کل منابع طبیعی استان ها بوده که براساس بررسی آخرین ساختار سازمانی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان ایلام تدوین شده است^۱.

براساس چارت سازمانی، ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری دارای چهار معاونت بوده که هرکدام دارای واحدهای مجزا با مسئولیت‌های متفاوت می‌باشند که شرح وظایف هر اداره در جدول ۱ ارائه شده است لازم

۱- چارت سازمانی ارائه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور به آدرس اینترنتی: <https://frw.ir>

جدول ۱- خلاصه وظایف بخش‌های مختلف ادارات منابع طبیعی براساس چارت سازمانی

Table 1- Summary of the responsibilities of various Natural Resources departments based on the organizational chart

ردیف	معاونت	اداره	وظایف
1	معاونت فنی	جنگل	هدایت و نظارت در شناسایی منابع جنگلی، برنامه‌ریزی به منظور نظارت بر تهیه طرح‌های جامع جنگلداری و جنگل‌کاری، هدایت سیاست‌ها و برنامه‌ها در موضوع اجرای طرح‌های مشارکت مردمی مطالعه، تهیه و تدوین اهداف و سیاست‌ها و خط‌مشی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت در زمینه مدیریت مراتع، برنامه‌ریزی و پیگیری و حمایت در جهت تولید اطلاعات پایه
		بیابان	تعیین شاخص‌ها و معیارهای بیابان‌زایی جهت پایش، بررسی، شناخت و ارائه برنامه لازم جهت مدیریت پایدار عرصه‌های بیابانی، نظارت بر مطالعات و تهیه طرح‌های مرتبط با بخش بیابان به‌روزرسانی و ارائه آمار و اطلاعات مکانی منابع طبیعی، بازنگری و به‌روزرسانی نقشه‌ها و اطلاعات مکانی موجود و تهیه نقشه‌های جدید در حوزه منابع طبیعی
		مهندسی و مطالعات بهره‌برداری	مطالعه و شناسایی منابع و وضعیت تولید و مصرف چوب جنگلی، رویشگاه‌های محصولات فرعی جنگلی و مرتعی و سایر منابع سلولزی و لیگنوسولزی
2	معاونت آبخیزداری	اجرا	اجرای طرح‌های آبخیزداری جهت حفاظت از منابع آب‌و خاک
		مطالعات	تهیه طرح و اجرای برنامه‌های آبخیزداری و حفاظت خاک و نظارت بر آن، اقدام در جهت ایجاد و توسعه ایستگاه‌های اندازه‌گیری در حوزه‌های آبخیز جهت تهیه آمار و اطلاعات پایه
3	معاونت حفاظت و امور اراضی	ارزیابی	ارزیابی و بررسی طرح‌های آبخیزداری جهت برنامه‌ریزی در دوره‌های میان‌مدت و بلندمدت
		استعدادیابی و واگذاری	برنامه‌ریزی لازم جهت شناسایی، مکان‌یابی، استعدادیابی و تعیین قابلیت و کاربری اراضی ملی و دولتی، مطالعه و برنامه‌ریزی در خصوص نحوه تخصیص اراضی
		ممیزی	سیاست‌گذاری در زمینه بررسی و شناسایی منابع طبیعی، سیاست‌گذاری در خصوص تنظیم برگ‌های تشخیص و صدور آگهی اعلام اراضی ملی و دولتی
4	معاونت پشتیبانی	حفاظت و حمایت	تدوین راهبردها و ارائه خط‌مشی‌های فنی و اجرایی بخش حفاظت و حمایت، پایش، نظارت و ارزیابی طرح‌ها و پروژه‌های حفاظتی و حمایتی
		طرح و برنامه	تهیه و تدوین برنامه‌های مناسب برای استقرار چرخه بهره‌وری و مدیریت کیفیت در سطح سازمان مطالعه، بررسی و نظارت بر تدوین سیستم‌ها و روش‌های انجام کار متناسب با مصوبات شورای عالی اداری، پیش‌بینی و تأمین نیروی انسانی موردنیاز سازمان بر اساس برنامه‌های پنج‌ساله توسعه
		امور مالی	برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی به‌منظور انجام وظایف امور مالی سازمان برابر مقررات
5	-	حراست	تأمین امنیت فیزیکی، حفاظت از اطلاعات، پیشگیری و تحقیق، بررسی پس‌زمینه در مورد کارکنان مدیریت ارتباط و بهره‌برداری مستمر سازمان با رسانه‌های گروهی، مستندسازی طرح‌ها و پروژه‌های منابع طبیعی و آبخیزداری کشور
		روابط عمومی	افزایش اثربخشی فعالیت‌های سازمان، سرعت بخشیدن به اجرای احکام و مقررات حفاظتی سازمان، تقویت برنامه‌های پیشگیری و کاهش پرونده‌های متشکله از طریق اجرای اقدامات بازدارنده
		حقوقی	تهیه و تنظیم و پیشنهاد آیین‌نامه‌ها، اقامه و طرح و پاسخ به دعاوی له و علیه سازمان، نظارت بر اجرا و اعمال قانون، جمع‌آوری و تحلیل آمارهای مربوط به اقدامات حقوقی و تخریب و تصرف اراضی ملی
	ترویج و آموزش		برنامه‌ریزی در جهت ترویج و گسترش فرهنگ مشارکت در منابع طبیعی، بررسی و تعیین نیازهای آموزشی کارکنان، برنامه‌ریزی در جهت مطالعه و بررسی ابعاد اجتماعی

ارتباطی تنگاتنگ بوده و در واقع از اطلاعاتی یکسان جهت دستیابی به اهداف خود استفاده می‌کنند؛ اما به علت اینکه هر یک از واحدها براساس دستورالعمل‌های خود اقدام به تهیه لایه‌های اطلاعاتی خود می‌نمایند، گاهی در هنگام ارائه اطلاعات به واحدهای دیگر مغایرت‌های بسیار مشاهده شده که این امر باعث

با بررسی شرح وظایف ذاتی هر یک از واحدهای تابعه هر معاونت می‌توان به این نتیجه رسید که تمامی واحدهای مذکور سه هدف اصلی یعنی مطالعه و بررسی، اجرای طرح‌ها و قوانین و نیز پشتیبانی از آنها را دنبال می‌کنند. همچنین با نگاهی دقیق‌تر به شرح وظایف مشخص است که برخی از واحدها با هم دارای

هر یک از آن‌ها مشخص شد. براساس بررسی‌های صورت گرفته، واحدهای مختلف از نظر استفاده از نوع داده‌های مکانی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند (جدول ۲).

مشکلات متعدد و کند شدن روند اجرای خدمات به‌خصوص در بحث اطلاعات مکان‌محور می‌شود. در راستای انجام این پژوهش در گام نخست واحدهای مرتبط با هم در سطح ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری شناسایی و لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده

جدول ۲- لایه‌های موردنیاز واحدهای مختلف ادارات منابع طبیعی

Table 2 — Required layers for various units within the Natural Resources Departments

ردیف	معاونت	اداره	لایه‌های اطلاعاتی
1	معاونت فنی	جنگل	اراضی جنگلی، محدوده جنگل کاری، پارک‌های جنگلی، ذخیره‌گاه‌های جنگلی، نهالستان‌ها
		مرتع	سامان‌های عرفی، طرح‌های مرتع‌داری، محدوده‌های عملیات طرح‌های مرتع‌داری
		بیابان	محدوده بیابان‌ها، محدوده طرح‌های بیابان‌زدایی، عملیات احیایی
		مهندسی و مطالعات	نقشه‌های پایه توپوگرافی، عکس‌های هوایی، نقشه‌های آمایش سرزمین و اطلاعات مکانی پایه
		بهره‌برداری	محدوده عملیاتی شرکت‌های تعاونی بهره‌برداری
2	معاونت آبخیزداری	مطالعات آبخیز	محدوده حوزه‌های آبخیز، مناطق مدیریت حوزه آبخیز، مکانیابی و شناسایی مناطق بحرانی
3	معاونت حفاظت و امور اراضی	استعدادیابی و واگذاری	اراضی واگذاری، طرح‌های ماده ۳ (مرتع، طرح جنگل کاری و طرح‌های اقتصادی)، محدوده‌های طرح‌های هادی و راه و شهرسازی، اراضی موضوع ماده ۶۹ نهادهای دولتی و عمومی
		ممیزی	محدوده پلاک‌های اجرای مقررات، نقشه‌های ماهیت اراضی، آراء کمیسیون‌ها، نقشه‌های حدنگاری
		حفاظت و حمایت	نقشه مناطق بحرانی (حریق-آفات)، معادن
4	-	یگان حفاظت حقوقی	بهره‌بردار بهره‌بردار
		ترویج و آموزش	شناسایی جوامع هدف (روستایی و عشایری، مدارس)

توسط اداره استعدادیابی بایستی الزاماً خارج از محدوده مستثنیات قانونی پلاک در نقشه‌های اجرای مقررات بوده که این نقشه توسط واحد ممیزی تهیه می‌گردد؛ لذا به‌منظور تهیه هرگونه لایه، واحد استعدادیابی باید از اداره ممیزی استعلام گیرد که این مهم یکی از عوامل کندشدن روند جریان کاری و برخی مواقع اشتباهات در پاسخ به استعلامات شده است. یکی دیگر از واحدهای درگیر با اطلاعات مکان‌محور در ادارات منابع طبیعی، واحدهای بهره‌بردار از این اطلاعات هستند (واحد یگان حفاظت و حقوقی). اگرچه این واحدها به‌ظاهر ارتباط مستقیمی با این‌گونه اطلاعات ندارند، اما با توجه به وظایف ذاتی آن‌ها یعنی حفاظت از

براساس جدول ۲ هر کدام از واحدها بنا به نیازهای کاری، لایه‌های موردنیاز خود را تهیه کرده و برخی نیز به‌عنوان بهره‌بردار از آن لایه‌ها شناخته می‌شوند. لازم به ذکر است از میان ادارات مذکور، اداره مهندسی و مطالعات وظیفه تهیه و آرشیو لایه‌های اطلاعاتی از قبیل نقشه‌های پایه (نقشه‌های توپوگرافی، کاربری، پوشش اراضی، آمایش سرزمین)، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و غیره را به‌عنوان لایه‌های پایه جهت تهیه نقشه‌های موضوعی سایر واحدها بر عهده دارد. براساس بررسی‌های انجام شده نقشه‌های تهیه شده توسط برخی از واحدها از نقشه‌های واحدهای دیگر استخراج می‌شوند برای نمونه نقشه‌های تهیه شده

۱- اهداف و نیازها

۱-۱- مدیریت پایدار منابع طبیعی: جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌های مکانی مرتبط با منابع طبیعی.

۱-۲- پیش و ارزیابی: نظارت بر وضعیت عرصه‌های منابع طبیعی، شناسایی مناطق بحرانی و برنامه‌ریزی برای اقدامات حفاظتی.

۱-۳- تصمیم‌گیری مبتنی بر داده: ارائه اطلاعات مکانی دقیق و به‌روز برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری.

۱-۴- اشتراک‌گذاری داده‌ها: تسهیل تبادل داده‌ها بین بخش‌های مختلف اداره و سایر سازمان‌های مرتبط.

۲- شناسایی و درک روابط بین موجودیت‌ها

در این مرحله ابتدا واحدهای مختلف ادارات منابع طبیعی برابر چارت سازمانی (شکل ۲) شناسایی و وظایف و داده‌های موردنیاز هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفت (جدول‌های ۱ و ۲).

۳- اجزای اصلی مدل

۳-۱- لایه‌های اطلاعاتی

داده‌های مکانی پایه: نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌های رقومی ارتفاع، داده‌های هواشناسی.

داده‌های موضوعی: اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی، خاک، آب، کاربری اراضی، محدوده مناطق حفاظت‌شده.

داده‌های پویا: داده‌های مربوط به تغییرات زمانی عرصه مانند تغییرات پوشش گیاهی، فرسایش خاک، سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها، رطوبت استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی بالا از قبیل MODIS و Sentinel

۳-۲- سخت‌افزار و نرم‌افزار

سخت‌افزار: سرورها، سیستم‌های ذخیره‌سازی، تجهیزات شبکه و سیستم‌های جمع‌آوری داده

عرصه‌های منابع طبیعی و پیگیری روند قانونی آن‌ها، آشنایی و دسترسی آن‌ها به این اطلاعات می‌تواند باعث بهره‌وری بیشتر آن‌ها در حفظ و حراست از عرصه‌های منابع ملی شود. به‌عنوان مثال، در سازوکار فعلی چنانچه تخریب و تجاوزی به عرصه‌های منابع طبیعی صورت گیرد به علت گستردگی عرصه‌ها و کمبود پرسنل امکان رصد این مناطق بسیار دشوار و اغلب ناممکن می‌باشد و حتی در صورت شناسایی، تهیه نقشه از محدوده تخریب شده جهت انجام روند حقوقی نیاز به استفاده از واحدهای دیگر دارد. این درحالی است که در صورت وجود یک سیستم یکپارچه جهت دسترسی به اطلاعات، هر یک از واحدها می‌توانند به صورت مستقل و بدون ابهام، وظایف خود را انجام داده و روند اجرای قوانین را تسهیل بخشند (Hollywood Winkelman, 2015). بدین منظور در این پژوهش به منظور افزایش بهره‌وری، کاهش خطاهای انسانی، حذف واسطه‌گری و جلوگیری از تخلفات احتمالی با ارائه یک خط‌مشی مشخص در درون سازمان، اقدام به طراحی و اجرای یک مدل یکپارچه‌سازی اطلاعات به منظور دستیابی به اهداف مدیریت پایدار منابع طبیعی شد که مراحل آن به شرح ذیل می‌باشد.

طراحی مدل مفهومی

بدین منظور در گام نخست اقدام به تعیین اهداف، شناسایی موجودیت‌ها، تعیین و درک روابط بین موجودیت‌های موردنظر و انتخاب ابزار لازم جهت اجرای آن شد که جزئیات آن به شرح زیر می‌باشد. لازم به ذکر است در این مدل جهت دستیابی به اهداف پژوهش از رویکرد استفاده از مدل‌های متن‌باز، الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌های نظیر شاخص‌های طیفی و استانداردهای انتشار داده‌های مکانی و همچنین سیستم‌های احراز هویت مبتنی بر توکن استفاده شد.

داده‌های مستمر از سطح زمین برای دوره‌های طولانی می‌باشد که این مورد تضمین‌شوندگی این داده‌ها را اثبات می‌کند. از نظر تأثیر شرایط آب و هوایی روی این داده‌ها باید گفت که عمده حوادث و فعالیت‌های مرتبط با عرصه‌های منابع طبیعی نظیر آتش‌سوزی و یا مدیریت منابع آبی غالباً مربوط به فصول خشک بوده که در این فصول مشکلاتی بابت داده‌های ماهواره‌ای وجود نخواهد داشت. همچنین استفاده از داده‌های راداری Sentinel A هم می‌تواند پوششی برای زمان‌های نامساعد آب و هوایی باشد.

۴- کاربران و ذینفعان

۴-۱- کاربران داخلی: کارشناسان منابع طبیعی، مدیران، برنامه‌ریزان سازمان
 ۴-۲- کاربران خارجی: سایر سازمان‌های دولتی، واحدهای مرتبط درون سازمانی و ادارات بازرسی

طراحی مدل منطقی

برای ایجاد یک مدل منطقی جهت ارائه خدمات زیرساخت داده‌های مکانی در سطح ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری، ابتدا باید اجزای اصلی سیستم و ارتباطات بین آن‌ها به صورت ساختاریافته و منطقی تعریف شود. در واقع مدل منطقی، پایه‌ای برای طراحی پایگاه داده و سیستم‌های اطلاعاتی است و به کاربران کمک می‌کند تا داده‌ها، فرآیندها و سرویس‌ها به شکلی سازمان‌یافته و قابل اجرا پیاده‌سازی شود (Kalantari Oskouei et al., 2018). مراحل طراحی این مدل منطقی به شرح ذیل می‌باشد.

۱- موجودیت‌های اصلی

این موجودیت‌ها نماینده اجزای اصلی سیستم هستند که داده‌های مکانی و غیرمکانی را مدیریت می‌کنند (جدول ۳).

(دوربین‌ها، گیرنده‌های ماهواره‌ای^۱ GNSS، پهپاد و غیره)

نرم‌افزار: سیستم‌های مدیریت پایگاه داده (مانند PostgreSQL، SqlServer)، نرم‌افزارها و ابزارهای تحلیل مکانی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای (مانند QGIS، ArcGIS، ERDAS، SNAP و ENVI) و زبان‌های برنامه‌نویسی از قبیل Python و JavaScript

۳-۳- مدل داده مکانی

با توجه به کاربرد این مدل و ضرورت استفاده بخش‌های مختلف سازمان از آن، بایستی انتشار داده‌ها براساس پروتکل و استانداردهای خاص صورت گیرد که هم امنیت داده‌ها حفظ شود و هم دسترسی به آن‌ها فاقد پیچیدگی باشد. بدین منظور در این پژوهش از مدل داده مکانی سمت سرور^۲ استفاده شد. در این مدل داده تمامی پردازش‌ها براساس استانداردهای مشخص از سمت سرور انجام گرفته و بسته به دسترسی کاربران در قالب استانداردهای انتشار داده‌های مکانی در دسترس قرار می‌گیرند (Fisher & Reed, 2005). در این پژوهش جهت استفاده کاربران از داده‌های ماهواره‌ای در کاربردهای مختلف، از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک زمانی ۵ روزه استفاده شد. در این مدل، برای تحلیل داده‌های مکانی از الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی استفاده شده است. از مهم‌ترین روش‌های پردازشی می‌توان به محاسبه لحظه‌ای شاخص‌های طیفی^۳ NDVI،^۴ EVI،^۵ NDWI برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی، آب و خشکی اشاره کرد.

در خصوص بحث وجود داده‌های ماهواره‌ای باید گفت با توجه به فعالیت مستمر آژانس فضایی اتحادیه اروپا و پشتیبانی سریع آن‌ها از جمله قرار دادن ۹ ماهواره، رصد زمین در طول کمتر از ۱۰ سال نشان از وجود

4- Enhanced Vegetation Index
 5- Normalized Difference Water Index

1- Global Navigation Satellite System
 2- Server-Side Spatial Data Model
 3- Normalized Difference Vegetation Index

عزیز و همکاران

جدول ۳- موجودیت‌های اصلی مدل منطقی زیرساخت داده‌های مکانی در سامانه پیشنهادی

Table 3- Main entities of the logical model of SDI in the proposed system

ردیف	عنوان	موجودیت‌های اصلی مدل
1	حوزه فنی	جنگل‌ها مراتع بیابان
2	حوزه آبخیز	حوزه‌های آبخیز رودخانه‌ها منابع آبی
3	حوزه حفاظت	پلاک‌های اجرای مقررات حدنگاری (محدوده اراضی ملی و مستثنیات، واگذاری‌ها، آرای قضایی، طرح‌های ماده ۳ و غیره)
4	داده‌های مکانی	لایه‌های مکانی عمومی تصاویر ماهواره‌ای مدل‌های رقومی ارتفاع نقشه‌های پایه
5	کاربران	کارشناسان منابع طبیعی مدیران سازمان‌های مرتبط
6	سرویس‌ها	سرویس‌های وب مکانی سرویس‌های تحلیل مکانی سرویس‌های اشتراک‌گذاری داده‌ها

۲- جدول‌ها و لایه‌ها هر موجودیت به یک یا چند جدول در پایگاه داده تبدیل می‌شود. در این پژوهش لایه‌های مکانی مورد نظر و جدول‌های عارضه آن‌ها به شرح زیر می‌باشد (جدول‌های ۴ تا ۹).

جدول ۴- جزییات جدول و لایه مربوط به حوزه فنی

Table 4- Table and layer details related to the technical sector

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصره‌فرد
2	Type	String	نوع لایه (جنگل، مرتع، بیابان)
3	Location	Geometry (Polygon)	موقعیت مکانی
4	Area	Float	مساحت منطقه
5	Description	Text	توضیحات توصیفی
6	Last_Update	Date	تاریخ آخرین به‌روزرسانی

جدول ۵- جزییات جدول و لایه مربوط به حوزه آبخیز

Table 5- Table and layer details related to the watershed sector

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصره‌فرد
2	Name	String	نام آبخیز
3	Basin_Area	Float	مساحت حوزه آبخیز
4	Main_River	String	نام رودخانه اصلی
5	Flood_Risk_Level	String	(سطح خطر سیل (کم، متوسط، زیاد)
6	Location	Geometry (Polygon)	موقعیت مکانی

جدول ۶- جزییات جدول و لایه مربوط به حوزه حفاظت

Table 6- Table and layer details related to the conservation sector

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصر به فرد
2	Type	String	نوع لایه (محدوده پلاک، اراضی ملی و مستثنیات، واگذاری‌ها، آرای قضایی، طرح‌های ماده ۳)
3	Area	Float	مساحت
4	Description	Text	توضیحات توصیفی
5	Location	Geometry (Polygon)	موقعیت مکانی

جدول ۷- جزییات جدول و لایه مربوط به داده‌های مکانی

Table 7- Details of tables and layers related to spatial data

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصر به فرد داده
2	Type	String	(نوع داده (نقشه، تصویر ماهواره‌ای و غیره)
3	Source	String	(منبع داده (ماهواره، برداشت میدانی و غیره)
4	Resolution	Float	(وضوح داده (برای تصاویر ماهواره‌ای)
5	Location	Geometry (Polygon)	موقعیت مکانی
6	Date_Collected	Date	تاریخ جمع‌آوری داده

جدول ۸- جزییات جدول و لایه مربوط کاربران

Table 8- Details of tables and layers related to users

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصر به فرد کاربر
2	Name	String	نام کاربر
3	Role	String	(نقش کاربر (کارشناس، مدیر و غیره)
4	Organization	String	سازمان مرتبط
5	Access_Level	String	(سطح دسترسی (خواندن، نوشتن، ویرایش)

جدول ۹- جزییات جدول و لایه مربوط سرویس‌ها

Table 9- Details of tables and layers related to services

ردیف	عنوان	نوع داده	توضیحات
1	ID	Integer	شناسه منحصر به فرد سرویس
2	Type	String	نوع سرویس (تحلیل مکانی، WFS، WMS و غیره)
3	Endpoint_URL	String	سرویس URL آدرس
4	Description	Text	توضیحات سرویس
5	Access_Restrictions	String	محدودیت‌های دسترسی

شامل داده‌های مکانی پایه، داده‌های موضوعی و داده‌های پویا هستند. هر لایه اطلاعاتی با سایر لایه‌ها از طریق کلیدهای خارجی مرتبط شده و امکان انجام تحلیل‌های پیچیده فراهم می‌شود. ۳-۱ حوزه‌های فنی، آبخیز و حفاظت

۳- ارتباطات بین موجودیت‌ها در مدل منطقی مورد نظر جهت طراحی و پیاده‌سازی این سیستم ارتباطات بین موجودیت‌ها به صورت زیر تعریف شده است. ساختار روابط میان داده‌ها بر اساس مدل^۱ ER طراحی شده است که در آن موجودیت‌ها

طراحی مدل فیزیکی

مدل فیزیکی مرحله‌ای است که در آن مدل منطقی به ساختارهای قابل اجرا در یک سیستم مدیریت پایگاه داده تبدیل می‌شود. در این مرحله، جدول‌ها، ستون‌ها، روابط، شاخص‌ها و سایر عناصر پایگاه داده به صورت دقیق و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی پیاده‌سازی می‌شوند. در این پژوهش برای ساخت مدل فیزیکی خدمات زیرساخت داده‌های مکانی در سطح ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری، از سیستم مدیریت پایگاه داده مکانی PostgreSQL/PostGIS استفاده شد که بخش‌های مختلف آن به شرح زیر می‌باشد. همچنین به منظور انجام پردازش داده‌های ماهواره‌ای از نرم‌افزارهای ERDAS، ArcGIS Server و همچنین اسکریپت‌های نوشته شده با زبان برنامه‌نویسی Python و JavaScript بهره گرفته شد.

۱- ساخت لایه‌ها، جدول‌ها و فیلدها

در این بخش لایه‌ها، جدول‌ها و فیلدهای هر جدول به همراه نوع داده‌ها و محدودیت‌ها به شرح زیر تعریف شد (جدول‌های ۱۰ تا ۱۴).

هر یک از مؤلفه‌های این بخش‌ها به طور کلی زیرمجموعه یک لایه اولیه بنام محدوده پلاک‌های اجرای مقررات قرار می‌گیرند و در سطح بعد لایه‌های حوزه‌های فنی و آبخیز به صورت متقابل با لایه‌های حوزه حفاظت مرتبط می‌شوند (رابطه چند به چند).

۲-۳- داده‌های مکانی و حوزه‌های سه‌گانه

هر یک از لایه‌های مربوط به حوزه‌های سه‌گانه با یک یا چند لایه مکانی مرتبط است (رابطه یک به چند).

۳-۳- کاربران و سرویس‌ها

کاربران می‌توانند از سرویس‌های مختلف استفاده کنند (رابطه چند به چند).

۴-۳- داده‌های مکانی و سرویس‌ها

سرویس‌ها از داده‌های مکانی برای ارائه اطلاعات استفاده می‌کنند (رابطه یک به چند).

۴- پیاده‌سازی مدل منطقی

جهت پیاده‌سازی این مدل منطقی، با توجه به وجود ابزارهای متن‌باز و تجاری مختلف، به دلیل مزایای استفاده از فناوری‌های متن‌باز از قبیل امنیت بالا، جامعه کاربری گسترده، رایگان بودن و غیره، در این پژوهش از سیستم مدیریت پایگاه داده مکانی متن‌باز استفاده شد.

جدول ۱۰- مدل فیزیکی لایه مربوط به حوزه فنی به زبان SQL

Table 10- Physical model of the layer related to the technical unit in SQL

SQL
CREATE TABLE Natural_Resources (Resource_ID SERIAL PRIMARY KEY, Resource_Type VARCHAR(50) NOT NULL, Location GEOMETRY(Polygon, 4326) NOT NULL, Area FLOAT CHECK (Area > 0), Description TEXT, Last_Update DATE DEFAULT CURRENT_DATE

جدول ۱۱- مدل فیزیکی لایه مربوط به حوزه آبخیز به زبان SQL

Table 11- Physical model of the layer related to the watershed unit in SQL

SQL
CREATE TABLE Watersheds (Watershed_ID SERIAL PRIMARY KEY, Watershed_Name VARCHAR(100) NOT NULL, Basin_Area FLOAT CHECK (Basin_Area > 0), Main_River VARCHAR(100), Location GEOMETRY(Polygon, 4326) NOT NULL

جدول ۱۲- مدل فیزیکی لایه مربوط به حوزه حفاظت به زبان SQL

Table 12 - The physical model of the layer related to the protection unit in SQL

SQL
<pre>CREATE TABLE Spatial_Data (Data_ID SERIAL PRIMARY KEY, Data_Type VARCHAR(50) NOT NULL, Source VARCHAR(100) NOT NULL, Resolution FLOAT CHECK (Resolution > 0), Location GEOMETRY(Polygon, 4326) NOT NULL, Date_Collected DATE NOT NULL</pre>

جدول ۱۳- مدل فیزیکی لایه مربوط به کاربران به زبان SQL

Table 13 - The physical model of the layer related to users in SQL

SQL
<pre>CREATE TABLE Users (User_ID SERIAL PRIMARY KEY, User_Name VARCHAR(100) NOT NULL, Role VARCHAR(50) NOT NULL, Organization VARCHAR(100), Access_Level VARCHAR(50) CHECK (Access_Level IN ('Read', 'Write', 'Admin'))</pre>

جدول ۱۴- مدل فیزیکی لایه مربوط به سرویس‌ها به زبان SQL

Table 14 - The physical model of the layer related to services in SQL

SQL
<pre>CREATE TABLE Services (Service_ID SERIAL PRIMARY KEY, Service_Type VARCHAR(50) NOT NULL, Endpoint_URL VARCHAR(200) NOT NULL, Description TEXT, Access_Restrictions VARCHAR(100)</pre>

۲- تعیین روابط بین جدول‌ها
 پس از تعریف روابط بین موجودیت‌ها و لایه‌های
 طراحی شده، روابط بین جدول‌ها با استفاده از
 کلیدهای خارجی بین لایه‌های مختلف به صورت زیر
 تشکیل شد (جدول ۱۵).

جدول ۱۵- مدل فیزیکی ارتباط لایه‌ها به زبان SQL

Table 15 - The physical model of layer relationships in SQL

SQL
<pre>CREATE TABLE Users_Services (User_ID INT REFERENCES Users(User_ID) ON DELETE CASCADE, Service_ID INT REFERENCES Services(Service_ID) ON DELETE CASCADE, PRIMARY KEY (User_ID, Service_ID)</pre>

۳- شاخص‌ها
 پس از ساخت لایه‌ها و جدول‌های اطلاعاتی و همچنین
 ارتباط بین لایه‌ها برای بهبود عملکرد جستجو و
 پرس‌وجوها، شاخص‌هایی روی ستون‌های پرکاربرد
 ایجاد گردید (جدول ۱۶).

این مرحله که به‌عنوان مرحله انتشار داده تعریف
 می‌شود، مشخص کننده سازوکار موردنظر جهت
 نمایش اطلاعات مکانی به کاربران نهایی می‌باشد. در
 این پژوهش با توجه به اهمیت داده‌ها و لزوم حفظ
 امنیت آن‌ها و جلوگیری از امکان کپی‌برداری از
 سرویس‌های مکانی مانند WMS^۱ و WMTS^۲ ارائه

۴- پیاده‌سازی سرویس‌های مکانی

کاربر ارائه می‌شوند و کاربران تنها امکان مشاهده آن را خواهند داشت (Sun et al., 2015).

شده بر بستر GeoServer استفاده شد. در این سرویس اطلاعات پس از درخواست کاربر و پردازش از سمت سرور در قالب نقشه‌های گرافیکی بر روی نمایشگر

جدول ۱۶- مدل فیزیکی شاخص‌گذاری لایه‌ها به زبان SQL

Table 16 - The physical model of layer indexing in SQL

SQL
Natural_Resources CREATE INDEX idx_natural_resources_location ON Natural_Resources USING GIST (Location);
Watersheds CREATE INDEX idx_watersheds_location ON Watersheds USING GIST (Location);
Spatial_Data CREATE INDEX idx_spatial_data_location ON Spatial_Data USING GIST (Location);
Watersheds CREATE INDEX idx_watersheds_name ON Watersheds (Watershed_Name);
Services CREATE INDEX idx_services_type ON Services (Service_Type);

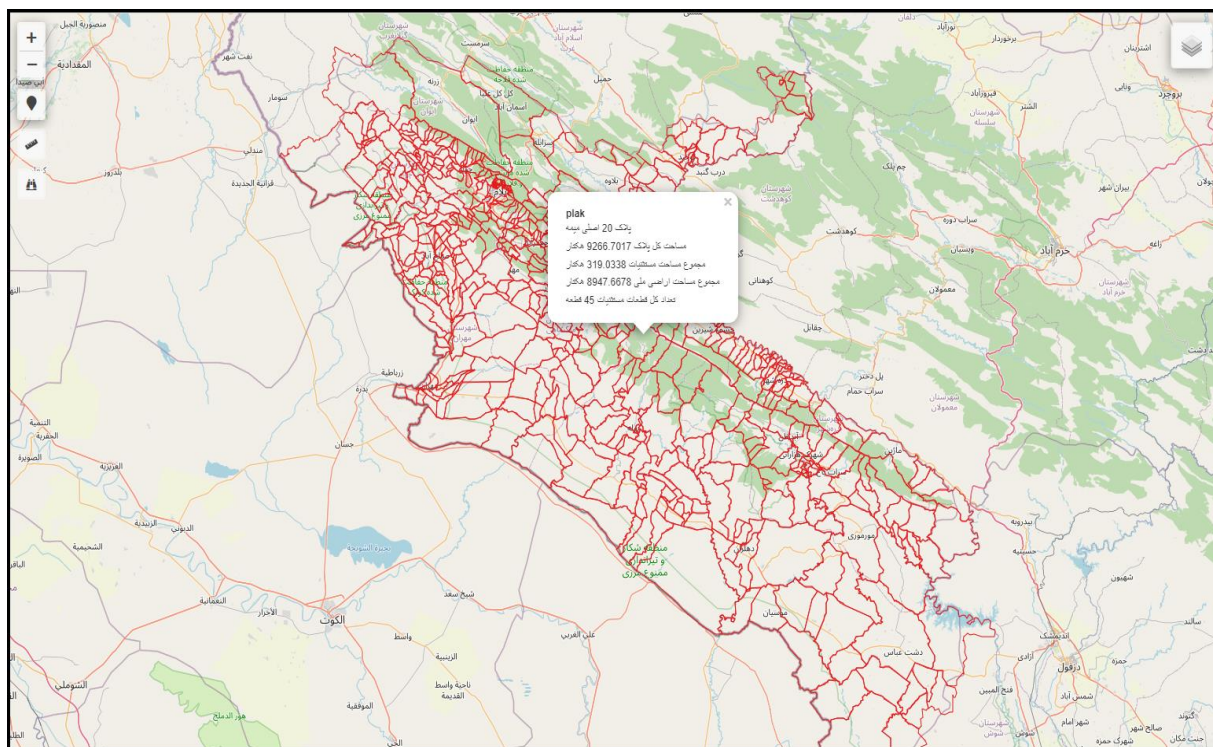
کاربران پیاده‌سازی شده است. در این پژوهش از سرورهای واسط نظیر Apache و انتشار اطلاعات براساس استانداردهای OGC^۱ و ارائه توکن‌های امنیتی به هر کاربر بر بستر JWT و API Key و از همه مهم‌تر قابلیت ارائه این اطلاعات بر بستر شبکه اینترنت برای حفظ امنیت داده‌ها استفاده شده است.

نتایج

همان‌طور که در بخش‌های پیشین نیز گفته شد زیرساخت داده‌های مکانی یک ابزار کلیدی در مدیریت پایدار منابع طبیعی به حساب می‌آید. با پیاده‌سازی مناسب و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، می‌توان به بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری و افزایش کارایی در مدیریت منابع طبیعی کمک کرد (Feeney et al., 2001). در این پژوهش پس از ساخت مدل‌های مفهومی، منطقی و فیزیکی و در نهایت پیاده‌سازی اطلاعات سازمان‌دهی شده، اطلاعات بر روی سرور قرار گرفته و با دامنه مشخص در دسترس کاربران قرار گرفت که نمونه‌ای از آن در شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۳).

۵- هزینه‌های پیاده‌سازی، نگهداری و به‌روزرسانی پیاده‌سازی سیستم مدیریت داده‌های مکانی شامل هزینه‌های سخت‌افزاری: خرید و استقرار سرورها و سیستم‌های ذخیره‌سازی، تجهیزات شبکه و امنیت داده‌ها، ابزارهای جمع‌آوری داده مانند گیرنده‌های GNSS، پهپادها و دوربین‌های نقشه‌برداری. هزینه‌های نرم‌افزاری: سیستم‌های مدیریت پایگاه داده (PostgreSQL + PostGIS)، نرم‌افزارهای تحلیل مکانی و پردازش تصاویر (QGIS, SNAP). هزینه‌های نگهداری و به‌روزرسانی: به‌روزرسانی سخت‌افزار و نرم‌افزار برای حفظ عملکرد سیستم. مدیریت امنیت داده‌ها و پشتیبان‌گیری منظم: آموزش کاربران و متخصصان برای بهره‌برداری مؤثر. در این پژوهش با توجه به رویکرد متن‌باز، هزینه‌های نرم‌افزاری بسیار محدود بوده و با توجه به طراحی سمت سرور مدل، هزینه‌های سخت‌افزاری نیز بسیار کاهش می‌یابد.

۶- امنیت داده‌های مکانی و حریم خصوصی با توجه به حساسیت داده‌های مکانی و ضرورت حفاظت از اطلاعات، مجموعه‌ای از مکانیزم‌های امنیتی برای مدیریت دسترسی، رمزنگاری داده‌ها، و احراز هویت

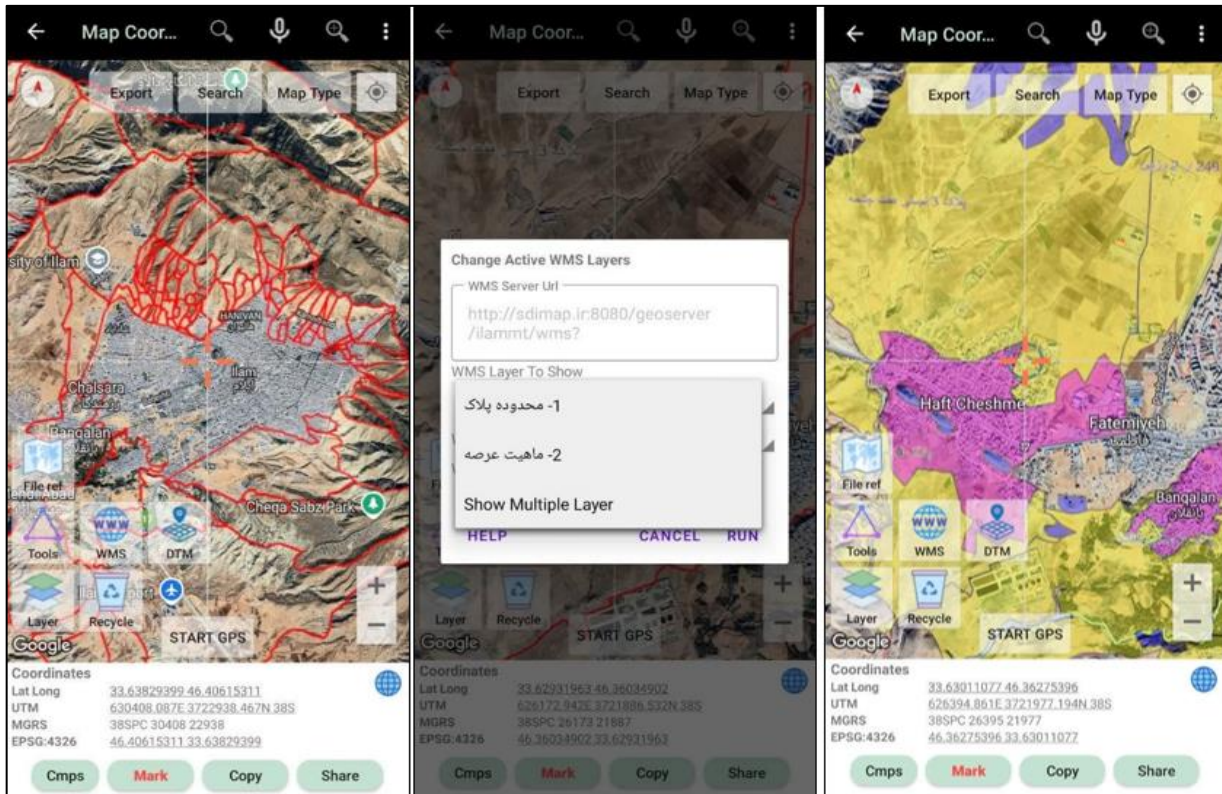


شکل ۳- اطلاعات بارگذاری شده مربوط به معاونت حفاظت بر بستر زیرساخت داده مکانی تحت وب
 Figure 3- The uploaded information related to the Protection unit on the web-based SDI

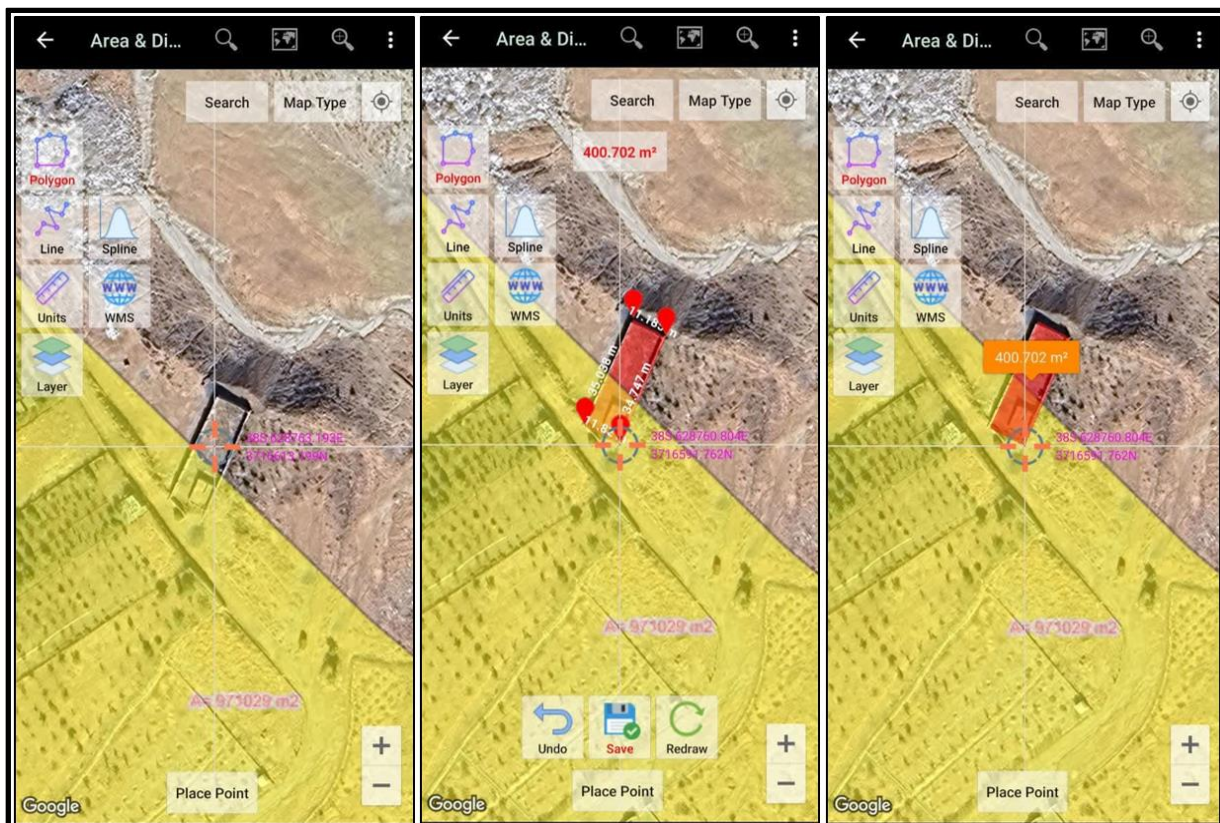
استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در Python و GDAL، زمان پردازش به چند ثانیه کاهش یافته است. همچنین زمان اجرای جستجوهای مکانی در پایگاه داده PostGIS از ۱۵ ثانیه در روش‌های مبتنی بر دسکتاپ به ۳ ثانیه کاهش یافته که این مهم موجب بهبود کارایی سامانه شده است.

یکی از نقاط قوت این سیستم استفاده از قابلیت Tile Caching در سمت سرور بوده که پس از بارگذاری لایه‌ها و مرور داده‌ها، این اطلاعات یک‌بار بر روی سرور ذخیره شده و در زمان‌های دیگر ذخیره نمی‌شوند که این قابلیت مانع از ایجاد حجم فزاینده داده در طول زمان می‌شود. این مورد در خصوص داده‌های ماهواره‌ای نیز صادق بوده و پس از بارگذاری داده‌های ماهواره‌ای جدید داده‌های قبلی حذف خواهند شد که این امر باعث پایداری این سیستم بدون تغییر در زیرساخت سخت‌افزاری در طول زمان خواهد شد. از سوی دیگر استفاده از بستر منبع‌باز برای طراحی این مدل باعث شده این سیستم مشکلی با به‌روزرسانی‌های آینده نداشته باشد.

براساس مطالب گفته شده یکی از اهداف این پژوهش سهولت دسترسی به اطلاعات در کاربردهای اجرایی منابع طبیعی در بخش‌های مختلف بود (به‌عنوان مثال استفاده کارکنان یگان حفاظت و واحد حقوقی و همچنین کارشناسان واحد ممیزی در زمان وقوع تخلفات و بازدیدهای میدانی). بدین منظور سرویس مذکور به صورت پرتابل و قابل اتصال با تلفن‌های همراه برای کارکنان فعال شد. این سرویس قابلیت فراخوانی اطلاعات با سطوح دسترسی مشخص روی تمامی نرم‌افزارهای تلفن همراه را داشته و کاربران توانایی استفاده از اطلاعات را با حداقل سخت‌افزار خواهند داشت (شکل ۴). یکی از نقاط قوت این مدل سرعت بالای آن در پردازش داده‌های مکانی است. در این مدل به علت استفاده از معماری سمت سرور و استفاده از قابلیت‌های پردازش ابری سرعت تحلیل اطلاعات نسبت به روش‌های سنتی و رایانه‌های خانگی به طرز چشمگیری افزایش یافته است. به عنوان مثال پردازش تصاویر ماهواره‌ای در روش‌های سنتی معمولاً چندین دقیقه برای هر فریم طول می‌کشید، درحالی‌که با



شکل ۴- لایه‌های بارگذاری شده واحد ممیزی بر بستر تلفن همراه
 Figure 4 - Loaded Layers of the Audit Unit on Mobile Platform



شکل ۵- قابلیت تهیه نقشه در عرصه و مشاهده ماهیت اراضی به صورت آنلاین
 Figure 5 - The capability to survey in the field and view the organized maps online

۴- امکان تغییر شفافیت لایه‌ها جهت مشاهده داده‌های پس‌زمینه.

۵- امکان فراخوانی لایه‌های مکانی آفلاین با فرمت‌های مختلف از قبیل Kml, GeoJson, Shp, DXF.

۶- امکان تهیه نقشه به صورت لایه‌های نقطه‌ای، خطی و پلی‌گونی به دو صورت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و گیرنده تعیین موقعیت ماهواره‌ای.

۷- ارائه خروجی از نقشه‌های تهیه شده در فرمت‌های Kml, GeoJson, Shp, DXF.

۸- قابلیت جستجو به دو صورت مکانی و مختصاتی. در شکل ۵ صرف و تعرض به اراضی ملی مشاهده می‌شود به‌نحوی که بخش زردرنگ مستثنیات پلاک و خارج از آن جز اراضی ملی پلاک می‌باشد. براساس این شکل، کاربر می‌تواند در هر لحظه اقدام به بررسی اراضی نموده و تصرفات انجام شده به اراضی ملی را رصد نماید. با قابلیت‌های پیاده شده در این سامانه می‌توان بدون نیاز به صرف هزینه و زمان و همچنین استفاده از تجهیزات مختلف، به صورت هم‌زمان پس از شناسایی تصرفات اقدام به اندازه‌گیری میزان آن نموده و خروجی‌های لازم را در لحظه گزارش و مستندسازی نمود.

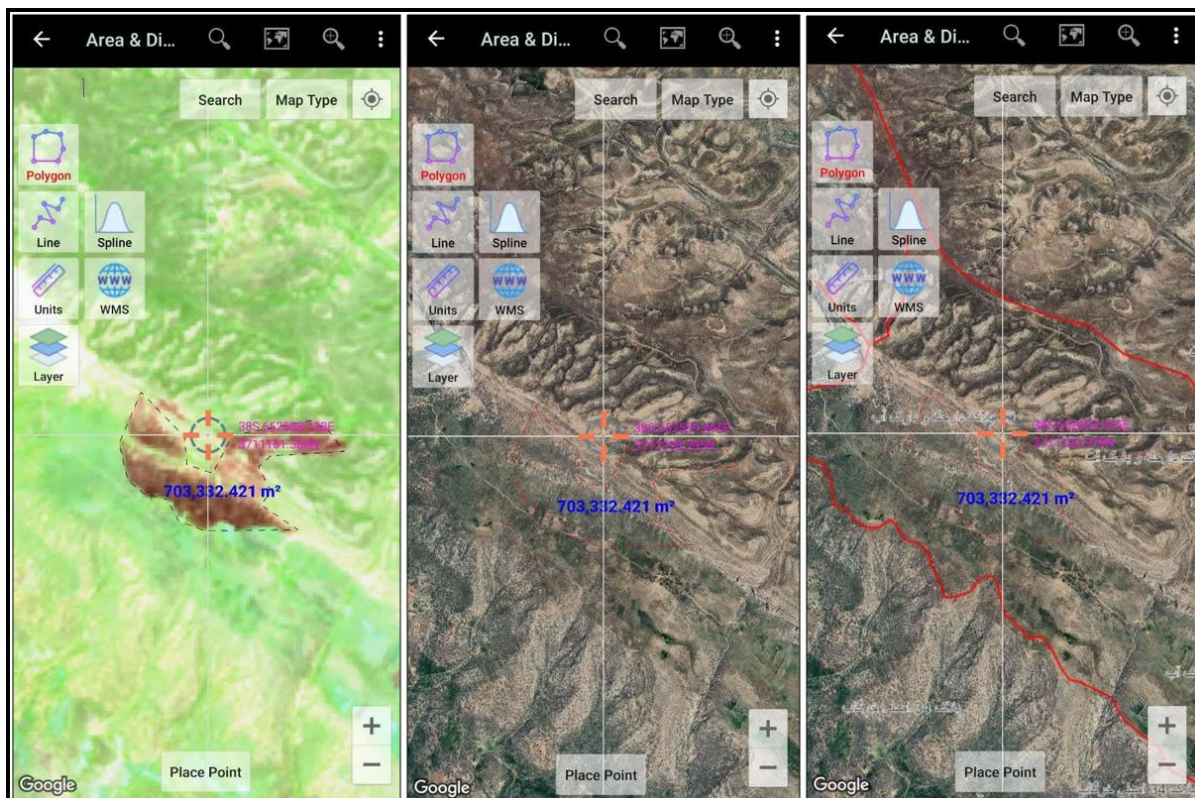
در ارتباط با بحث پایش اراضی و کمک به بهره‌وری بیشتر مدیریت منابع طبیعی برای واحدهایی از قبیل جنگل، مرتع، بیابان و آبخیز بنا به اهداف کاربری آن‌ها از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به صورت پویا و تحت این سامانه استفاده نمود. به‌عنوان نمونه شناسایی محدوده‌های آتش‌سوزی، مناطق مستند آتش‌سوزی، وضعیت پوشش گیاهی در مراتع، پایش اراضی جنگلی و همچنین کشف تصرفات به اراضی ملی به کمک پردازش تصاویر ماهواره‌ای (استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی از قبیل NDVI، SAVI، EVI و شاخص‌های تشخیص رطوبت و تنش خشکی از قبیل NDWI جهت کنترل آتش‌سوزی و شاخص‌های مشاهده تغییرات عرصه مانند FCC^۱ و ICC^۲) از قابلیت‌های این سامانه هستند که نتایج شناسایی و محاسبه سطح یک آتش‌سوزی (تاریخ ۱۴۰۳/۰۴/۲۱) با استفاده از این سامانه در شکل ۶ نشان داده شده است.

با استفاده از قابلیت موبایل‌محور این سامانه، کاربران بدون نیاز به استفاده از نرم‌افزارهای سنگین و گاهاً پیچیده دسکتاپ می‌توانند با حداقل امکانات به سرعت به داده‌های موردنظر خود دسترسی داشته و از آن‌ها استفاده کنند. در ارتباط با قابلیت‌های این سامانه جهت کاربردهای میدانی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- امکان دسترسی به لایه‌های هر واحد با سطوح دسترسی مشخص در قالب استانداردهای OGC.

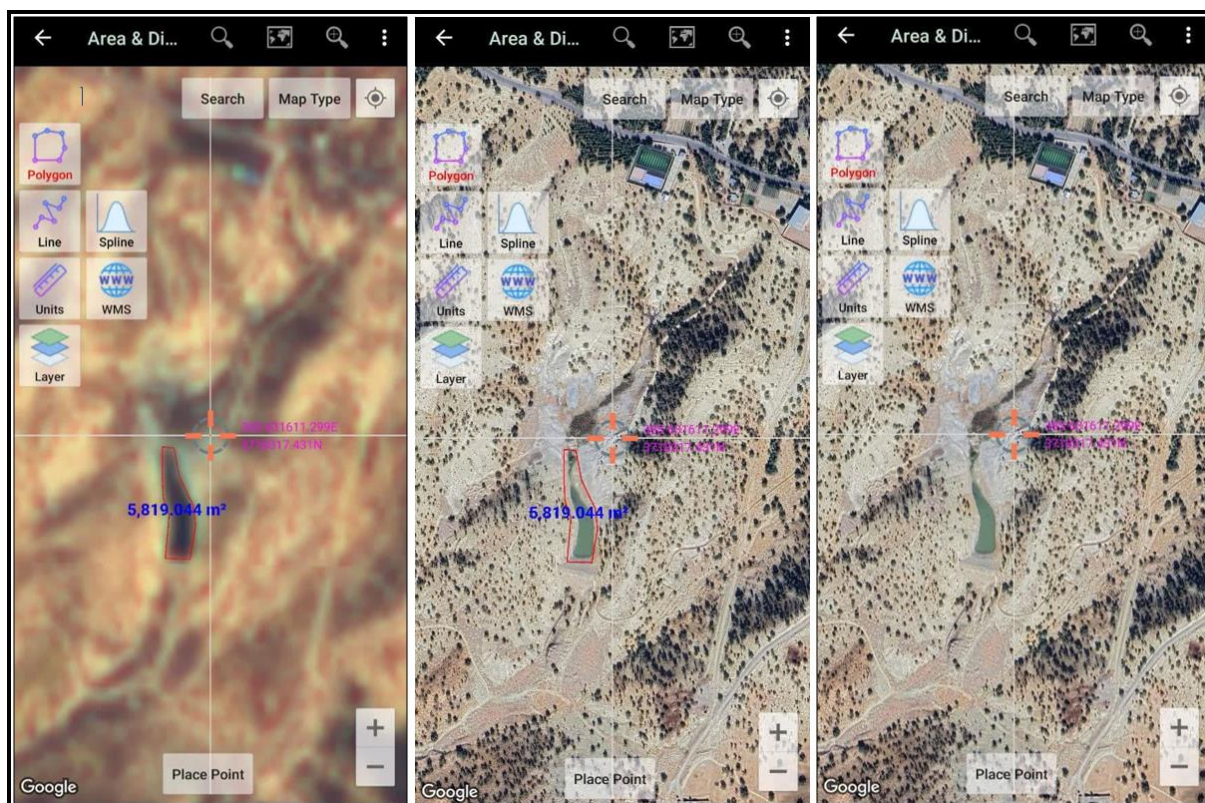
۲- امکان پردازش آنلاین تصاویر ماهواره‌ای و ارائه خروجی‌های متناسب با نیاز کاربر.

۳- امکان نمایش هم‌زمان چندلایه بر روی هم.



شکل ۶- قابلیت شناسایی محدوده آتش‌سوزی و محاسبه سطح تخریب

Figure 6 - The capability to identify fire-affected areas and measure the extent of destruction



شکل ۷- قابلیت پایش و اندازه‌گیری سطح ذخایر آبی

Figure 7 - The capability to monitor and measure the level of water bodies

بحث

نتایج این پژوهش که به صورت کاملاً عملیاتی و اجرایی در بستر ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری پیاده‌سازی شده است، نشان‌دهنده تحولی چشمگیر در مدیریت داده‌های مکانی منابع طبیعی است. برخلاف بسیاری از مطالعات نظری در این حوزه، سیستم طراحی شده در این تحقیق می‌تواند به صورت فعال به کاربران واقعی سرویس‌دهی کند و این ویژگی اجرایی، آن را از سایر پژوهش‌های صرفاً نظری متمایز می‌سازد. مزیت اصلی این سیستم در رویکرد یکپارچه‌سازی داده‌ها و ارائه سرویس‌های کاربردی به صورت عملیاتی است. نتایج نشان داد که پیاده‌سازی این زیرساخت می‌تواند موجب کاهش زمان تصمیم‌گیری‌های مدیریتی شود. در بخش پایش و کنترل تخلفات، سیستم توانسته زمان تشخیص تصرفات اراضی ملی را تا ۶۰ درصد کاهش دهد که این امر به لطف نمایش هم‌زمان لایه‌های مالکیت و کاربری و امکان اندازه‌گیری آنلاین مساحت تخلفات محقق شده است. همچنین در مدیریت بحران، سیستم با شناسایی آتش‌سوزی ۷۰ هکتاری در شهرستان ایلام و محاسبه خودکار سطح آسیب‌دیده، زمان واکنش جهت برآورد خسارت‌ها را تا ۵۰ درصد کاهش داد. نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعه انجام شده توسط Dwivedi (۲۰۲۴) که استفاده از فناوری‌های مکانی را به عنوان یک عنصر اصلی در بحث مدیریت منابع طبیعی معرفی نموده کاملاً منطبق است به طوری که در این پژوهش استفاده از فناوری‌های مختلف از قبیل سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، وب، پردازش تحت سرور و انتشار داده‌ها به روش امن و تلفیق آن‌ها با هم در بحث مدیریت حوزه‌های مختلف منابع طبیعی بسیار کارا و مؤثر بوده است. این موارد نیز نتایج پژوهش‌های Hasnat و همکاران (۲۰۲۴) که سنجش‌ازدور و پایش مستمر اراضی را کلید موفقیت در مدیریت پایدار منابع طبیعی مطرح نموده تأیید می‌کند.

نتایج این پژوهش طراحی زیرساخت داده مکانی و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و همچنین فناوری

در شکل ۶ پهنه یکی از عرصه‌های آتش‌سوزی واقع در شهرستان ایلام در محدوده پلاک دارحله با مختصات ارائه شده در تصویر، شناسایی و اندازه‌گیری شده است. این بخش از سامانه براساس پردازش سریع تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 2B با استفاده از الگوریتم بارزسازی در محدوده امواج مادون‌قرمز میانی SWIRFCC128A4 اقدام به شناسایی و تفکیک عرصه‌های آتش‌سوزی می‌کند. براساس گزارش‌گیری از سیستم پردازشی سامانه، این آتش‌سوزی در تاریخ ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ رخ داده و پس از مهار شدن سطحی معادل ۷۰ هکتار را تحت تأثیر قرار داده است. در ارتباط با پایش آبخیزها با توجه به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌روز (۵ روزه) این سامانه قابلیت پایش و نظارت بر منابع ذخیره‌شده در سازه‌های آبی به صورت آنلاین را داشته و کاربران بدون مراجعه به عرصه، توانایی پایش و تصمیم‌گیری‌های لازم را خواهند داشت. به‌عنوان مثال سازه‌های آبخیزداری احداثی توسط اداره منابع طبیعی علاوه بر نقش خود در کنترل سیلاب و فرسایش خاک، قابلیت ذخیره آب نیز خواهند داشت که این مورد در شکل ۷ نشان داده شده است.

در شکل ۷ آخرین وضعیت (بازه‌های ۵ روزه) میزان آب ذخیره شده در پشت یکی از سازه‌های آبخیزداری در ضلع شمالی فرودگاه شهدای شهر ایلام با مختصات ارائه شده در تصویر نشان داده شده است. این بخش از سامانه بر اساس پردازش سریع تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 2B با استفاده از محاسبه شاخص تشخیص پهنه‌های آبی MNDWI اقدام به شناسایی پهنه‌های آبی سطحی می‌کند. در این تصویر آخرین وضعیت ذخیره آب پشت این سازه معادل ۵۸۲۰ مترمربع بوده که با دانستن مشخصات سازه و میزان رسوب آن می‌توان حجم آن را نیز به صورت خودکار برآورد نمود؛ این در حالی است که بر اساس آخرین تصاویر ماهواره‌ای از سرویس‌هایی نظیر GoogleEarth (خردادماه ۱۴۰۳) میزان ذخیره آب در این سازه نصف مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نمی‌گیرند. لازم به ذکر است این مقاله به عنوان یک مدل پیشنهادی برای یکی از ادارات متولی مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی ارائه شده و در صورت توسعه بسته به اطلاعات بارگذاری شده بر روی سامانه، مالکیت معنوی آن در اختیار سازمان مربوطه خواهد بود.

درخصوص ریسک‌های احتمالی ناشی از خرابی سخت‌افزار یا حملات سایبری باید گفت که با توجه به استفاده از بستر منبع باز سامانه و قابلیت هماهنگی با نرم‌افزارهای اداری و همچنین امکان پیاده‌سازی بر بستر شبکه اینترنت، سطح امنیتی آن کاملاً منطبق بر زیرساخت امنیتی سازمان مربوطه می‌باشد و با توجه به اهمیت اطلاعات درون سازمانی و امنیت بالای آن ریسک خرابی و حملات سایبری آن بسیار کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی می‌تواند تحولی اساسی در مدیریت منابع طبیعی ایجاد کند. پیشنهاد می‌شود این سیستم به سایر استان‌ها و حتی وزارتخانه‌های دیگر نیز تعمیم داده شود. برای توسعه آینده این پروژه، می‌توان به مواردی مانند ادغام هوش مصنوعی برای تحلیل پیش‌بینانه، توسعه رابط‌های برنامه‌نویسی (API) برای یکپارچه‌سازی با سایر سیستم‌ها و افزایش پوشش داده‌های ماهواره‌ای اشاره کرد. در نهایت، این پژوهش ثابت کرده است که با وجود تمام محدودیت‌ها، ایجاد یک سیستم یکپارچه داده‌های مکانی در کشور نه تنها ممکن است، بلکه می‌تواند به بهبود قابل‌توجهی در فرآیندهای مدیریت منابع طبیعی منجر شود. تجربیات عملی به دست آمده از این پروژه می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای ارزشمند برای سایر سازمان‌ها و نهادهایی باشد که قصد پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی را دارند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از کار رساله دکتری در گروه علوم جنگل، دانشگاه ایلام می‌باشد.

رایانش ابری و پردازش تحت‌وب را به عنوان نقطه عطفی در بحث پایش اراضی و مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی معرفی می‌کند و استفاده از این سیستم بجای روش‌های سنتی می‌تواند به عنوان گامی اساسی در راستای دستیابی به اهداف مدیریت پایدار منابع طبیعی معرفی گردد.

ویژگی منحصربه‌فرد این پژوهش، تطبیق فناوری‌های پیشرفته با شرایط بومی و واقعی کشور است. سیستم طراحی شده نه تنها از نظر نظری کارآمد است، بلکه توانسته با چالش‌های عملیاتی مانند محدودیت‌های زیرساختی، موانع سازمانی و نیازهای واقعی کاربران کنار بیاید. توسعه سرویس موبایل با قابلیت‌های بارگذاری آفلاین داده‌ها و ابزارهای نقشه‌برداری میدانی، پاسخگوی نیاز کارشناسان در مناطق دورافتاده بوده و نیاز به سخت‌افزارهای تخصصی را تا ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. در مقایسه با سیستم‌های سنتی، این زیرساخت جدید مزایای قابل‌توجهی دارد: زمان به‌روزرسانی داده‌ها از ۶-۳ ماه به ۵ روز کاهش یافته، دقت مکانی از ۳۰ الی ۱۰۰ متر به ۱۰ متر بهبود پیدا کرده و هزینه اجرا نیز نسبت به روش‌های مشابه به علت استفاده از قابلیت پردازش ابری و انتشار نقشه‌ها تحت‌وب بسیار کمتر شده است. این ارقام نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم در شرایط واقعی است. سیستم پیشنهادی تمرکز اصلی بر استفاده از داده‌های مکانی توسط کاربران در عرصه و تلفیق و تحلیل داده‌های مختلف به صورت همراه داشته و بیشتر بر جنبه کاربردی داده‌ها تمرکز دارد که این مورد وجه تمایز سیستم پیشنهادی با سیستم‌های فعلی می‌باشد.

با وجود موفقیت‌های به دست آمده، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز داشته است. ماهیت اجرایی و بومی پروژه باعث شده که مقایسه مستقیم آن با مطالعات نظری یا سیستم‌های پیاده‌سازی شده در دیگر کشورها به سادگی میسر نباشد. چالش‌هایی مانند ناهماهنگی بین‌سازمانی، مقاومت در برابر تغییر و محدودیت‌های سخت‌افزاری، تجربیات ارزشمندی بودند که در مطالعات آزمایشگاهی و نظری معمولاً مورد توجه قرار

References

- Baktash, P. (2012). *National report of geomatics in Islamic Republic of Iran*. United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific.
- Bandibas, J., & Takarada, S. (2019). Geoinformation Sharing System for East and Southeast Asia Using SDI, OGC Web Services and FOSS. *International Journal of Geosciences*, 10(2), 209-224. <https://doi.org/10.4236/ijg.2019.102013>
- Dwivedi, R. S. (Ed.). (2024). *Advances in geospatial technologies for natural resource management*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003035404>
- Ehrlenspiel, G., & Kleinn, C. (1992). *Implementing a forest information system: A case study in Cyprus* (Mitteilungen der Abteilung für Forstliche Biometrie, No. 1992-1, pp. 1–35). Freiburg, Germany: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Fairbairn, D., & Al Haidan, K. (2009). *Implementation factors for successful spatial data infrastructures in a small, centralised nation state*. International Cartographic Conference, Santiago, Chile.
- Faraji, O., Gharaghozlou, A., Aghamohammadi Zanjirabad, H., Azizi, Z., & Vafaeinejad, A. (2023). Proposed road map for the integration of Digital Twin and NSDI in order to advance the spatial needs of land-use planning and sustainable development in Iran - Case study: NSDI of Iran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 32 (125), 121-141. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.553585.2876> (In Persian)
- Feeney, M.-E., Rajabifard, A., & Williamson, I. P. (2001, September). *Spatial data infrastructure frameworks to support decision-making for sustainable development*. In Proceedings of the 5th Global Spatial Data Infrastructure Conference (pp. 1–14). Cartagena, Colombia.
- Fegghi, J. (1997). *Informations- und Metainformationsbedarf für die forstliche Planung im Hinblick auf ein Wald-Informationssystem* (Doctoral dissertation, ETH Zurich, No. 12501). *Beihefte zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen*, 85, 191 p. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001891937>
- Fisher, B., & Reed, C. (2005). *Server architecture models for the national spatial data infrastructures (NSDI)*. Open Geospatial Consortium (OGC). <https://doi.org/10.2760/806776>
- Garg, R. K. (2002). *Forest information systems in the state of Uttar Pradesh, India*. The International Journal of Forest Information Systems Forestry Review, 4(3), 206-213. <https://doi.org/10.1505/IFOR.4.3.206.17402>
- Goharian, E., & Azizipour, M. (2020). *Integrated water resources management in Iran*. In Integrated water resource management (pp. 101–114). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16565-9_9
- Hollywood, J. S., & Winkelman, Z. (2015). *Improving information-sharing across law enforcement: Why can't we know?* RAND Corporation. <https://doi.org/10.7249/RR645>
- Hasnat, M., Bano, R., & Khatoon, F. (2024, March). *Exploring Spatial Technology for In-Depth Natural Resource Management: A Comprehensive Study*. In International Conference on Advances in Environmental Sustainability, Energy and Earth Science (pp. 201-217). https://doi.org/10.1007/978-3-031-73820-3_15
- Kalantari Oskouei, A., Modiri, M., Alesheikh, A., Hosnavi, R., & Nekooie, M. A. (2018). An analysis of the national spatial data infrastructure of Iran. *Survey Review*, 51(366), 225–237. <https://doi.org/10.1080/00396265.2017.1420586>
- Kornejady, A., Shadfar, S., Ahmadi, A., Shabani, S., Zavar, S., & Maleki, S. (2022). The necessity to produce, develop and integrate spatial data infrastructure with game engines for data dissemination and extension of agriculture and natural resources. *Watershed Management Extension and Development Journal (WMJI)*, 10(38), 33–46

- Mahdavi, A., Peltz, D., & Spiel, G. (2008). IFMIS, Iranian Forest Management Information System. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 16(4), 609-625. <https://doi.org/10.22034/ijf.2024.396505.1926> (In Persian)
- Manso, M. Á., Wachowicz, M., & Bernabé, M. Á. (2009). Towards an integrated model of interoperability for spatial data infrastructures. *Transactions in GIS*, 13(1), 43-67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01143.x>
- Mansourian, A., & Valadan Zoej, M. J. (2009). *Iran SDI initiative: Study phase of NSDI. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*.
- Mohamadzadeh, P., Pourmoradian, S., Feizizadeh, B., Sharifi, A., & Vogdrup-Schmidt, M. (2020). A GIS-based approach for spatially-explicit sustainable development assessments in East Azerbaijan Province, Iran. *Sustainability*, 12(24), 10413. <https://doi.org/10.3390/su122410413>
- Nourian Tel Zali, G., & Gholami, A. (2015). *The relationship between organizational structure and employee productivity in the Natural Resources and Watershed Management Department of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province*. Proceedings of the 2nd International Conference on Modern Research in Management, Economics, and Humanities. Civilica. Retrieved from Civilica. (In Persian)
- Li, S., Dragicevic, S., Castro, F. A., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Pettit, C., Jiang, B., Haworth, J., Stein, A., & Cheng, T. (2015). Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.012>
- Sun, L., He, D., & Zhao, P. (2015). A research of publishing map technique based on GeoServer. *Asian Journal of Applied Sciences*, 8(3), 185-195. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2015.185.195>
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2021). *Exploring space technologies for sustainable development*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001891937>

Study of vegetation cover changes in north khorasan province using remote sensing-based vegetation indices (Case study: Jiransu Rangelands)

Reza Omidipour^{1*}, Mohabat Nadaf²

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

2. Department of Cell and Molecular Biology, Faculty of Basic Sciences, Kosar University of Bojnord, Bojnord Iran

*Corresponding author: R.omidipour@ilam.ac.ir

(Received: 14 December 2024

Revised: 05 January 2025

Accepted: 13 January 2025)

Extended Abstract

Introduction: Rangelands, as renewable natural resources, play a vital role in environmental preservation and in meeting the needs of both livestock and vegetation. These resources not only provide forage for livestock but also protect soil and water. However, unplanned land-use changes and degradation of vegetation cover in Iran, especially over the past four decades, have led to a decline in the quality of these resources. Factors such as population growth, urbanization, and overgrazing by livestock have contributed to rangeland degradation. In this context, remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) are efficient tools for monitoring these changes. These technologies enable precise monitoring of environmental changes and the identification of factors such as soil salinity and erosion without the need for costly traditional methods. The use of satellite data provides valuable insights for assessing vegetation cover changes, drought impacts, and other environmental threats. Therefore, these tools play a significant role in natural resource management and rangeland conservation.

Materials and Methods: This study focuses on the Jiransu winter rangeland in the Maneh and Samalqan district, covering an area of 2,168 hectares. Located in northwestern Iran, the region has a cold and dry climate with an annual rainfall of 223 mm. To analyze vegetation cover changes, Landsat time-series images (TM and OLI) and Google Earth images were used. Satellite images with a spatial resolution of 30 meters were collected from different years (1997, 2002, 2008, 2013, 2018, and 2023) from the US Geological Survey (USGS) archive. After data preprocessing to ensure quality and correct geometric and radiometric errors, the images were processed using various techniques such as histogram adjustment and color composite for information enhancement. NDVI and MSAVI vegetation indices were employed for vegetation analysis. Subsequently, vegetation cover changes were analyzed using image differencing and threshold classification methods.

Results and Discussion: The results revealed that during the analyzed time periods, the lowest vegetation index values were observed in 2008, coinciding with a severe drought in Iran. This reduction in vegetation cover highlights its strong dependence on rainfall and climatic conditions. Land-use changes showed similar trends, particularly during the 1997–2008 period, where approximately 226 hectares of poor rangeland were lost, representing 10% of the total rangeland area. In the subsequent period (2008–2013), approximately 323 hectares of poor rangeland decreased, with declining classes covering more than 14% of the area. These findings indicate that RS methods, particularly those using vegetation indices, are efficient and accurate tools for monitoring vegetation changes and assessing rangeland conditions. Overall, the study emphasizes that satellite images and vegetation indices like NDVI and MSAVI offer significant accuracy in detecting ecological changes and trends, especially in dry and semi-arid regions, compared to traditional methods.

Conclusion: This study emphasizes the importance of NDVI and MSAVI indices in monitoring vegetation cover changes and demonstrates that these indices can effectively track degradation trends and environmental changes. These indices, particularly in dry and semi-arid regions impacted by climate change and drought, play a key role in modeling vegetation decline and rangeland productivity. Furthermore, the results suggest that using these indices, due to their ability to correct for bare soil effects and their effectiveness in assessing vegetation changes, provides valuable tools for rangeland monitoring and management. These tools can aid in identifying degraded areas and, by providing timely and accurate data, help predict and manage rangeland degradation. Therefore, integrating these indices into comprehensive natural resource management programs and utilizing them in detailed environmental assessments can play a crucial role in enhancing conservation efforts for natural resources. Additionally, their application can have a profound impact on the restoration and improvement of ecosystem health, leading to long-term environmental sustainability.

Keywords: Satellite imagery, Vegetation cover changes, RS, Vegetation indices NDVI and MSAVI, Rangeland

Citation: Omidipour, R. & Nadaf, M. (2026). Study of vegetation cover changes in north khorasan province using remote sensing-based vegetation indices (Case study: Jiransu Rangelands). *Integrated Watershed Management*, 6(1), 24-42. doi= 10.22034/iwm.2025.2048142.1195

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 تغییرات پوشش گیاهی در استان خراسان شمالی با استفاده از شاخص‌های پوشش

گیاهی مبتنی بر سنجش از دور (مطالعه موردی: مراتع جیرانسو)

رضا امیدپور^{۱*}، محبت نداف^۲

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

۲. گروه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی دانشکده علوم پایه، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: R.omidipour@ilam.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

چکیده مبسوط

مقدمه: مراتع به عنوان منابع طبیعی تجدیدشونده، نقش مهمی در حفظ محیط‌زیست و تأمین نیازهای دامی و گیاهی دارند. این منابع علاوه بر تأمین علوفه برای دام‌ها، از خاک و آب محافظت می‌کنند. با این حال، تغییرات بی‌برنامه کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی در ایران، به ویژه در چهار دهه اخیر، باعث کاهش کیفیت این منابع شده است. عواملی مانند افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و چرای بی‌رویه دام‌ها به تخریب مراتع منجر شده است. در این میان، سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزارهای کارآمدی برای پایش این تغییرات هستند. این فناوری‌ها به طور دقیق و بدون نیاز به روش‌های سنتی پرهزینه، امکان نظارت بر تغییرات محیطی و شناسایی عواملی مانند شوری خاک و فرسایش را فراهم می‌کنند. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند به ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی، اثرات خشکسالی‌ها و دیگر تهدیدات زیست‌محیطی کمک کند. به همین دلیل، این ابزارها در مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از مراتع اهمیت بسیاری دارند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، مرتع فشلاقی جیرانسو در شهرستان مانه و سملقان به مساحت ۲۱۶۸ هکتار مورد مطالعه قرار گرفته است. این منطقه با اقلیم خشک و سرد و بارندگی سالانه ۲۲۳ میلی‌متر در شمال غرب ایران واقع است. برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی، از تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی لندست (TM و OLI) و تصاویر گوگل‌ارت استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای با دقت مکانی ۳۰ متر و به تاریخ‌های مختلف (۱۹۹۷، ۲۰۰۲، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۸، و ۲۰۲۳) از آرشیو سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) جمع‌آوری گردید. پس از پیش‌پردازش داده‌ها برای کنترل کیفیت و رفع خطاهای هندسی و رادومتر، تصاویر با استفاده از روش‌های مختلف پردازش مانند تعدیل هیستوگرام و ترکیب رنگی برای بازسازی اطلاعات مورد بررسی قرار گرفتند. برای تحلیل پوشش گیاهی، از شاخص‌های NDVI و MSAVI استفاده شد. سپس روند تغییرات پوشش گیاهی با دو روش تفاضل تصویر و طبقه‌بندی آستانه‌ای بررسی گردید. **نتایج و بحث:** نتایج این تحقیق نشان داد که در دوره‌های مختلف زمانی، کمترین مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی در سال ۲۰۰۸ مشاهده شد، که همزمان با خشکسالی شدید در ایران بوده است. این کاهش در پوشش گیاهی نشان‌دهنده وابستگی شدید آن به بارندگی و شرایط اقلیمی است. بررسی تغییرات کاربری اراضی نیز نتایج مشابهی را نشان داد؛ به‌طور خاص، در دوره ۲۰۰۸-۱۹۹۷، حدود ۲۲۶ هکتار از اراضی مرتعی فقیر از بین رفت، که معادل ۱۰ درصد از مساحت کل مرتع بود. همچنین، در دوره بعدی (۲۰۱۳-۲۰۰۸)، حدود ۳۲۳ هکتار از اراضی مرتعی فقیر کاهش یافت و کلاس‌های کاهشی بیش از ۱۴ درصد از سطح منطقه را پوشش داد. این نتایج تأکید می‌کند که روش‌های سنجش از دور، به‌ویژه با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی، ابزارهایی کارآمد و دقیق برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و پایش وضعیت مراتع هستند. به طور کلی این تحقیق نشان داد که برای پایش دقیق وضعیت مراتع، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های گیاهی مانند NDVI و MSAVI، علاوه بر ارائه اطلاعات مشابه به روش‌های سنتی، دقت بالاتری در شناسایی تغییرات و روندهای اکولوژیکی به‌ویژه در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش بر اهمیت شاخص‌های NDVI و MSAVI در بررسی تغییرات پوشش گیاهی تأکید دارد و نشان می‌دهد که این شاخص‌ها توانایی پایش روند تخریب و تغییرات زیست‌محیطی را دارند. این شاخص‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بیشتر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌ها قرار دارند، نقش مهمی در شبیه‌سازی کاهش پوشش گیاهی و تولیدات مرتعی ایفا می‌کنند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این شاخص‌ها به دلیل اصلاح اثرات خاک لخت و قابلیت بالا در ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی، ابزاری مؤثر برای پایش و مدیریت مراتع هستند. این ابزارها می‌توانند به شناسایی مناطق آسیب‌دیده کمک کرده و با فراهم کردن داده‌های دقیق و به‌موقع، روند تخریب مراتع را پیش‌بینی و مدیریت کنند. از این رو، به‌کارگیری این شاخص‌ها در برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی و ارزیابی‌های زیست‌محیطی می‌تواند در حفاظت از منابع طبیعی و بهبود وضعیت اکوسیستم‌ها تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

کلیدواژه: تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات پوشش گیاهی، سنجش از دور، شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و MSAVI، مرتع

استناد: امیدپور، ر. و نداف محبت، م. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات پوشش گیاهی در استان خراسان شمالی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش از دور (مطالعه موردی: مراتع جیرانسو). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۱)، ۲۴-۴۲.

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

مراعات یکی از منابع طبیعی تجدیدشونده با استفاده‌های متنوع می‌باشند (Savari, 2023) که بیشترین سطح اراضی کشور را به خود اختصاص داده‌اند. حفاظت خاک، حفاظت محیط‌زیست، ایجاد مناطق تفریحی، تولید گیاهان دارویی، تولید گیاهان صنعتی، تولید محصولات دامی، تأمین آب و آبیان، و حفظ حیات وحش و شکار از منافع و فواید مهم مراعات هستند (Han *et al.*, 2008). امروزه تغییرات بدون برنامه کاربری اراضی و پوشش گیاهی به یک مشکل حاد تبدیل شده است. اکثر این تغییرات بدون یک برنامه‌ریزی مدون و با توجه اندک به اثرات زیست‌محیطی انجام می‌شود (Pawe & Saikia, 2018). در چهار دهه گذشته، این تغییرات در ایران با سرعت فزاینده‌ای به وقوع پیوسته است که باعث تشدید روند تخریب اراضی شده است (Kyriazopoulos *et al.*, 2013). از آنجا که تغییرات در کاربری اراضی و پوشش گیاهی در سطوح وسیع صورت می‌گیرد، فناوری سنجش از دور^۱ به‌عنوان یک ابزار ضروری و باارزش در ارزیابی تغییرات کره زمین شناخته می‌شود.

سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزارهای مهمی برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی همچون نقشه پوشش گیاهی، نقشه خاک، نقشه شوری و کاربری اراضی محسوب می‌شوند. این فناوری‌ها امکان بررسی دقیق وضعیت مراعات و شناسایی عوامل تخریب‌کننده مانند شوری خاک، فرسایش و کاهش سطح آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند (Dong *et al.*, 2009). گردآوری اطلاعات در مورد تغییرات پوشش گیاهی با روش‌های سنتی بسیار مشکل و پرهزینه است؛ اما داده‌های ماهواره‌ای امکان مطالعه گسترده این تغییرات را فراهم می‌سازند (Eskandari Damaneh *et al.*, 2022). نتایج این ارزیابی‌ها باید توسط تصمیم‌گیران در سطوح محلی، ملی و جهانی برای جلوگیری از زیان‌های اقتصادی، اجتماعی و

زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرند (Robinson *et al.*, 2019). تحقیقات انجام‌شده در زمینه پایش و ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های سنجش از دور در مناطق مختلف جهان توانسته به درک بهتری از روند تغییرات زیست‌محیطی کمک کند (Higginbottom *et al.*, 2018; Soydan, 2020; Zheng *et al.*, 2021). نمونه، Sharif و Hamzeh (۲۰۲۱) تغییرات پوشش گیاهی و شوری خاک در پایین‌دست سد گتوند را پایش و پس از آنگیزی این سد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بررسی کردند. این تحقیق نشان داد که داده‌های سنجش از دور، ابزاری کارآمد برای پایش دقیق اثرات پروژه‌های بزرگ زیربنایی بر محیط‌زیست هستند. همچنین Karimi Mofareh و همکاران (۲۰۲۰) از تصاویر ماهواره‌ای برای پایش پوشش گیاهی مراعات دماوند بهره بردند. نتایج این پژوهش، تغییرات ساختاری در مراعات را آشکار ساخت و بر اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع طبیعی تأکید کرد. در سطح بین‌المللی، Zheng و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات پوشش گیاهی تالاب‌های چین را با داده‌های ماهواره‌ای مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این فناوری‌ها می‌توانند به حفاظت و مدیریت بهتر تالاب‌ها کمک کنند. همچنین Soydan (۲۰۲۰) در ترکیه از شاخص NDVI برای ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در محدوده سد آکایا استفاده کرد. این شاخص سنجش از دوری نشان‌دهنده تغییرات کیفیت و تراکم پوشش گیاهی در طول زمان بود و نقشی کلیدی در تحلیل اثرات تغییرات محیطی ایفا کرد. در پژوهشی دیگر، Helman و Mussery (۲۰۲۰) کارایی تصاویر ماهواره‌ای لندست را برای ارزیابی تغییرات گیاهان در مناطق میان‌دره‌ای بررسی کردند و اثربخشی این داده‌ها را در تحلیل الگوهای تغییرات منطقه‌ای نشان دادند. این پژوهش‌ها همگی بر قابلیت‌های گسترده و دقیق فناوری‌های سنجش از دور تأکید دارند و نشان می‌دهند

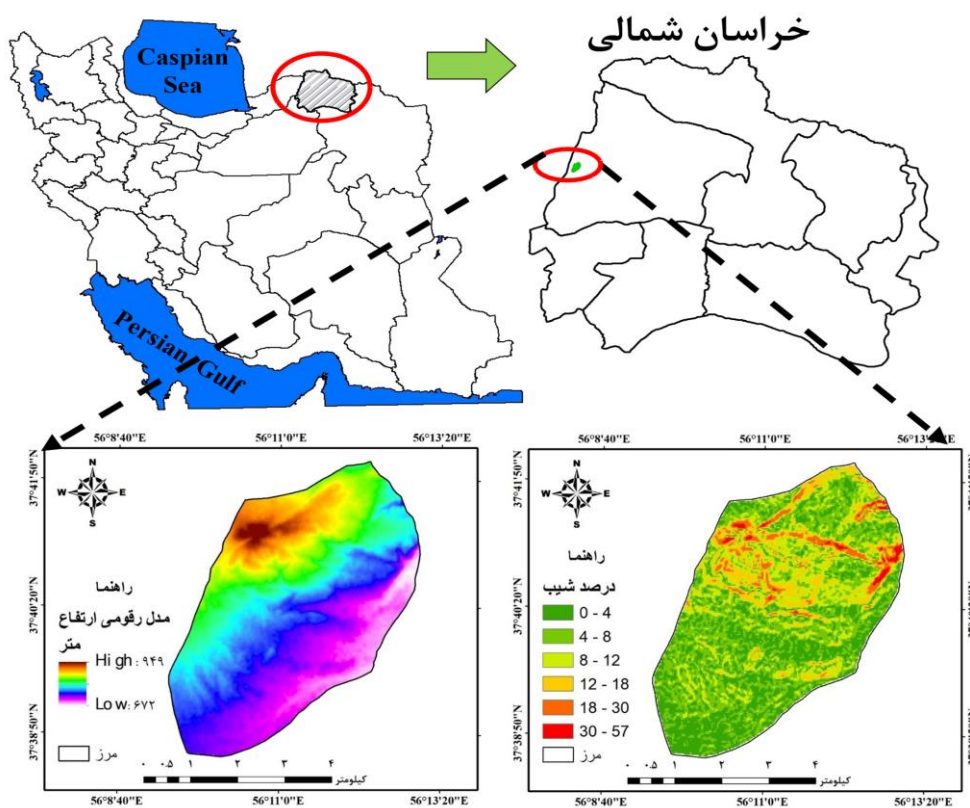
۲۱۶۸ هکتار دارد. این مرتع در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شمال غربی، مرکز بخش (شهر آشخانه) قرار گرفته است. این منطقه در طول جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه و عرض جغرافیایی ۵۶ درجه و ۸ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۳ دقیقه قرار دارد. نمایی از موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. منطقه جیرانسو دارای اقلیم خشک سرد با متوسط بارندگی سالانه ۲۲۳/۷ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۶/۰۲ درجه سانتی‌گراد است. بارندگی عمدتاً از آذر تا اردیبهشت رخ داده و بیشترین میزان آن در فروردین است، در حالی که دوره خشکی از اواسط فروردین تا اواسط مهر ادامه دارد و در تیر و مرداد به اوج می‌رسد. این منطقه سالانه ۹۲ روز یخبندان دارد که بیشتر در دی‌ماه رخ می‌دهد. تابستان‌ها گرم و آفتابی بوده (۲۷۱۵ ساعت آفتابی سالانه) و بادهای غالب از غرب و شمال‌غرب می‌وزند. به‌طور کلی، اقلیم منطقه بر اساس شاخص‌های آمبرژه و دومارتن خشک و سرد طبقه‌بندی می‌شود (Nadaf et al., 2023).

که چنین ابزارهایی چگونه می‌توانند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پایدار مراتع و کاهش آثار زیان‌بار تغییرات محیط‌زیستی ارائه کنند. بنابراین در این تحقیق، تغییرات پوشش گیاهی مراتع جیرانسو، از توابع شهرستان مانه و سملقان در خراسان شمالی، با استفاده از ارزیابی اکولوژیکی و سنجش از دور بررسی شده است. با توجه به عدم مطالعه پوشش گیاهی در منطقه جیرانسو و افزایش نگرانی از تخریب فزاینده پوشش گیاهی در این منطقه، تحقیق حاضر نتایج مهمی را در راستای اطلاع از میزان تخریب‌های موجود و همچنین روند بلندمدت این تغییرات برای مدیران و تصمیم‌گیران مدیریت منابع طبیعی فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، مرتع قشلاقی جیرانسو در شهرستان مانه و سملقان، بخش مرکزی و دهستان جیرانسو واقع شده است و مساحتی برابر با



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

امیدی‌پور و همکاران

روش تحقیق

جمع‌آوری اطلاعات مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره از ابزارهای مهم در پایش تغییرات پوشش گیاهی هستند (Higginbottom *et al.*, 2018; Soydan, 2020; Zheng *et al.*, 2021). در این تحقیق، برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی پوشش گیاهی، از تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی لندست با سنجنده‌های مختلف مانند TM و OLI (جدول ۱) و همچنین تصاویر

گوگل‌ارث استفاده شد. انتخاب زمان برداشت تصویر و روش آشکارسازی تغییرات، دو فاکتور کلیدی برای دقت نتایج هستند. تصاویر ماهواره‌ای از آرشیو سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱ تهیه گردید. جهت کاهش خطای تصاویر ماهواره‌ای، در این تحقیق از تصاویر اصلاح شده تحت عنوان Lndatsat Level-2 and Collection-2 استفاده شد که تصحیحات لازم روی آنها انجام شده است (Choate *et al.*, 2021).

جدول ۱- اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

Table 1 - Information of satellite images used

ماهواره	سنجنده	تاریخ تصویر	قدرت تفکیک مکانی (متر)	ابرنمایی (درصد)	خطای هندسی (متر)
Satellite	Sensor	Image date	Spatial resolution (m)	Cloudness (%)	Geometric error (m)
لندست 5	TM	17/5/1997	30	3	*
لندست 5	TM	24/5/2002	30	6	4.47
لندست 5	TM	24/5/2008	30	1.2	4.35
لندست 8	OLI	20/5/2013	30	0.17	5.29
لندست 8	OLI	20/5/2018	30	0.15	5.13
لندست 8	OLI	26/5/2023	30	0.21	4.68

*میزان خطای هندسی برای این سال در فایل اطلاعات پایه (Metadata) تصویر ارائه نشده است.

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق، از داده‌هایی استفاده شد که توسط ایستگاه‌های گیرنده تصحیح شده و با نقشه دقیق زمین‌مرجع شده بودند (جدول ۱). همچنین برای کنترل کیفیت و بررسی خطاهای سیستماتیک و غیرسیستماتیک (هندسی و رادیومتری)، داده‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این راستا، پس از نمایش تک باندها و ترکیبات رنگی در نرم‌افزار ENVI ver. 5.3 و بزرگ‌نمایی آنها، داده‌ها از نظر خطاهای رادیومتری مانند راه‌راه شدگی، خطاهای اسکن و پیکسل‌های دوگانه بررسی شدند که هیچ‌کدام از این خطاها مشاهده نگردید. همچنین، با بررسی هیستوگرام تک باندها و آمارهای مربوطه (میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر)، هیچ عامل غیرطبیعی که بر پدیده‌های زمینی تأثیر منفی داشته باشد، مشاهده نشد.

پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای نمایش بهتر کلاس‌های اطلاعاتی و شناسایی آنها، کنتراست‌های مختلف بر روی تصاویر اعمال می‌شود تا کلاس‌ها واضح‌تر شده و شناسایی آنها آسان‌تر گردد. در این مطالعه از تعدیل هیستوگرام برای بارزسازی تصاویر استفاده شد. با بسط خطی اشیاعی، کنتراست بهتری از تصویر حاصل می‌شود؛ در این روش، تعداد یکسانی از سلول‌ها به هر سطح داده اختصاص داده می‌شود، بدون اینکه سلول‌ها بین طبقات مختلف تقسیم شوند. این بسط باعث ایجاد هیستوگرامی یکنواخت و تصویری با کنتراست بالا می‌گردد. تصویر با تعدیل هیستوگرام اطلاعات بیشتری ارائه می‌دهد. ترکیب رنگی یکی از روش‌های مهم بارزسازی است که امکان مشاهده اطلاعات سه باند مستقل در یک زمان را فراهم می‌کند. انتخاب باندها به نوع کاربرد بستگی دارد و تفکیک پدیده‌ها با رنگ، نتایج

گیاهی متراکم به سمت +۱ میل می‌کند و ابرها، برف و آب ارزش منفی دارند (Serrano et al., 2000). خاک و سنگ نیز مقادیر نزدیک به صفر دارند.

شاخص SAVI

شاخص SAVI به عنوان شاخص پوشش گیاهی تعدیل کننده اثر بازتابش خاک شناخته می‌شود (Huete, 1988). این شاخص توسط Huete و همکاران (۱۹۸۴) با هدف حداقل کردن اثرات خاک زمینه در انعکاس پوشش گیاهی پیشنهاد شد. در معادله مطرح شده برای این شاخص، L فاکتور تعدیل کننده اثر خاک است که معمولاً با سعی و خطا محاسبه می‌شود. اگر L صفر باشد SAVI معادل شاخص NDVI می‌باشد. برای مقادیر متوسط پوشش گیاهی مقدار L در حدود ۰/۵ می‌باشد (Huete, 1988). فاکتور (L+1) تضمین می‌کند که حدود SAVI همانند NDVI بین -۱ تا +۱ باشد. این شاخص بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)/255}{((\frac{NIR+RED}{255})+L)} * (L + 1) \quad (2)$$

لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر برای کاهش اثر بازتابش خاک و بهبود صحت نتایج، از شاخص اصلاح شده SAVI که تحت عنوان MSAVI شناخته می‌شود، استفاده شد. همچنین با توجه به اطلاعات بدست آمده از مقدار پوشش گیاهی منطقه در بررسی میدانی، مقدار شاخص L برای محاسبه شاخص MSAVI در این تحقیق برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد.

بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی پوشش گیاهی

پس از تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی برای شش دوره زمانی شامل ۱۹۹۷، ۲۰۰۲، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ بر اساس دو شاخص NDVI و MSAVI بررسی تغییرات آنها با استفاده از دو روش مرسوم تفاضل تصویر و طبقه‌بندی نقشه به کلاس وضعیت مرتع بر اساس آستانه‌های پیشنهادی انجام شد. روش دوم به عنوان روش آستانه معروف بوده و در آن بر اساس

بهتری می‌دهد. تصاویر رنگی کاذب با ترکیب باندهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۲، ۳، ۴ و ۱ و غیره تولید شد که به تجسم انواع کاربری‌ها کمک می‌کند. همچنین از ترکیبات باندی در انتخاب نمونه‌های آموزشی و تفسیر بصری استفاده شده است.

محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی

در این مرحله دو شاخص از شاخص‌های پرکاربرد در زمینه مطالعات پوشش گیاهی در دنیا شامل NDVI و MSAVI انتخاب و محاسبه شد. شاخص NDVI در گروه شاخص‌های شیب‌محور بوده که از نسبت دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک برای مشخص کردن مقدار پوشش گیاهی استفاده می‌کند در حالی که شاخص MSAVI از شاخص‌های فاصله‌محور بوده که با استفاده از فاکتور تعدیل کننده اثر خاک (فاکتور L) سعی در کاهش اثر بازتابش خاک و اثرات منفی آن بر پوشش دارند و در مناطق خشک کاربرد بیشتری دارند (Omidipour et al., 2020).

شاخص NDVI

شاخص NDVI یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در مطالعات پوشش گیاهی است (Jafari et al., 2017). این شاخص حساسیت بالایی به تغییرات پوشش گیاهی دارد و در مقابل اثرات زمینی و جوی، به‌ویژه در پوشش گیاهی کم، حساسیت کمتری نشان می‌دهد. این شاخص توسط Rouse (۱۹۷۳) معرفی شد و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

که در آن NIR بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب در باند قرمز است. شاخص NDVI به بررسی وضعیت رشد پوشش گیاهی، ویژگی‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی (مانند رطوبت و کلروفیل) و پارامترهای اکوسیستم (مثل بارش و تبخیر) کمک می‌کند. مقادیر این شاخص بین +۱ و -۱ تغییر می‌کند (Rafiei Sardooi et al., 2021)، به طوری که پوشش

امیدی‌پور و همکاران

جدول ۲- تفکیک کلاس‌های مختلف وضعیت مرتع بر اساس شاخص‌های مورد استفاده

Table 2 - Classification of Rangeland Conditions Based on Used Indices

وضعیت مرتع	حدافل شاخص	حداکثر شاخص
Range condition	NDVI یا MSAVI	NDVI یا MSAVI
مرتع فقیر	0.01	0.12
مرتع متوسط	0.12	0.17
مرتع خوب	0.17	0.28
مرتع عالی	0.28	بیش از 0.28

دامنه‌های مشخصی از مقادیر هر شاخص، کلاس وضعیتی پوشش آن مشخص خواهد شد. با توجه به وجود اقلیم خشک و نیمه‌خشک در منطقه مورد مطالعه، از آستانه‌های پیشنهادی توسط Jafari و همکاران (۲۰۱۷) برای مناطق بیابانی استان اصفهان استفاده شده است. در ادامه توضیحات مربوط به دو روش ارائه شده است.

تفاضل تصویر

در این روش ارزش‌های رقومی تصویر در تاریخ دوم از روش‌های رقومی در تاریخ اول کم می‌شود. این فرآیند به صورت پیکسل به پیکسل است. نتیجه این روش تولید تصویری است که در آن مقادیر مثبت و منفی نشان دهنده مناطق تغییر یافته (تغییرات کاهشی یا افزایشی) و مقدار صفر نشان دهنده عدم تغییر بین دو تاریخ است. در ادامه، نتایج باید در سه دسته تغییرات افزایشی (اعداد مثبت)، تغییرات کاهشی (اعداد منفی) و بدوت تغییرات یا ثابت (دامنه صفر و نزدیک صفر) دسته‌بندی می‌شود که این فرآیند نیازمند تعیین اعداد به‌عنوان آستانه کلاس‌ها می‌باشد.

مدل‌سازی خصوصیات پوشش گیاهی

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی خصوصیات مختلف پوشش گیاهی (درصد پوشش گیاهی، درصد خاک لخت، درصد سنگ و سنگریزه و درصد لاشبرگ) از اطلاعات میدانی برداستی از منطقه استفاده شد. در این راستا و در فصل رویشی برابر با اواخر اردیبهشت تا اوایل خرداد سال ۱۴۰۲ با استفاده از ۵۰ پلات ۳۰*۳۰ مترمربعی انجام شد. درون هر پلات، از ۵ کوادرات ۱*۱ مترمربعی برای برداشت اطلاعات پوشش گیاهی استفاده شد. در مجموع، در منطقه مورد مطالعه ۲۵۰ کوادرات نمونه‌برداری شد.

نتایج

شاخص پوشش گیاهی

در این بخش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف لندست ۵ و ۸، اقدام به استخراج نقشه شاخص پوشش گیاهی بر اساس دو شاخص NDVI و MSAVI شد (جدول‌های ۳ و ۴). سپس بر اساس آستانه‌های پیشنهادی برای کلاس‌های مختلف وضعیت مرتع (ضعیف، متوسط، خوب و عالی) برای هر نقشه تولید شد. در نهایت روند تغییرات شاخص پوشش در دو دوره زمانی ۱۰ ساله (۲۰۰۸-۱۹۹۷ و ۲۰۲۳-۲۰۱۳) در سه کلاس تغییرات کاهشی، ثابت و افزایشی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه در دو جدول ۳ و جدول ۴ آمار توصیفی بدست آمده از محاسبه دو شاخص NDVI و MSAVI ارائه شده است.

تعیین آستانه تغییرات

بسیاری از الگوریتم‌های پایش تصویر، از قبیل الگوریتم‌های موجود در دسته‌های جبر و تبدیل، نیازمند انتخاب آستانه‌ها برای متمایز ساختن مناطق تغییر از بدون تغییر است. معمولاً برای انتخاب آستانه از دو روش: (۱) فرآیند آزمون و خطا (۲) روش آماری، استفاده می‌شود. همچنین در صورت وجود منطقه با شرایط مشابه، می‌توان از تحقیقات گذشته استفاده کرد. در این تحقیق کلاس‌بندی شاخص NDVI برای تعیین تغییرات کلاس‌های مختلف وضعیت مرتع بر اساس دامنه‌های تعریف شده توسط Jafari و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد (جدول ۲).

جدول ۳- مشخصات آماری شاخص‌های NDVI در دوره‌های زمانی مختلف در منطقه جیرانسو

Table 3 - Statistical Characteristics of NDVI Indices for Different Time Periods in the Jiranso Region

حداکثر Maximum	حداقل Minimum	انحراف معیار SD	میانگین Mean	تاریخ Date
0.2861	0	0.0135	0.0566	1997
0.1528	0	0.0112	0.0643	2002
0.1042	0	0.0083	0.0500	2008
0.2029	0	0.0150	0.0990	2013
0.1728	0	0.0125	0.0771	2018
0.1791	0	0.0139	0.0821	2023

جدول ۴- مشخصات آماری شاخص‌های MSAVI در دوره‌های زمانی مختلف در منطقه جیرانسو

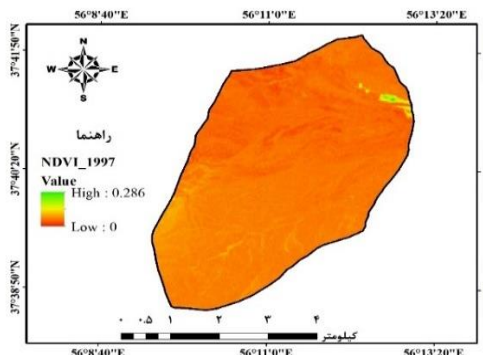
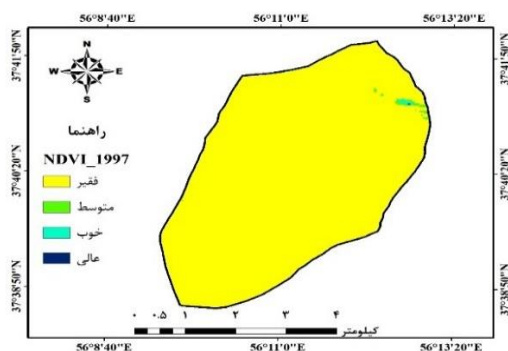
Table 4 - Statistical Characteristics of MSAVI Indices for Different Time Periods in the Jiranso Region

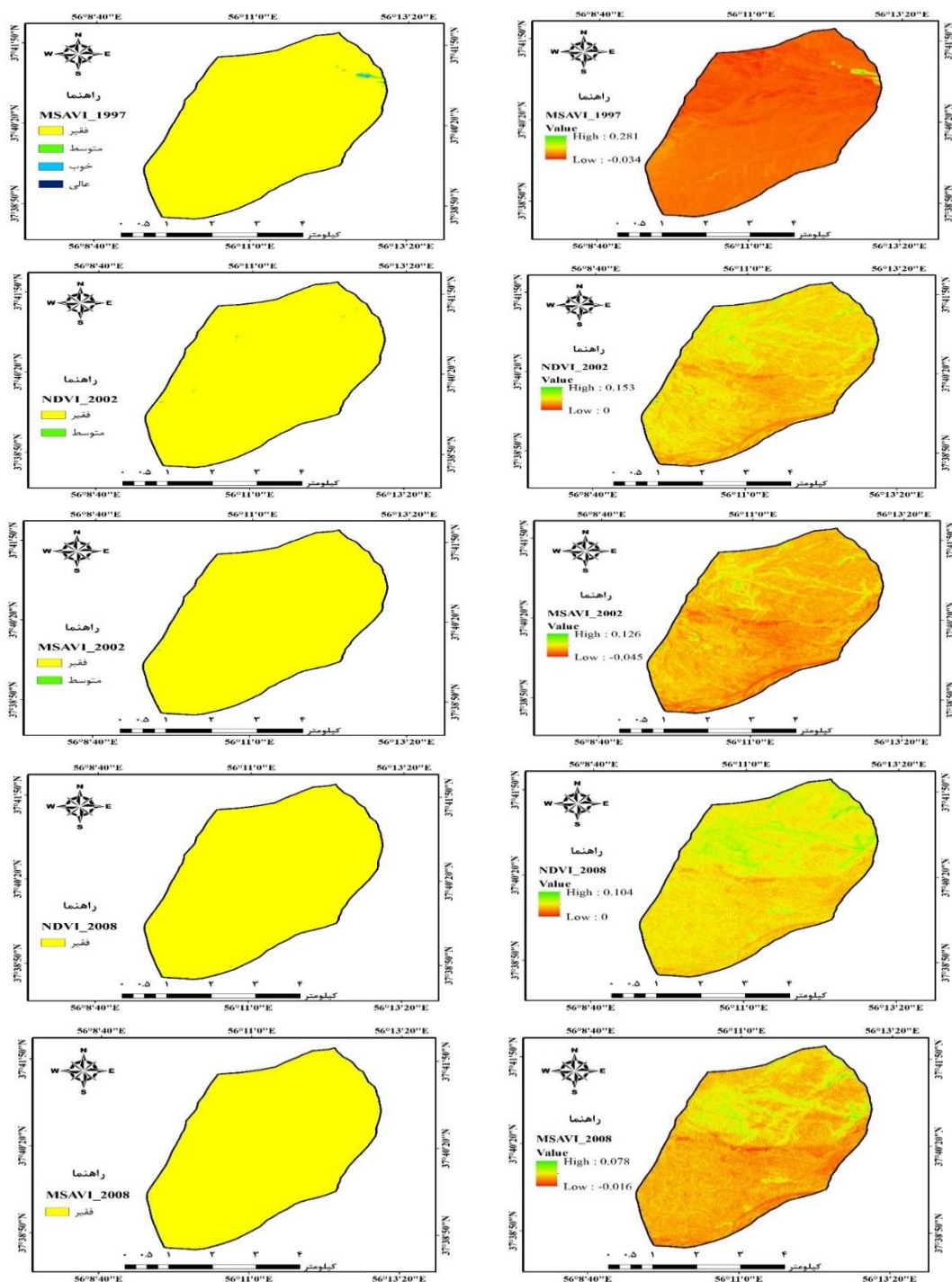
حداکثر Maximum	حداقل Minimum	انحراف معیار SD	میانگین Mean	تاریخ Date
0.2805	-0.0339	0.0156	0.0173	1997
0.1257	-0.0449	0.0135	0.0134	2002
0.0780	-0.0155	0.0096	0.018897	2008
0.1546	-0.02781	0.0171	0.03583	2013
0.1234	-0.0375	0.0143	0.01481	2018
0.1347	-0.0361	0.0160	0.0250	2023

بین ۰/۰۴۵ تا ۰/۱۲۶ تغییر داشتند (شکل ۲) و نتایج نشان داد که بیش از ۹۹/۹۴ درصد سطح منطقه در کلاس ضعیف و کمتر از ۲ هکتار در کلاس متوسط قرار گرفته و هیچ سطحی در کلاس‌های خوب و عالی وجود نداشت (شکل ۴). در سال ۲۰۰۸، شاخص NDVI در بازه ۰ تا ۰/۱۰۴ و شاخص MSAVI در دامنه ۰/۰۱۶ تا ۰/۰۷۸ تغییر داشتند (شکل ۲) و تمامی سطح منطقه در کلاس ضعیف قرار داشت، به طوری که محدوده تغییرات این کلاس بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۲ در هر دو شاخص بود (شکل ۴). این روند بیانگر کاهش تدریجی شاخص‌های پوشش گیاهی و تشدید وضعیت نامناسب مراتع طی این دوره است.

شاخص‌های پوشش گیاهی در دوره زمانی ۲۰۰۸-۱۹۹۷

نتایج تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی و کلاس‌بندی وضعیت مراتع جیرانسو برای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۸ نشان داد که در سال ۱۹۹۷، شاخص NDVI در دامنه ۰ تا ۰/۲۸۶ و شاخص MSAVI در دامنه ۰/۰۳۴ تا ۰/۲۸۱ قرار داشتند (شکل ۲) و حدود ۹۹ درصد سطح مرتع بر اساس NDVI (۲۱۶۰ هکتار) و ۹۸ درصد بر اساس MSAVI (۲۱۱۶ هکتار) در کلاس وضعیت ضعیف بودند (شکل ۴). در سال ۲۰۰۲، شاخص NDVI بین ۰ تا ۰/۱۵۳ و شاخص MSAVI





شکل ۲- شاخص پوشش گیاهی NDVI و MSAVI در دوره زمانی ۲۰۰۸-۱۹۹۷ به همراه کلاس‌بندی آنها

Figure 2 - NDVI and MSAVI Vegetation Indices (1997-2008) and Their Classification

NDVI در دامنه صفر تا 0.203 و شاخص MSAVI در دامنه -0.28 تا 0.155 قرار داشتند (شکل ۳). در این سال، تنها دو کلاس مرتع ضعیف و متوسط در منطقه وجود داشت و بر اساس شاخص NDVI، ۹۳ درصد منطقه در کلاس ضعیف و ۷ درصد در کلاس

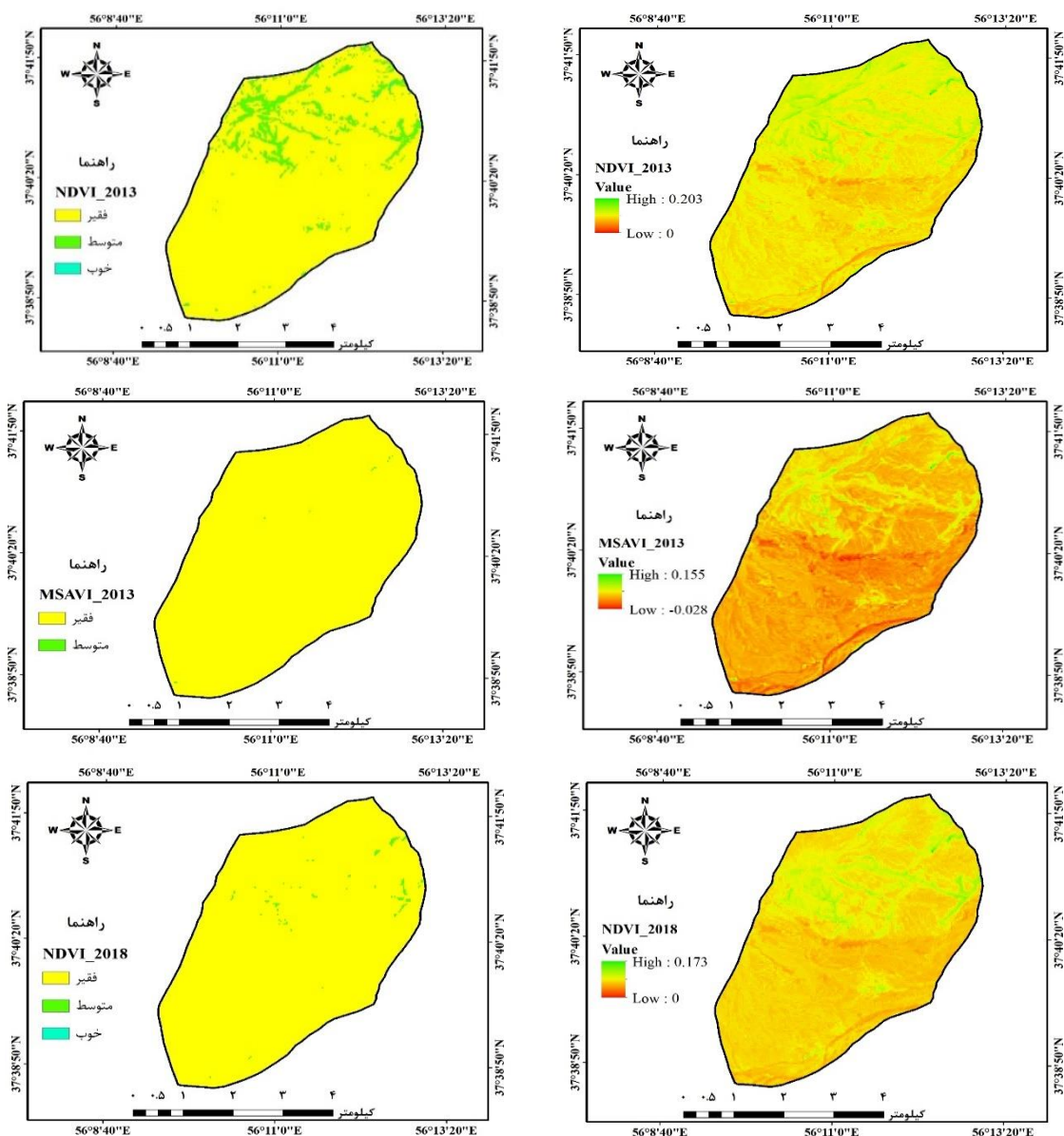
شاخص‌های پوشش گیاهی در دوره زمانی ۲۰۲۳-

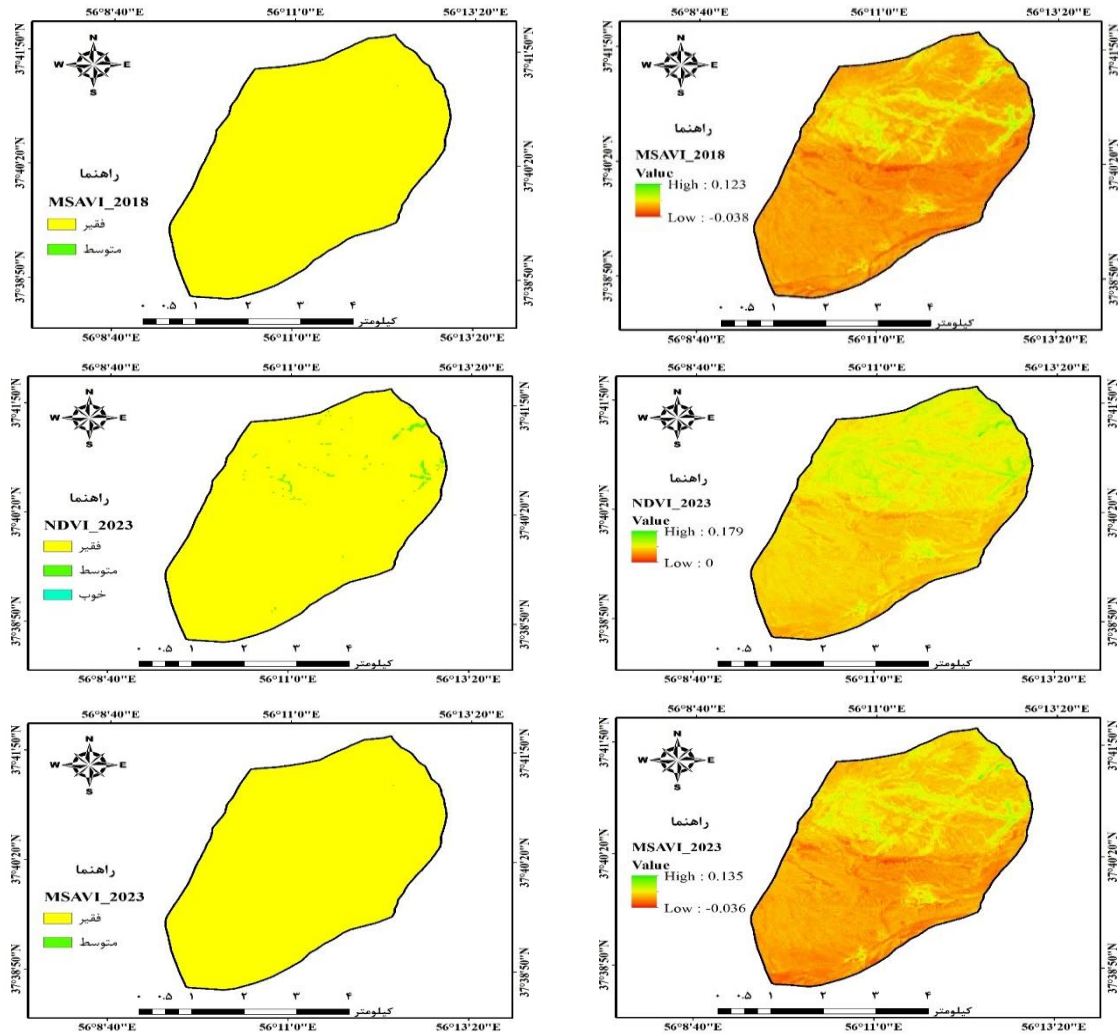
۲۰۱۳

نتایج تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی و کلاس‌بندی وضعیت مراتع جیرانسو برای سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۳، شاخص

۰/۱۲۳ تغییر داشتند (شکل ۳). براساس شاخص NDVI، سه کلاس مرتع ضعیف، متوسط و خوب شناسایی شد، اما براساس شاخص MSAVI تنها دو کلاس مرتع ضعیف و متوسط وجود داشت. در هر دو شاخص، بیش از ۹۹ درصد سطح مرتع در کلاس ضعیف قرار داشت (شکل ۴). این نتایج نشان‌دهنده ادامه وضعیت بحرانی مراتع منطقه در سال‌های اخیر است.

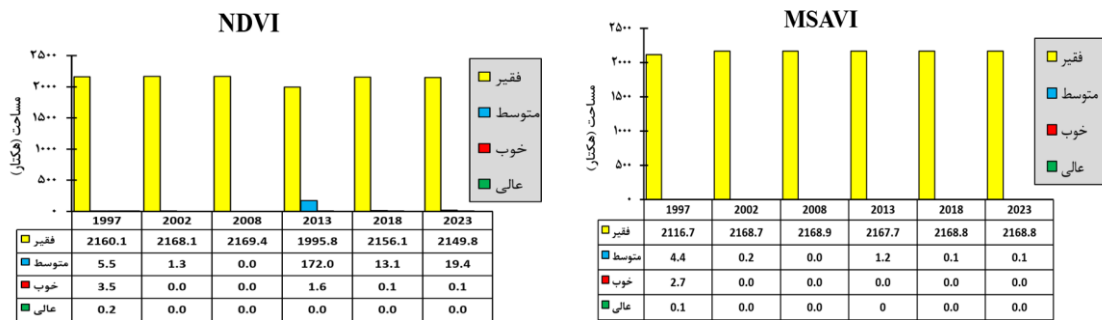
متوسط قرار داشت (شکل ۴). در سال ۲۰۱۸، شاخص NDVI بین صفر تا ۰/۱۷۳ و شاخص MSAVI بین ۰/۰۳۸- تا ۰/۱۲۳ تغییر داشتند (شکل ۳). مشابه سال ۲۰۱۳، دو کلاس مرتع ضعیف و متوسط شناسایی شدند و بیش از ۹۹ درصد منطقه در کلاس ضعیف و کمتر از ۱ درصد در کلاس متوسط قرار گرفت (شکل ۴). در سال ۲۰۲۳، شاخص NDVI در دامنه صفر تا ۰/۱۷۳ و شاخص MSAVI در دامنه ۰/۰۳۸- تا





شکل ۳- شاخص پوشش گیاهی NDVI و MSAVI در دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۲۳ به همراه کلاس‌بندی آنها

Figure 3 - NDVI and MSAVI Vegetation Indices (2013–2023) and Their Classification



شکل ۴- مساحت کلاس‌های وضعیت مرتع بر اساس شاخص NDVI و MSAVI

Figure 4 - Area of rangeland condition classes based on NDVI and MSAVI indices

زمانی ۱۰ ساله شامل ۱۹۹۷-۲۰۰۸ و ۲۰۱۳-۲۰۲۳
تعریف گردید. سپس با استفاده از تفاضل نقشه ابتدا و
انتهای دوره (برای مثال $NDVI_{2008} - NDVI_{1997}$)

تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی
برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی بر اساس
شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده، ابتدا دو دوره

نهایت بر اساس آستانه‌های بدست آمده، نقشه تفاضل کلاس‌بندی مجدد گردیده و مساحت هر کلاس استخراج گردید.

انجام گردید. سپس برای تعریف کلاس تغییرات کاهشی، افزایشی و ثابت، از متغیرهای آماری میانگین و انحراف معیار هر تصویر استفاده شد (جدول ۵). در

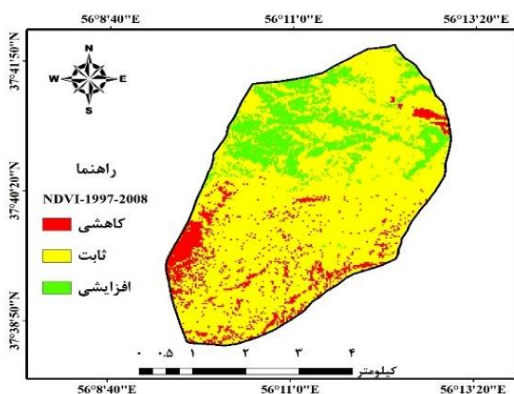
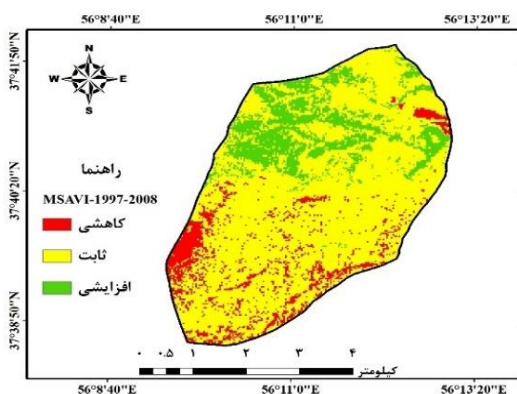
جدول ۵- دامنه تغییرات برای کلاس‌های تغییرات مرتع در دوره‌های مختلف

شاخص MSAVI		شاخص NDVI		کلاس تغییرات Change class	دوره زمانی Time span
دامنه تغییرات کلاس		دامنه تغییرات کلاس			
-0.184	-0.2618	-0.0239	-0.2363	کاهشی	2008-1997
0.022	-0.0184	0.0107	-0.0239	ثابت	
0.075	0.022	0.056	0.0107	افزایشی	
-0.0107	-0.1199	-0.0257	-0.1068	کاهشی	2023-2013
0.0207	-0.0107	0.00809	-0.0257	ثابت	
0.0516	0.0207	0.0357	0.00809	افزایشی	
-0.018	-0.2492	-0.0037	-0.1985	کاهشی	2023-1997
0.0334	-0.018	0.04725	-0.0037	ثابت	
0.1062	0.0334	0.11398	0.04725	افزایشی	

گرفتند، به‌صورتی که حدود ۷۵ درصد از سطح منطقه در این کلاس قرار داشت. همچنین بر اساس هر دو شاخص NDVI و MSAVI کلاس کاهشی و افزایشی به‌ترتیب ۱۰ و ۱۵ از سطح منطقه را پوشانده بودند (شکل ۸).

بررسی تغییرات شاخص پوشش در دوره زمانی ۱۹۹۷-۲۰۰۸

نقشه کلاس‌های مختلف تغییرات در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج در هر دو شاخص NDVI و MSAVI عمده منطقه در کلاس ثابت تغییرات قرار

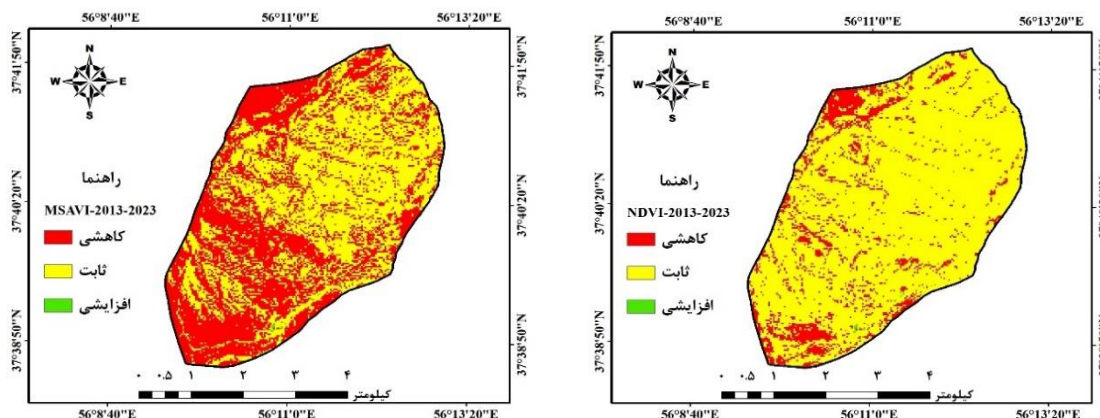


شکل ۵- روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های گیاهی بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۸
Figure 5 - Trend of Vegetation Cover Changes Using Vegetation Indices (1997-2008)

و بر اساس شاخص MSAVI حدود ۵۳ درصد از منطقه در کلاس بدون تغییرات قرار داشتند (شکل ۶). همچنین بر اساس هر دو شاخص NDVI و MSAVI کلاس افزایشی کمتر از یک درصد و کلاس کاهشی به‌ترتیب ۱۴ و ۴۷ درصد از سطح مرتع جیرانسو را پوشانده بودند (شکل ۸).

بررسی تغییرات شاخص پوشش در دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۲۳

بر اساس نتایج در هر دو شاخص NDVI و MSAVI عمده منطقه در کلاس ثابت تغییرات قرار گرفتند به‌صورتی که بر اساس شاخص NDVI حدود ۸۶ درصد



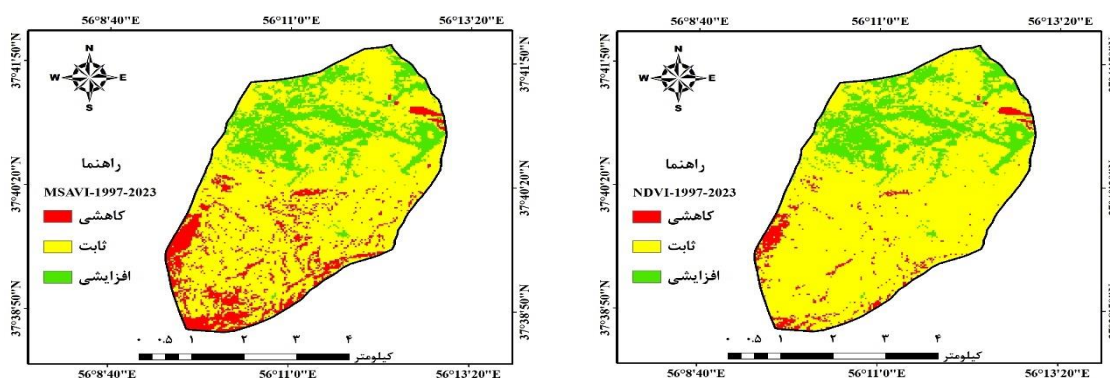
شکل ۶- روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های گیاهی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳
Figure 6 - Trend of Vegetation Cover Changes Using Vegetation Indices (2013-2023)

و بر اساس شاخص MSAVI حدود ۷۱ درصد از منطقه در کلاس بدون تغییرات قرار داشتند (شکل ۷). همچنین بر اساس هر دو شاخص MSAVI و NDVI کلاس افزایشی ۱۷ و کلاس کاهشی به ترتیب ۴ و ۱۲ درصد از سطح مرتع جیرانسو را پوشانده بودند (شکل ۸).

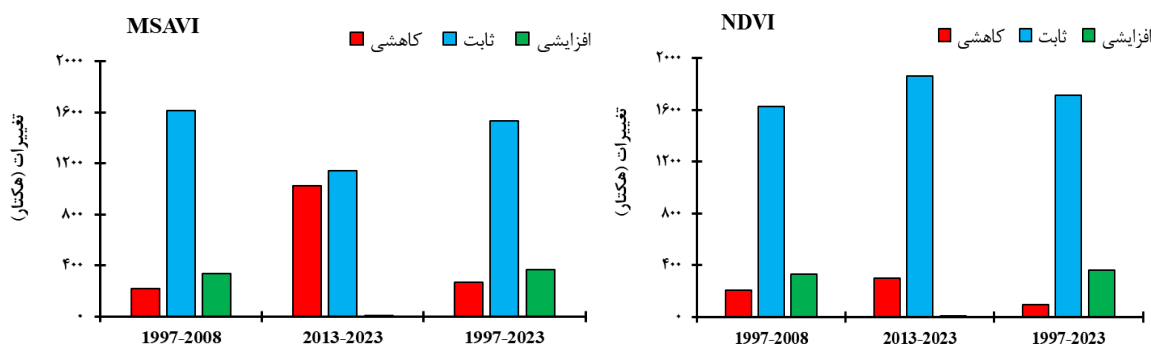
بررسی تغییرات شاخص پوشش در دوره زمانی

۱۹۹۷-۲۰۲۳

بر اساس نتایج در هر دو شاخص MSAVI و NDVI عمده منطقه در کلاس ثابت تغییرات قرار گرفتند به‌صورتی که بر اساس شاخص NDVI حدود ۷۹ درصد



شکل ۷- روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های گیاهی بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳
Figure 7 - Trend of Vegetation Cover Changes Using Vegetation Indices (1997-2023)

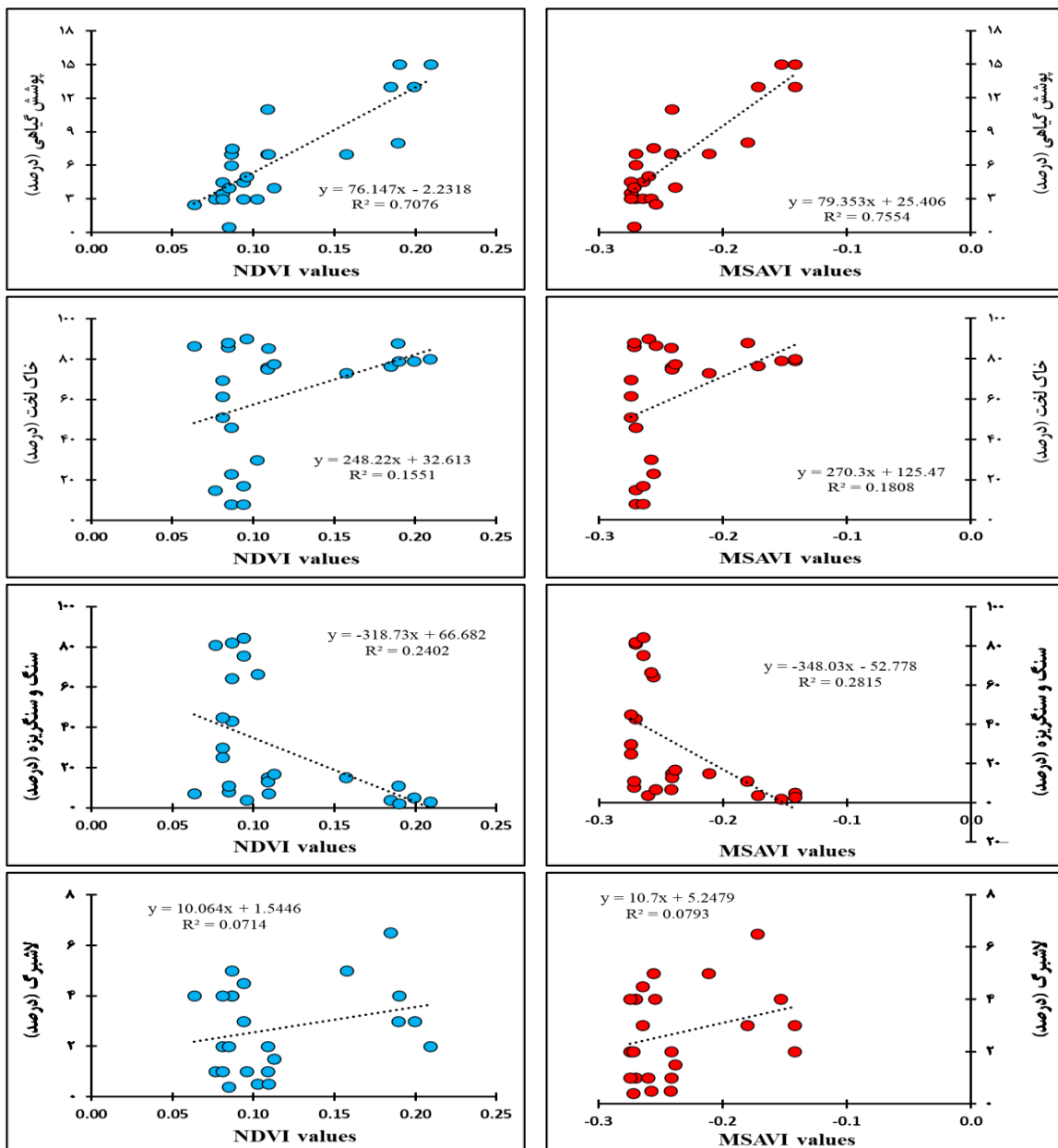


شکل ۸- روند تغییرات کلاس‌های تغییرات وضعیت مرتع
Figure 8 - Trend of Changes in Rangeland Condition Classes

مدل‌سازی خصوصیات پوشش گیاهی

برای مدل‌سازی خصوصیات پوشش گیاهی با شاخص‌های NDVI و MSAVI از اطلاعات برداشتی در مرتع جیرانسو استفاده شد. سپس در محیط GIS اطلاعات متناظر موقعیت هر پلات از نقشه شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج و در نهایت با استفاده از رگرسیون خطی وجود یا عدم وجود رابطه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به روشنی نشان داد که بجز درصد لاشبرگ، سایر خصوصیات پوشش گیاهی بخصوص

درصد پوشش سبز دارای قابلیت مدل‌سازی با شاخص‌های پوشش گیاهی هستند (شکل ۹). بر اساس نتایج، بیشترین همبستگی مربوط به ارتباط پوشش گیاهی با شاخص‌های مورد بررسی بود بطوریکه ارتباط درصد پوشش گیاهی و شاخص MSAVI با ضریب تبیین ۷۶ درصد و ارتباط پوشش گیاهی با شاخص NDVI با ضریب تبیین ۷۱ درصد بود (۹). از طرفی، ضعیف‌ترین ارتباط بین مقدار لاشبرگ و شاخص MSAVI با ضریب تبیین ۸ درصد و شاخص NDVI با ضریب تبیین ۷ بود (شکل ۹).



شکل ۹- مدل‌سازی ارتباط خصوصیات پوشش و شاخص‌های سنجش از دوری

Figure 9 - Modeling the relationship between cover properties and RS indices

بحث

سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی یکی از مهمترین ابزارها برای بررسی پوشش گیاهی به شمار می‌روند (Omidipour et al., 2020). شاخص‌های گیاهی یکی از مهمترین ابزارهای سنجش از دور است که در ارزیابی بسیاری از جنبه‌های پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های مختلف، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مثال، شاخص‌های گیاهی در بررسی و پیش‌نقشه‌های پوشش گیاهی (Higginbottom et al., 2018)، تولیدات گیاهی (Gu et al., 2015)، ارزیابی تاثیرات آتش (Veraverbeke et al., 2018)، چرای دام (Kawamura et al., 2005) و سیل (Broich et al., 2018) و همچنین برای مدل‌سازی اکوسیستم‌ها (Hill, 2013) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی خصوصیات مختلف پوشش گیاهی با استفاده از دو شاخص NDVI و MSAVI نشان داد که این ابزارها قابلیت بالایی در مدل‌سازی خصوصیات مختلف پوشش گیاهی (بجز درصد لاشبرگ) دارند. در بین خصوصیات مختلف پوشش گیاهی، بهترین و بیشترین ارتباط با درصد پوشش گیاهی سبز به دست آمد. با در نظر گرفتن این نکته عامل اصلی در شاخص‌های پوشش گیاهی، بکارگیری روابط بین دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک است و همچنین ارتباط مستقیم باند مادون قرمز نزدیک (حداکثر بازتاب) و ارتباط معکوس باند قرمز (حداقل بازتاب) با پوشش گیاهی (Xue & Su, 2017) بدست آمدن بیشترین ارتباط بین پوشش گیاهی نسبت به سایر متغیرها با شاخص‌های مورد بررسی قابل توجیح است.

بررسی تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های NDVI و MSAVI بیانگر نتایج کاملاً مشابهی برای تغییرات پوشش گیاهی بود. به عبارتی، تغییر شاخص، بر نتایج به دست آمده تاثیری نداشت و الگوهای به دست آمده برای هر دو شاخص کاملاً مشابه بود. بر اساس نتایج، حداکثر میزان شاخص NDVI برابر با ۰/۲۸۶ و برای شاخص MSAVI برابر با ۰/۲۸۱ و در سال ۱۹۹۷ مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که

روند تخریب در این مرتع از گذشته شروع شده و تا کنون ادامه داشته است. این نتیجه تاییدی بر نتایج بخش کاربری اراضی (وضعیت‌های مختلف) نیز می‌باشد که به روشنی نشان داد کلاس مرتع فقیر در طول دوره‌های مورد بررسی به شدت کاهش یافته و به کلاس مرتع با وضعیت خیلی فقیر تغییر کرده که بیانگر روند قهقرائی در این مرتع است. بطور کلی روند تخریب مراتع در ایران از زمان ملی شدن جنگل‌ها و مراتع در ۱۳۴۲ وجود داشته و بر اساس آمار و اطلاعات منتشر شده از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کل کشور (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری سابق) این روند کاهشی منجر به کاهش بیش از ۶ میلیون هکتار از اراضی مرتعی ایران شده است (Motamedi et al., 2020; Aladinvand, 2021). در مطالعه‌ای توسط Ghitouri و همکاران (۲۰۰۶)، بیان گردید که تبدیل کاربری منابع طبیعی، افزایش تعداد دام و چرای زودرس به ترتیب بیشترین سهم تخریب مراتع را به خود اختصاص داده و عواملی مانند نزع و دعوای قومی و طرح مرتعداری کمترین نقش را در تخریب مراتع ایفا می‌کنند. همچنین حداقل میزان شاخص NDVI برابر با ۰/۱۰۴ و برای شاخص MSAVI برابر با ۰/۰۷۸ و در سال ۲۰۰۸ مشاهده شد. این کاهش شدید در شاخص پوشش گیاهی در سال ۲۰۰۸ همراستا با وقوع یکی از شدیدترین خشکسالی‌های ایران است که در بسیاری از تحقیقات بخش آب و هواشناسی به آن اشاره شده است (Nikbakht et al., 2013; Jasim & Awchi, 2020). با توجه به اینکه بین درصد پوشش گیاهی مرتعی که نوعی پوشش خودرو بوده و میزان بارندگی وابستگی کاملی وجود دارد (Wang et al., 2012)، کاهش میزان آب ورودی به اکوسیستم و در نتیجه میزان رطوبت در دسترس گیاهان موجب کاهش شدید پوشش گیاهی و تولیدات مرتعی خواهد شد. در این راستا، Motamedi و همکاران (۲۰۲۰) بیان می‌دارند که بخش عمده‌ای از مراتع ایران، تحت سیطره اقلیم‌های بیابانی، خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و با تجربه تغییر اقلیم، گرم شدن کره زمین و از همه بالاتر،

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های NDVI و MSAVI برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی مرتع جیرانسو نتایج مشابه و قابل اعتمادی را ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها قادرند تغییرات پوشش گیاهی را با دقت مناسب شبیه‌سازی کرده و روند تخریب و تغییرات زیست‌محیطی در این منطقه را بر اساس داده‌های ماهواره‌ای پایش کنند. همچنین، این بررسی‌ها بر اهمیت نقش تغییرات اقلیمی، به ویژه خشکسالی‌ها، در کاهش پوشش گیاهی و تولیدات مرتعی تأکید دارند. تغییرات کاربری اراضی نیز تأثیرات مشابهی در کاهش کیفیت پوشش گیاهی مرتع جیرانسو نشان داد، به‌طوری‌که اراضی مرتعی فقیر به سرعت از بین رفته و به وضعیت خیلی فقیر تبدیل شده‌اند. علاوه بر این، نشان داده شد که روش‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی، مانند NDVI و MSAVI، به دلیل قابلیت بالا در ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی و به‌ویژه توانایی MSAVI در اصلاح اثرات خاک لخت در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ابزارهایی بسیار کارآمد برای پایش وضعیت مراتع و ارزیابی تخریب آن‌ها هستند. این نتایج بر لزوم استفاده از این شاخص‌ها در مطالعات اکولوژیکی و مدیریت منابع طبیعی تأکید دارد و نشان می‌دهد که بررسی‌های تلفیقی از این ابزارها و داده‌های میدانی می‌تواند به ارتقاء دقت ارزیابی‌های زیست‌محیطی کمک کند. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و روش‌های نوین سنجش از دور استفاده شود.

ظهور پدیده خشکسالی ممتد، در معرض تغییرات اساسی است. بنابراین توجه به تغییرات آن از ضرورتی انکار ناپذیر در مدیریت مراتع ایران برخوردار است. بررسی تغییرات با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی تایید کننده نتایج تغییرات کاربری اراضی بود. برای مثال، بر اساس بررسی تغییرات کلاس به کلاس کاربری اراضی، در دوره ۲۰۰۸-۱۹۹۷ حدود ۲۲۶ هکتار از اراضی مرتعی فقیر از بین رفت. این مقدار برابر با ۱۰ درصد از کل سطح مرتع جیرانسو است. در طرف مقابل، بر اساس اطلاعات تغییرات پوشش گیاهی با هر دو شاخص NDVI و NSAVI کلاس کاهشی در این دوره ۱۰ درصد از سطح منطقه را پوشانده است. همچنین بررسی تغییرات در دوره دوم با استفاده از نقشه کاربری اراضی نشان داد که حدود ۳۲۳ هکتار از اراضی مرتعی فقیر کاهش یافته است که معادل ۱۴/۸۹ درصد از سطح مرتع جیرانسو است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از هر دو شاخص NDVI و MSAVI کلاس افزایشی کمتر از یک درصد و کلاس کاهشی به‌ترتیب ۱۴ و ۴۷ درصد از سطح مرتع جیرانسو را پوشانده بودند. این مقایسه و نتیجه نشان می‌دهد که بررسی تغییرات با استفاده از رویکردهای مختلف (نقشه کاربری اراضی یا شاخص پوشش گیاهی) نتایج عموماً مشابهی تولید خواهد نمود. این نتیجه به روشنی بر اهمیت و دقت روش‌ها و ابزارهای سنجش از دوری در پایش تغییرات مرتع تأکید دارد که مورد تأکید بسیاری از محققین نیز قرار گرفته است (Ihuoma & Madramootoo, 2019; Hu *et al.*, 2021; Zeng *et al.*, 2022).

References

- Aladinvand, A. (2021). The affective factors on pastures destruction and identifying its protection approaches. *Spatial Research Quarterly*, 20, 71-90. (In persian)
- Broich, M., Tulbure, M.G., Verbesselt, J., Xin, Q. & Wearne, J. (2018). Quantifying Australia's dryland vegetation response to flooding and drought at sub-continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 212(1), 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.032>
- Choate, M., Rengarajan, R., Micijevic, E. & Lubke, M. (2021). Comparing geometric differences between Landsat Collection 1 to Collection 2 level-1 products. *Earth Observing Systems XXVI*, 11829, 114-124. <https://doi.org/10.1117/12.2596204>
- Dong, S., Lassoie, J., Shrestha, K., Yan, Z., Sharma, E. & Pariya, D. (2009). Institutional development for sustainable

- rangeland resource and ecosystem management in mountainous areas of northern Nepal. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 994-1003. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.03.005>
- Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivan, H. & Barati, A. (2022). Investigating the influence of drought on trend of vegetation changes in arid and semiarid regions, using remote sensing technique: A case study of Hormozgan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(28), 13-28. <https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.28.11> (In persian)
- Ghitouri, M., Ansari, N., Sandgel, A. & Hashemi, M. (2006). Effective factors in rangeland degradation of Kermanshah province. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 13(4), 314-323. (In persian)
- Gu, Y. & Wylie, B.K. (2015). Developing a 30-m grassland productivity estimation map for central Nebraska using 250-m MODIS and 30-m Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 171, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.018>
- Han, J., Zhang, Y., Wang, C., Bai, W., Wang, Y., Han, G. & Li, L. (2008). Rangeland degradation and restoration management in China. *Rangeland Journal*, 30(2), 233-239. <https://doi.org/10.1071/RJ08009>
- Helman, D. & Mussery, A. (2020). Using Landsat satellites to assess the impact of check dams built across erosive gullies on vegetation rehabilitation. *Science of the Total Environment*, 730, 138873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138873>
- Higginbottom, T.P., Symeonakis, E., Meyer, H. & van der Linden, S. (2018). Mapping fractional woody cover in semi-arid savannahs using multi-seasonal composites from Landsat data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.010>
- Hill, M.J. (2013). Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect. *Remote Sensing of Environment*, 137, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.004>
- Hu, P., Sharifi, A., Tahir, M.N., Tariq, A., Zhang, L., Mumtaz, F. & Shah, S.H.I.A. (2021). Evaluation of vegetation indices and phenological metrics using time-series modis data for monitoring vegetation change in Punjab, Pakistan. *Water*, 13(18), 2550. <https://doi.org/10.3390/w13182550>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Huete, A.R., Post, D.F. & Jackson, R.D. (1984). Soil Spectral effects and 4-space vegetation discrimination. *Journal of Remote sensing of Environment*, 15, 155-165. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90043-9)
- Ihuoma, S.O. & Madramootoo, C.A. (2019). Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860>
- Jafari, R., Bashari, H. & Tarkesh, M. (2017). Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid land research and management*, 31(1), 94-110. <https://doi.org/10.1080/15324982.2016.124955>
- Jasim, A.I. & Awchi, T.A. (2020). Regional meteorological drought assessment in Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(7), 284. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5234-y>
- Karimi Mofareh, B., Ghavam, M. & Abdeh Kolahchi, A. (2020). Vegetation monitoring using satellite imagery in the rangelands of Damavand. *Scientific Journal of Rangeland and Desert Research*, 28(1), 151-163. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.121122.1704> (In persian)
- Kawamura, K., Akiyama, T., Yokota, H.O., Tsutsumi, M., Yasuda, T., Watanabe, O. & Wang, S. (2005). Quantifying grazing intensities using geographic information systems and satellite remote sensing in the Xilingol steppe region, Inner Mongolia .

- China. Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(1), 83-93.
<https://doi.org/0.1016/j.agee.2004.09.008>
- Kyriazopoulos, A., Arabatzis, G., Abraham, E. & Parissi, Z. (2013). Threats to Mediterranean rangelands: A case study based on the views of citizens in the Viotia prefecture, Greece. *Journal of Environmental Management*, 129, 615-620.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.035>
- Motamedi, J., Jalili, A., Arzani, H. & Khodaghaei, M. (2020). Causes of rangeland degradation in the country and solutions for overcoming the current situation. *Nature of Iran*, 5(4), 21-44.
<https://doi.org/10.22092/irn.2020.122530>
- Nadaf, M., Omidipour, R. & Sobhani, H. (2023). Study on the increasing trend of vegetation cover degradation in north Khorasan Province. *Journal of Environmental Research and Technology*, 14(8), 131 – 146.
<https://doi.org/10.61186/jert.43616.8.14.13>
 (In persian)
- Nikbakht, J., Tabari, H. & Talaee, P.H., (2013). Streamflow drought severity analysis by percent of normal index (PNI) in northwest Iran. *Theoretical and applied climatology*, 112, 565-573.
<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0750-7>
- Omidipour, R., Ebrahimi, A.A., Tahmasbi, P. & Farmarzi, M. (2020). The effect of grazing on the relationship between ground vegetation cover and plant biomass with vegetation indices in the Sabz Kuh region, Chaharmahal and Bakhtiari. *Rangeland and Watershed Management Journal*, 73(1), 33-47.
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.272219.1336>. (In persian)
- Pawe, C.K. & Saikia, A. (2018). Unplanned urban growth: land use/land cover change in the Guwahati Metropolitan Area, India. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 118(1), 88-100.
<https://doi.org/10.1080/00167223.2017.1405357>
- Rafiei Sardooi, E., Azareh, A., Eskandari Damaneh, H. & Skandari Damaneh, H. (2021). Drought monitoring using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products in semi-arid areas of Iran. *Journal of Rangeland Science*, 11(4), 402-418.
- Robinson, N.P., Allred, B.W., Naugle, D.E. & Jones, M.O. (2019). Patterns of rangeland productivity and land ownership: Implications for conservation and management. *Ecological Applications*, 29(3), e01862.
<https://doi.org/10.1002/eap.1862>
- Rouse, J.W. (1974). *Monitoring the vernal advancement of retro gradation of natural vegetation*. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp. 371
- Savari, M. (2023). Explaining the ranchers' behavior of rangeland conservation in western Iran. *Front Psychol*, 4(13), 1090723.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1090723>
- Serrano, L., Filella I. & Penuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under nitrogen supplies. *Crop Science*, 40, 723-731.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403723x>
- Sharif, M. & Hamzeh, S. (2021). Investigating the effect of Gotvand Dam on changes in soil salinity and vegetation cover of downstream lands of the dam using satellite imagery and spectral indices. *Environmental Sciences*, 19(4), 225-248.
<https://doi.org/10.52547/envs.2021.1014>
 (In persian)
- Soydan, O. (2020). Determination of water surface and vegetation change in Akkaya Reservoir basin using remote sensing method. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(5), 1174-1180.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i5.1174-1180.3345>
- Veraverbeke, S., Dennison, P., Gitas, I., Hulley, G., Kalashnikova, O., Katagis, T., Kuai, L., Meng, R., Roberts, D. & Stavros, N. (2018). Hyperspectral remote sensing of fire: state-of-the-art and future perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 216, 105-121.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.020>
- Wang, M., Shi, S., Lin, F., Hao, Z. Q., Jiang, P. & Dai, G. (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>
- Xue, J. & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of

- developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), p.1353691.
<https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zeng, Y., Hao, D., Huete, A., Dechant, B., Berry, J., Chen, J.M., Joiner, J., Frankenberg, C., Bond-Lamberty, B., Ryu, Y. & Xiao, J. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(7), 477-493.
- <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00298-5>
- Zheng, L., Xu, J., Wang, D., Xu, G., Tan, Z., Xu, L. & Wang, X. (2021). Acceleration of vegetation dynamics in hydrologically connected wetlands caused by Dam operation. *Hydrological Processes*, 35(2), p.e14026.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14026>

Investigating temporal and spatial changes in hydrological response to flooding in the Balikhloochay Watershed

Payam Amouzegari*, Nahideh Parchami

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

* Corresponding author: P.amouzegar@ut.ac.ir

(Received: 08 March 2025

Revised: 27 April

Accepted: 15 Jun 2025)

Extended Abstract

Introduction: Flooding is one of the most common and destructive natural hazards worldwide, with numerous economic, social, and environmental consequences. In fact, one-third of the costs associated with natural disasters are related to floods. Floods occur when river flow exceeds its carrying capacity, which can result from factors such as intense or prolonged rainfall, frozen ground during precipitation, sudden snowmelt, deforestation, river blockage, and dam failure. In Iran, poor economic conditions and the inability of livestock owners to provide sufficient forage have led to overgrazing, which exacerbates soil erosion and increases flood risk. Rainfall is a key factor in flood occurrence, exhibiting significant spatial and temporal variations influenced by elevation, slope, soil characteristics, land use, and geology. The concept of the Hydrological Response Unit (HRU) is a widely used approach in hydrological modeling. Therefore, defining and measuring key hydrological response indicators at the watershed scale is essential for effective water and soil resource management and for reducing flood risk.

Materials and Methods: This study analyzes hydrological data from the Balikhloochay watershed. The research process includes the collection, processing, and analysis of river flow data. Five hydrometric stations with a common 20-year statistical period (2003–2023) were selected. Key hydrological response indicators, including base flow index, peak discharge, runoff depth, drainage density, and recession coefficient, were calculated. Base flow was extracted using the one-parameter digital filter method, and its index was calculated as the ratio of base flow to total streamflow. The recession coefficient was obtained from an exponential recession model. Spatial variations of the indicators were analyzed using GIS-based interpolation techniques. In addition, the Mann–Kendall test was applied using Pro UCL software to detect temporal trends in river flow changes.

Results and Discussion: Analysis of Hydrological Response Indicators in the Balikhloochay Watershed revealed that geological conditions, topography, and physical characteristics of the basin have a significant impact on flood behavior and river flow stability. In particular, the high values of the base flow index at the Nir station indicate the influence of permeable geological structures and effective aquifer recharge. In contrast, the high drainage density at the Pol-e Almas station reflects the basin's rapid response to rainfall and the occurrence of flash floods. These results are consistent with findings from similar studies in other Iranian watersheds and confirm the critical role of geological conditions and hydro-geomorphological structures in shaping the flood hydrograph pattern.

Conclusion: The analysis of hydrological response indicators in the Balikhloochay watershed highlights the significant influence of geological, topographic, and land surface characteristics on flood behavior and flow regime. The spatial distribution of base flow index, drainage density, and runoff depth across the watershed indicates notable variability, driven by differences in permeability, land cover, and geomorphological structure. For instance, higher base flow index values in the Nir station emphasize the importance of permeable geological layers and sustained groundwater contributions, whereas areas with high drainage density, such as the Pol-e Almas station, demonstrate rapid hydrological response and increased susceptibility to flash flooding. These variations reflect the complex hydrological functioning of the watershed and underscore the need for location-specific flood management strategies. The use of GIS-based spatial analysis and the Mann–Kendall trend test provided valuable insights into the temporal dynamics of key hydrological indicators. The observed trends in river flow suggest that changes in land use, soil conditions, and climate variability may be contributing to increasing flood risks in certain sub-regions.

Keywords: Discharge, River, Flood, Hydrology, Extreme Events

Citation: Amouzegari, P., & Parchami, N. (2026). Investigating temporal and spatial changes in hydrological response to flooding in the Balikhloochay Watershed. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 43-60. doi: 10.22034/iwm.2025.2055379.1211

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 تغییرات زمانی و مکانی پاسخ هیدرولوژیک در سیل خیزی حوزه آبخیز بالیخوچای

پیام آموزگاری*، ناهیده پرچی

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

*نویسنده مسئول: P.amouzegar@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

چکیده مبسوط

مقدمه: سیلاب یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی در سراسر جهان است که پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فراوانی دارد. در واقع، یک سوم هزینه‌های مرتبط با بلایای طبیعی به سیلاب‌ها مربوط می‌شود. سیلاب‌ها زمانی رخ می‌دهند که جریان رودخانه از ظرفیت حمل آن فراتر رود، که می‌تواند ناشی از عواملی مانند بارش شدید یا طولانی‌مدت، یخ‌زدگی زمین هنگام بارندگی، ذوب ناگهانی برف، جنگل‌زدایی، انسداد رودخانه و شکست سد باشد. در ایران، شرایط نامناسب اقتصادی و ناتوانی دامداران در تأمین علوفه کافی، منجر به چرای بیش از حد شده است که این موضوع فرسایش خاک را تشدید کرده و خطر سیلاب را افزایش می‌دهد. بارش، عامل کلیدی در وقوع سیلاب است و تغییرات مکانی و زمانی قابل توجهی دارد که تحت تأثیر ارتفاع، شیب، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی و زمین‌شناسی است. مفهوم واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) یک رویکرد رایج در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی است. بنابراین، تعریف و اندازه‌گیری شاخص‌های کلیدی پاسخ هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه آبخیز برای مدیریت مؤثر منابع آب و خاک و کاهش خطر سیلاب ضروری است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه داده‌های هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بالیخوچای را مورد بررسی قرار داده است. فرایند پژوهش شامل گردآوری، پردازش و تحلیل داده‌های جریان رودخانه می‌باشد. پنج ایستگاه هیدرومتری با دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۳) انتخاب شد. شاخص‌های کلیدی پاسخ هیدرولوژیکی شامل شاخص جریان پایه، دبی اوج، عمق رواناب، تراکم زهکشی و ضریب فروکش محاسبه شدند. جریان پایه با استفاده از روش فیلتر دیجیتال تک‌پارامتری استخراج و شاخص آن به صورت نسبت جریان پایه به کل جریان رودخانه محاسبه گردید. ضریب فروکش از یک مدل نمایی فروکش استخراج شد. تغییرات مکانی شاخص‌ها با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS تحلیل شد. همچنین برای بررسی روندهای زمانی تغییرات جریان رودخانه، آزمون من-کندال با استفاده از نرم‌افزار Pro UCL به کار گرفته شد.

یافته‌ها و بحث: تحلیل شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز بالیخوچای نشان داد که شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی و ویژگی‌های فیزیکی حوضه تأثیر چشمگیری بر رفتار سیلاب و پایداری جریان رودخانه دارند. به‌ویژه، مقادیر بالای شاخص جریان پایه در ایستگاه نیر، نشان‌دهنده تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی نفوذپذیر و تغذیه مؤثر سفره‌های آب زیرزمینی است. در مقابل، تراکم زهکشی بالا در ایستگاه پل‌الماس، پاسخ سریع حوضه به بارندگی و وقوع سیلاب‌های ناگهانی را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های مطالعات مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز ایران سازگار بوده و نقش حیاتی شرایط زمین‌شناسی و ساختارهای ژئومورفولوژیکی در شکل‌گیری الگوی هیدروگراف سیلاب را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری: تحلیل شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز بالیخوچای تأثیر قابل توجه ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و سطح زمین را بر رفتار سیلاب و رژیم جریان رودخانه برجسته می‌سازد. توزیع مکانی شاخص جریان پایه، تراکم زهکشی و عمق رواناب در سراسر حوضه نشان‌دهنده تغییرپذیری چشمگیری است که ناشی از تفاوت در نفوذپذیری، پوشش سطحی و ساختار ژئومورفولوژیکی می‌باشد. به‌عنوان مثال، مقادیر بالاتر شاخص جریان پایه در ایستگاه نیر، بر اهمیت لایه‌های زمین‌شناسی نفوذپذیر و مشارکت پایدار آب زیرزمینی تأکید دارد، در حالی که مناطق با تراکم زهکشی بالا مانند ایستگاه پل‌الماس، پاسخ هیدرولوژیکی سریع و آسیب‌پذیری بیشتری در برابر سیلاب ناگهانی نشان می‌دهند. این تغییرات، عملکرد پیچیده هیدرولوژیکی حوضه را منعکس کرده و ضرورت تدوین راهبردهای مدیریتی خاص مکان را برای مقابله با سیلاب‌ها نشان می‌دهد. استفاده از تحلیل‌های مکانی مبتنی بر GIS و آزمون روند من-کندال، بینشی ارزشمند نسبت به پویایی‌های زمانی شاخص‌های کلیدی هیدرولوژیکی فراهم کرد. روندهای مشاهده‌شده در جریان رودخانه حاکی از آن است که تغییرات کاربری اراضی، شرایط خاک و نوسانات اقلیمی ممکن است به افزایش خطر سیلاب در برخی زیرحوضه‌ها منجر شوند.

واژگان کلیدی: دبی، رودخانه، سیلاب، هیدرولوژی، پدیده‌های حدی

استناد: آموزگاری، پ؛ و پرچی، ن. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات زمانی و مکانی پاسخ هیدرولوژیک در سیل خیزی حوزه آبخیز بالیخوچای. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۱)، ۴۳-۶۰.

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

سیل در دسته فراوان‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در سرتاسر جهان قرار دارد و دارای پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی متنوعی است به طوری که یک سوم هزینه‌های مخارات طبیعی ناشی از وقوع سیلاب است (Garrote et al., 2016; Samela et al., 2018). به دلایل گوناگونی ممکن است میزان جریان رودخانه از ظرفیت حمل رودخانه فراتر رود که در چنین وضعیتی سیل^۱ شکل می‌گیرد (Carey et al., 1969). همسو با رشد جمعیت در چند دهه اخیر دو مسئله توسعه ناپایدار و تغییرات اقلیم موجب ظهور وقایع حدی و سیل‌خیز شدن بسیاری از حوزه‌های آبخیز شده‌اند (Guhathakurta et al., 2011). در این راستا، بارش شدید یا مستمر، یخ‌زدن سطح زمین در هنگام بارش، ذوب ناگهانی برف، تخریب جنگل‌ها و مراتع، انسداد جریان رودخانه و نیز شکسته شدن برخی از دلایل متداول در ایجاد سیل هستند (Bailey-Serres & Voesenek, 2015). همچنین وضعیت نامناسب اقتصادی در ایران و ناتوانی دامداران در تامین علوفه برای دام باعث ایجاد انگیزه دامدار برای استفاده بیش‌تر از علوفه مرتعی رایگان شده که موجب فشار مضاعف بر مراتع شده است (Ahmadi et al., 2024). لذا از بین رفتن پوشش گیاهی و تشدید فرسایش خاک از طریق اختلال در فرآیند نفوذپذیری بارش موجب شده تا اکثر حوزه‌های آبخیز سرتاسر کشور از حالت پایداری به حالت سیل‌خیزی تغییر وضعیت دهند و جنس سیلاب‌ها هم گل‌آلود شود (Zare et al., 2017). در این میان عامل بارش یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مباحث مربوط به سیل است که دامنه تغییرات زمانی و مکانی وسیعی دارد (Bacchi & Kottogoda, 1995) و تحت‌تأثیر خصوصیات متفاوتی اعم از ارتفاع، شیب، جهت، مشخصات خاک، دما، کاربری اراضی، جنس سازند و زمین‌شناسی، رطوبت اولیه محیط، شدت و

مدت بارش در مناطق گوناگون حوزه آبخیز باعث ایجاد پاسخ هیدرولوژیکی مختلفی می‌شود (Trenberth, 2005). لذا نحوه تبدیل بارش به رواناب و شکل‌گیری سیل یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای موجود در طبیعت است که تحت‌تأثیر اجزای اکوسیستم نتایج متفاوتی را به دنبال دارد (Blöschl et al., 2013). مکان‌یابی برای احداث سازه‌ها و عملیات آبخیزداری و نیز پیش‌بینی وقوع سیل در گرو درک تغییرات پاسخ هیدرولوژیک در مناطق مختلف حوزه آبخیز است (Gupta & Gupta, 1998). مفهوم واحد پاسخ هیدرولوژیک^۲ یکی از رویکردهای متداول برای بررسی و مدل‌سازی در هیدرولوژی است (Poblete et al., 2020). در این زمینه، ضروری است به‌منظور مدیریت منابع آب و خاک در قالب مواجهه خردمندانه با سیل، شاخص‌های کلیدی پاسخ هیدرولوژیک در واحد حوزه آبخیز تعریف و اندازه‌گیری شوند. تاکنون مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است که در مهم‌ترین این پژوهش‌ها Fohrer و همکاران (۲۰۰۱) در حوزه آبخیز Ditte River catchment در ایالت هسن^۳ در آلمان انجام شده است، تغییرات کاربری اراضی را برای استنباط پاسخ هیدرولوژیکی بررسی کردند و با استفاده از مدل SWAT^۴ چهار حوزه آبخیز با کاربری‌های متفاوت را از نظر شکل‌گیری رواناب باهم مقایسه نموده‌اند و دریافتند مهم‌ترین عاملی که موجب افزایش دبی اوج رواناب و سیل‌خیزی حوزه آبخیز می‌شود تخریب جنگل و تبدیل آن به اراضی کشاورزی است. D'Odorico و Rigon (۲۰۰۳) در پژوهش دیگری به‌صورت مدل‌سازی مفهومی بدون تمرکز بر یک حوضه خاص انجام دادند و هدف آن تحلیل نقش نسبی دامنه‌ها و کانال‌ها در پاسخ هیدرولوژیکی بود؛ یافته‌ها نشان داد که دامنه‌ها بیش‌تر بر زمان تأخیر و کانال‌ها بر انتقال جریان تأثیر دارند و ساختار شبکه زهکشی نقش مهمی در شکل‌گیری هیدروگراف دارد. همچنین مطالعه Nicótina و همکاران (۲۰۰۸) به‌صورت مدل‌سازی

3-Hessen

4- Soil and Water Assessment Tools

1- Flood

2- Hydrologic Response Units (HRU)

نتایج مطالعه نشان داد که بی‌توجهی به پراکندگی زمانی و مکانی بارش در مدل‌سازی می‌تواند منجر به برآورد نادرست از رواناب و پیک سیلاب شود. هدف نهایی پژوهش کمک به بهبود مدل‌های پیش‌بینی سیلاب در مناطق شهری از طریق درک بهتر تغییرپذیری بارش و تأثیر آن بر پاسخ سیستم هیدرولوژیکی بود. مطالعه Dos Santos و همکاران (۲۰۱۸) در جنگل‌های آمازون در کشور برزیل با هدف ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و اقلیم بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از مدل SWAT انجام شد. پژوهشگران با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، از جمله تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی یا مرتع، نشان دادند که این تغییرات موجب افزایش رواناب سطحی، کاهش نفوذ آب به خاک، و افت جریان پایه^۳ می‌شوند. همچنین، نتایج حاکی از آن بود که ترکیب تغییرات کاربری و تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرات مضاعفی بر چرخه آب در این اکوسیستم حساس بگذارد. این تحقیق اهمیت حفاظت از جنگل‌های آمازون را در پایداری منابع آبی منطقه‌ای و کاهش سیلاب‌ها برجسته می‌کند. علاوه بر این، مطالعه مروری McMillan (۲۰۲۰) با هدف بررسی جامع شاخص‌های مختلف پاسخ هیدرولوژیکی در مطالعات سیل، خشکسالی و اکوسیستم انجام شده است. در این پژوهش، نویسنده با تحلیل مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دما، رژیم بارش، شدت و مدت بارش، زمان وقوع بارش، ویژگی‌های مکانی حوضه و نفوذپذیری خاک قرار دارد. در این مطالعه، "زمان" به عواملی مانند فصل، زمان روز و تأخیر در پاسخ رواناب اشاره دارد، در حالی که "مکان" به تفاوت‌های جغرافیایی، توپوگرافی، پوشش زمین و خصوصیات خاک در نقاط مختلف حوضه مربوط می‌شود. نتایج تحقیق بر اهمیت درک جامع از تنوع مکانی و زمانی در تحلیل پاسخ‌های هیدرولوژیکی تأکید دارد. مطالعه

عددی و مفهومی انجام شده و هدف آن بررسی تأثیر الگوهای زمانی بارش، مانند شدت، توزیع و زمان وقوع بارش، بر پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز بود. این پژوهش در یک منطقه واقعی انجام نشده بلکه با شبیه‌سازی شرایط مختلف بارندگی، نشان داد که حتی با حجم بارش یکسان، نحوه توزیع زمانی بارش می‌تواند به‌طور چشم‌گیری بر پیک جریان، زمان اوج و شدت رواناب تأثیر بگذارد. نتایج نشان داد که رویدادهای بارشی با شدت بالا در ابتدای بارندگی^۱ باعث وقوع سریع‌تر و شدیدتر پیک جریان می‌شوند، این در حالی است که بارش‌های متمرکز در انتهای رویداد^۲ پاسخ هیدرولوژیکی ضعیف‌تری ایجاد می‌کنند. Wang و Manga (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی اثر زمین‌لرزه بر پاسخ هیدرولوژیکی پرداختند و دریافتند که کیفیت آب و دبی جریان تحت تاثیر وقوع زمین‌لرزه می‌تواند موجب تغییراتی در پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز شوند این مطالعه در مکان خاصی انجام نشده بلکه یک مرور علمی جهانی از اثر زمین‌لرزه بر سامانه‌های آبی است. Nippgen و همکاران (۲۰۱۱) ژئومورفولوژی، پوشش گیاهی و تغییرات آب و هوایی را در بررسی پاسخ هیدرولوژی مد نظر قرار دادند در جنگل آزمایشی Tenderfoot Creek واقع در کوه‌های Little Belt، جنوب غربی ایالت مونتانا (جنوب‌غربی مونتانا)، ایالات متحده آمریکا انجام شده است و پی بردند در بسیاری از مناطق بالادست حوزه‌های آبخیز تاثیر توپوگرافی نسبت به تغییرات آب و هوایی در وقوع سیل بسیار بیش‌تر است. مطالعه مروری Cristiano و همکاران (۲۰۱۷) با هدف بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش در مناطق شهری و تأثیر آن بر پاسخ هیدرولوژیکی انجام شده است. این تحقیق با تحلیل مطالعات مختلف بین‌المللی، به‌ویژه در شهرهای واقع در اروپا و آمریکای شمالی، تلاش می‌کند نشان دهد که بارش‌های شهری به دلیل ماهیت موضعی و ناگهانی خود، موجب ایجاد پاسخ‌های هیدرولوژیکی شدید و پیچیده می‌شوند.

بررسی سابقه پژوهش نشان می‌دهد در اکثر مناطق برای پیش‌بینی و کاهش خسارت‌های سیل همواره پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز مدنظر پژوهشگران مختلف قرار گرفته است و در هر کدام از این پژوهش‌ها شاخص‌های مختلفی را بررسی کرده‌اند. این در حالی است که اثرگذاری بالای تغییرات اقلیمی روی اکثر مناطق کشور ایران موجب رفتار ناپایدار و غیرقابل پیش‌بینی در پاسخ هیدرولوژیک بارش در این سرزمین شده است؛ لذا در پژوهش کنونی به منظور استفاده بهینه از منابع آب در قالب کاهش خطرات سیل به بررسی همزمان تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های کلیدی پاسخ هیدرولوژیک اعم از شاخص جریان پایه^۲، حداکثر رواناب^۳، دبی اوج سالانه^۴، ضریب فروکش^۵ و تراکم زهکشی^۶ در حوزه آبخیز بالیخلوچای پرداخته شده است. حوزه آبخیز بالیخلوچای به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی مناسب، موقعیت حساس در برابر وقوع سیلاب‌های ناگهانی، اهمیت اجتماعی و اقتصادی منطقه و دسترسی به داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیک کافی، به عنوان منطقه‌ای ایده‌آل برای مطالعه سیلاب انتخاب شده است. این حوضه با داشتن شیب مناسب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی خاص، نمونه‌ای مناسب برای بررسی فرآیندهای هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب در شرایط تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی است، که می‌تواند به بهبود راهکارهای کاهش خسارت سیلاب و مدیریت پایدار منابع آب کمک کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه بالیخلوچای در استان اربیل، محدوده شهرستان نیر واقع شده و در بازه طول جغرافیایی ۲۶° ۴۶' تا ۴۷° ۱۱' ۴۲' شرقی و عرض جغرافیایی

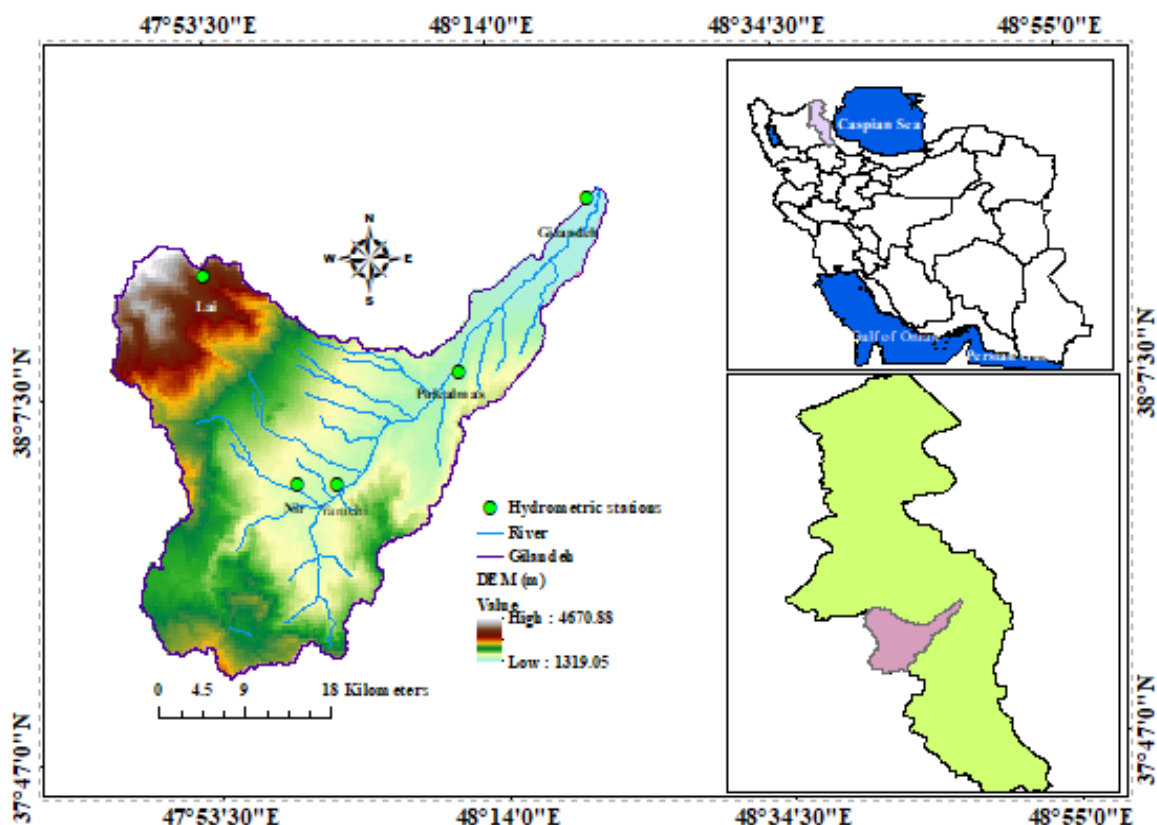
Negese (۲۰۲۱) در حوضه بالادست نیل آبی^۱ در کشور اتیوپی انجام شد و هدف آن بررسی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش زمین، به همراه فرسایش خاک، بر پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز بود. در این تحقیق از مدل SWAT برای شبیه‌سازی وضعیت گذشته و حال استفاده شد. نتایج نشان داد که تبدیل جنگل‌ها و اراضی طبیعی به زمین‌های کشاورزی و چراگاه باعث افزایش رواناب سطحی، کاهش تغذیه آب زیرزمینی و تشدید فرسایش خاک شده است. همچنین، فرسایش شدید موجب رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و کاهش ظرفیت زهکشی شده که در نهایت، پاسخ هیدرولوژیک حوضه را از نظر مقدار و زمان جریان خروجی تغییر داده است. این پژوهش بر اهمیت مدیریت پایدار کاربری اراضی و کنترل فرسایش خاک برای کاهش خطر سیلاب و حفظ منابع آبی تأکید دارد. Daneshi و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل InVEST اثرات همزمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی را بر امنیت آبی یک حوضه نیمه خشک جنگلی در شمال ایران ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم موجب کاهش آب دهی حوضه و تشدید تنش آبی می‌شود و در ترکیب با تغییرات کاربری اراضی، امنیت منابع آب را در آینده تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعه Talebi و همکاران (۲۰۲۰) در حوزه آبخیز فخرآباد مهریز استان یزد انجام شد که هدف آن ارزیابی بیلان آب با استفاده از مدل SWAT بود. پژوهشگران با بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی، توپوگرافی و دبی، مدل را واسنجی و اعتبارسنجی کرده و دریافتند که مدل SWAT توانایی مناسبی در شبیه‌سازی اجزای بیلان آبی دارد؛ به طوری که حدود ۶۷ درصد بارش به تبخیر و تعرق، و ۲۳ درصد به رواناب و جریان زیرسطحی اختصاص یافت. شاخص‌های آماری نیز نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی جریان‌ها بودند و نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت منابع آب منطقه مؤثر باشد.

4- Q-peak-annual
5- Recession Coefficient
6- Drainage Density

1 - Upper Blue Nile Basin
2- Base Flow Index (BFI)
3- Maximum Runoff

در حوزه آبخیز رودخانه بالیخلوچای، حدود ۲۶۶ میلی متر گزارش شده است (Farrokhzadeh *et al.*, 2018). در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و نحوه پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری و در جدول (۱) مشخصات این ایستگاه‌ها نشان داده شده است.

۳۸° ۴۶' ۳۸" تا ۳۸° ۲۲' ۵۲" شمالی قرار دارد. مساحت این حوزه آبخیز ۱۰۳۶/۱۸ کیلومتر مربع بوده و طول اصلی رودخانه ۶۵ کیلومتر است. همچنین، ظرفیت ذخیره‌سازی آب این رودخانه حدود ۸۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. میانگین بارن دگی سالانه



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز بالیخلوچای در کشور و در استان اردبیل

Figure 1- Location of the Balikhloochay watershed in the country and in Ardabil province

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در حوزه آبخیز بالیخلوچای

Table 1- Characteristics of the studied hydrometric stations in the Balikhloochay watershed

مساحت* Km ²	دبی (m ³ /s)	ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ایستگاه	رودخانه
1638	2.40	1332	38° 18'	48° 21'	گیلانده	بالیخلوچای
256	1.22	1624	38° 02'	47° 59'	نیر	نیرچای
1070	3.04	1440	38° 08'	48° 11'	پل‌الماس	بالیخلوچای
710	2	1584	48° 02'	48° 02'	یامچی	بالیخلوچای
36	0.122	2068	47° 54'	47° 54'	لای	لای چای

* مساحت بر حسب کیلومتر مربع (km²) بیان شده است، یعنی اندازه سطح هر حوزه آبخیز یا زیرحوضه‌ای که مربوط به هر ایستگاه هیدرومتری است.

۱- جمع‌آوری و پردازش داده‌ها: داده‌های بلندمدت هیدرولوژیکی مربوط به دبی جریان جمع‌آوری و

روش تحقیق
مراحل جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز بالیخلوچای

تحلیل رفتار سیلابی و ظرفیت ذخیره‌سازی حوضه تأثیرگذار است (Talaksen, 1995).

۱-۱-۲- محاسبه شاخص جریان پایه

در این پژوهش، جهت تعیین شاخص جریان پایه^۲ (BFI)، داده‌های دبی روزانه ثبت شده در پنج ایستگاه هیدرومتری با دوره آماری ۲۰ ساله مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، جریان پایه از هیدروگراف روزانه با استفاده از روش فیلتر دیجیتال بازگشتی^۳ و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار اکسل استخراج شد. در این روش، جریان کل رودخانه به دو مؤلفه جریان سریع^۴ و جریان پایه تفکیک می‌شود. فیلتر دیجیتال بازگشتی با حذف مؤلفه‌های دارای فرکانس بالا که عمدتاً ناشی از رواناب مستقیم رخدادهای بارشی هستند، مؤلفه کم فرکانس و پایدار جریان پایه را استخراج می‌کند. سپس شاخص جریان پایه به صورت نسبت حجم جریان پایه به حجم کل جریان در طول دوره مورد مطالعه محاسبه شد (Eckhardt, 2005).

الگوریتم یک پارامتری نیازمند تعیین پارامتر ثابت بازگشت (K) است که در این پژوهش با استفاده از تحلیل شاخه فروکش جریان محاسبه شد. این رابطه به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Q_b(i) = \frac{K}{2-K} q_b(i-1) + \frac{1-K}{2-K} q_b(i) \quad (1)$$

در این رابطه، $Q_b(i)$ مقدار متغیر q_b در مرحله i ، $Q_b(i-1)$ مقدار متغیر q_b در مرحله قبلی $(i-1)$ ، K : یک ضریب که احتمالاً یک ثابت یا پارامتر وابسته به شرایط مسأله است. $K-1$ و $2-K$ ، ترکیبات خطی از مقدار K ، را نشان می‌دهد.

پس از تفکیک جریان پایه، شاخص BFI به‌عنوان نسبت حجم جریان پایه به جریان کل در هر سال یا دوره آماری محاسبه شد و نشان‌دهنده سهم جریان تأمین‌شده از ذخایر زیرسطحی حوضه است (Smakhtin, 2001). این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

نواقص آماری با روش شناسایی و حذف داده‌های پرت^۱ بازسازی شدند.

۱-۱- انتخاب ایستگاه‌های هیدرومتری: پنج ایستگاه هیدرومتری مذکور در جدول ۱، در حوزه آبخیز بالیخلوچای که دارای دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲) بودند، انتخاب شدند.

۲- بررسی شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک

به‌منظور بررسی سیلاب در حوزه آبخیز بالیخلوچای، از شاخص‌های هیدرولوژیکی از جمله شاخص جریان پایه، حداکثر رواناب، تراکم زهکشی، دبی اوج و ضریب فروکش استفاده شده است. این شاخص‌ها از پارامترهای کلیدی در تحلیل و پیش‌بینی سیلاب محسوب شده و تأثیر زیادی در فهم رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز دارند.

۱-۲- شاخص جریان پایه: نشان‌دهنده سهم جریان پایه از کل جریان رودخانه است و نقش مهمی در تعیین پایداری منابع آبی و واکنش حوزه آبخیز به بارش‌های شدید دارد (Gustard et al., 1992).

۲-۲- حداکثر رواناب: بیانگر بیش‌ترین مقدار رواناب تولیدشده در اثر یک رویداد بارشی است و تحت تأثیر پارامترهایی نظیر شدت بارش، نفوذپذیری خاک و وضعیت پوشش گیاهی قرار دارد. این شاخص در ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه آبخیز بسیار حائز اهمیت است.

۳-۲- تراکم زهکشی: این شاخص نسبت طول کل آبراه‌ها به مساحت حوضه بوده و نشان‌دهنده حساسیت حوضه نسبت به تولید رواناب و وقوع سیلاب است (Strahler, 1964).

۴-۲- دبی اوج: مقدار بیشینه جریان در یک دوره خاص را نشان می‌دهد و برای طراحی سازه‌های کنترل سیلاب ضروری است (Chow et al., 1998).

۵-۲- ضریب فروکش: نشان‌دهنده سرعت کاهش دبی رودخانه پس از وقوع یک رویداد بارشی است و در

$$D_d = \frac{L}{D}$$

(۴)

که در آن، (Dd): تراکم زهکشی، (L): مجموع طول رودخانه‌ها و جریان‌های موجود در حوضه (کیلومتر) و (D): مساحت کل حوزه آبخیز (کیلومتر مربع) می‌باشند.

۴-۴-۲- محاسبه حداکثر رواناب

با در نظر گرفتن مساحت حوزه آبخیز مرتبط با هر ایستگاه، ارتفاع رواناب ماهانه در هر ایستگاه تعیین گردید. با استفاده از معادله زیر، ارتفاع رواناب برحسب میلی‌متر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{V}{A} \quad (۵)$$

در معادله ارتفاع رواناب R برحسب میلی‌متر محاسبه می‌شود. در این رابطه، V حجم کل رواناب تولید شده در حوزه آبخیز است که برحسب متر مکعب بیان می‌شود، و A مساحت حوزه آبخیز متناظر با ایستگاه اندازه‌گیری است که برحسب کیلومتر مربع یا متر مربع بیان می‌گردد. برای به‌دست آوردن R برحسب میلی‌متر، لازم است که واحدهای حجم و مساحت به گونه‌ای تنظیم شوند که حاصل تقسیم آن‌ها به میلی‌متر تبدیل گردد.

پس از محاسبه ارتفاع رواناب در هر ماه، بیش‌ترین مقدار ارتفاع رواناب در سال به‌عنوان حداکثر رواناب سالانه انتخاب می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده شدیدترین واکنش هیدرولوژیکی حوضه نسبت به بارش است.

۳- تهیه نمودارهای تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در محیط (GIS)

در این مرحله از پژوهش به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، از نمودارهای تحلیلی برای نمایش روند تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیکی استفاده شد.

۴- تحلیل مکانی تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در محیط GIS

پس از محاسبه مقادیر شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در منطقه مورد مطالعه، مقادیر مذکور به روش وزنی

$$BFI = \frac{Q_b}{Q}$$

(۲)

که در آن، Q_b: مقدار جریان پایه (Base Flow)، Q: مقدار کل جریان رودخانه (Total Flow)، چون این شاخص یک نسبت است، مقدار آن معمولاً به‌صورت یک عدد بین ۰ تا ۱ یا (۰ تا ۱۰۰ درصد) بیان می‌شود.

۲-۲-۲- محاسبه ضریب فروکش جریان

کاهش دبی در دوره فروکش از یک مدل نمایی تبعیت می‌کند که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (۳)$$

که در آن، Q_t: دبی در زمان t، Q₀: دبی اولیه در ابتدای دوره‌ی فروکش، α: ضریب فروکش جریان (day⁻¹), t: زمان سپری شده از آغاز دوره فروکش (روز، ساعت، ثانیه) می‌باشد. در تحقیق حاضر برای تهیه منحنی فروکش اصلی از برنامه ماکرو استفاده شد. ماکرو یک برنامه کامپیوتری است که به فایل اکسل اضافه می‌شود، این برنامه به زبان VBA^۱ نوشته شده است. برنامه‌های صفحه گسترده موجود به‌منظور تحلیل منحنی فروکش براساس هیدروگراف جریان کل دوره و هیدروگراف در یک دوره انتخابی توسط (Posavec et al., 2006) ارائه شده است. در اجرای برنامه ماکرو جهت استخراج منحنی فروکش اصلی از داده‌های دبی جریان و در برنامه اکسل استفاده می‌شود. فرمت ورودی داده‌ها مطابق فرمت برنامه اکسل بوده و با توجه به تایید فرآیند محاسبات در برنامه مذکور، کاربر می‌تواند با ایجاد تغییرات جزئی در برنامه آن را برای اهداف خاص و یا محاسبه منحنی در یک دوره مشخص (کم‌آب یا پرآب) تغییر دهد.

۳-۳-۲- محاسبه تراکم زهکشی

تراکم زهکشی به‌عنوان نسبت طول کل جریان‌های سطحی در یک حوزه آبخیز به مساحت کل حوضه تعریف می‌شود و با واحد کیلومتر بر کیلومتر مربع (km²/km²) بیان می‌شود. این رابطه به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

الف) محاسبه پارامتر S با استفاده از رابطه (۸):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j + x_k) \quad (۸)$$

که در آن n، تعداد مشاهدات سری، X_k و X_j داده‌های زام و Kام است.

تابع علامت نیز با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\text{Sgn} = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۹)$$

ب) محاسبه واریانس با استفاده از روابط (۱۰) یا (۱۱)

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (۱۰)$$

اگر n کوچک‌تر از ۱۰ باشد. (۱۰)

و اگر n بزرگ‌تر از ۱۰ باشد (رابطه ۱۱):

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n-1) \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t-5)}{18} \quad (۱۱)$$

که در آن n، تعداد گره‌هایی که داده مشابه دارند و i فراوانی داده‌هایی که ارزش یکسانی دارند.

ج) استخراج آماره Z با استفاده از رابطه (۱۲):

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\text{var}(s)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & S < 0 \end{cases} \quad (۱۲)$$

د) تعیین نتیجه آزمون:

در یک آزمون دوطرفه برای بررسی روند داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه (۱۳) برقرار باشد. در غیر این صورت فرض مقابل قابل قبول است.

$$|Z| \leq \frac{Z/\alpha}{Z} \quad (۱۳)$$

که در آن α سطح معنی‌داری انتخابی برای آزمون است. Z/α آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد که با توجه به دوطرفه بودن آزمون مقدار $\alpha/2$ استفاده شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن روند داده‌ها نزولی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) نمودار جریانی پژوهش ارائه شده است.

معکوس فاصله^۱ درون‌یابی شد. این روش سطحی از نقاط اندازه‌گیری شده بر پایه مسافت و همسانی را ایجاد می‌کند و معادله آن به صورت رابطه (۶) است (Johnstone et al., 2004).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^q} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^q}} \quad (۶)$$

که در آن Z مقدار درون‌یابی شده، Z_i مقدار نمونه‌برداری شده، D_i فاصله بین مقادیر درون‌یابی شده و نمونه‌برداری شده و q یک ثابت مناسب است.

۵- آزمون همبستگی بین شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در محیط نرم‌افزار R

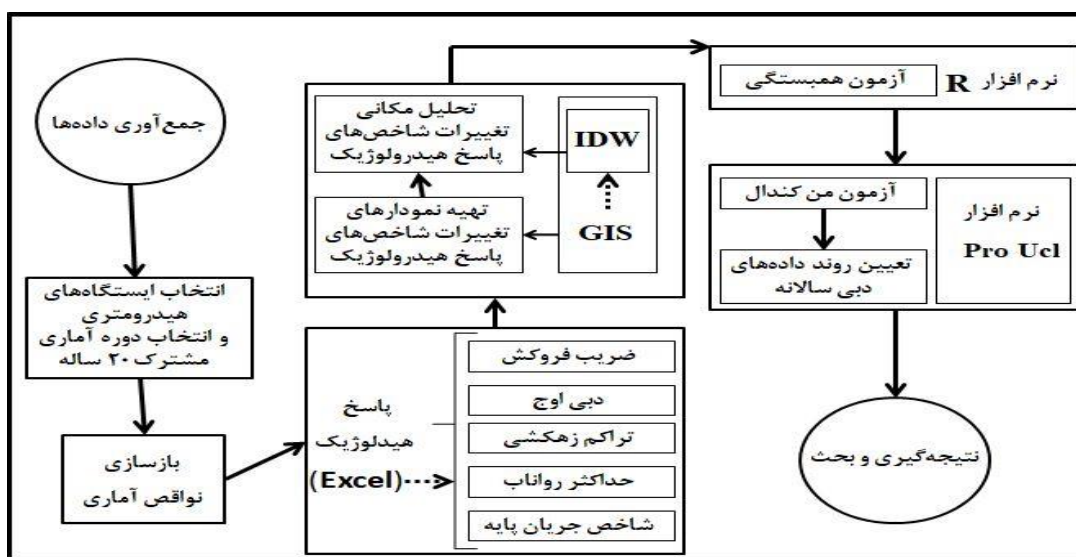
ضریب همبستگی (r) معیاری است که میزان همبستگی یا ارتباط خطی بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. این ضریب نشان‌دهنده میزان رابطه‌ی خطی بین دو متغیر است و مقدار آن در بازه -۱ تا +۱ قرار دارد که مقادیر مثبت و منفی یک نشان‌دهنده همبستگی کامل مثبت و منفی و همبستگی صفر نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی خطی است. این ضریب از طریق معادله همبستگی پیرسون محاسبه می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود (رابطه ۷):

$$R = \frac{\sum_i^n (Q_i - \bar{Q})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_i^n (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_i^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۷)$$

R: ضریب همبستگی بین دو متغیر Q و P، Q_i : مقدار Q در مشاهده i، \bar{Q} : میانگین مقادیر Q، P_i : مقدار P در مشاهده i، \bar{P} : میانگین مقادیر P، n: تعداد کل داده‌ها.

۶- تعیین روند داده‌های دبی اوج سالانه ایستگاه‌های هیدرومتری

روند داده‌های هیدرومتری ایستگاه‌های مورد مطالعه از سال ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲، با استفاده از نرم‌افزار Pro Ucl و با استفاده از آزمون من‌کنندال انجام شد (Kendal, 1975). این آزمون یکی از روش‌های مهم برای بررسی روند سری‌های زمانی محسوب می‌شود که طی مراحل زیر انجام می‌شود:



شکل ۲- فلوجارت پژوهش

Figure 2- Research flowchart

نتایج

در جدول (۲) مقادیر محاسباتی شاخص‌های مورد استفاده برای سنجش پاسخ هیدرولوژیک در ایستگاه‌های هیدرومتری گیلانده، پل الماس، لای، نیر و یامچی ارائه شده است.

۱- مقدار شاخص‌های مورد استفاده برای سنجش پاسخ هیدرولوژیک در ایستگاه‌های هیدرومتری

جدول ۲- مقادیر محاسباتی شاخص‌های مورد استفاده در حوزه آبخیز بالیخلوچای

Table 2- Calculated values of the indicators used in the Balikhloochoi watershed

نام ایستگاه	شاخص جریان پایه	دبی اوج سالانه (m ³ /s)	حداکثر رواناب (mm)	تراکم زهکشی (Km/Km ²)	ضرب و فروکش جریان (day ⁻¹)
گیلانده	0.38	1.84	5.37	4.6	-0.17
پل الماس	0.48	2.81	5.83	6	-0.30
نیر	0.5	1.19	1.81	0.6	-0.05
لای	0.47	0.25	0.14	5.4	-0.01
یامچی	0.45	2.83	0.59	1.7	-0.21

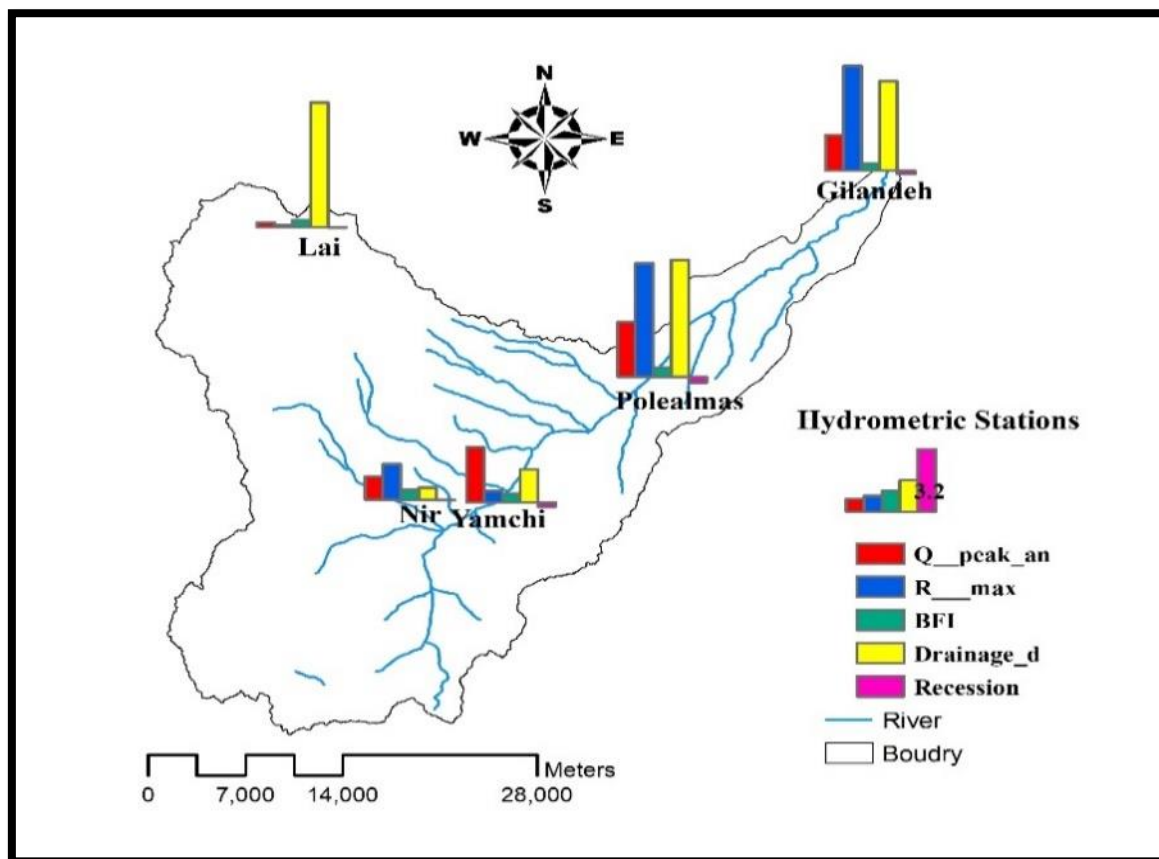
۲- نمودارهای تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک

آبخوان‌ها و تغذیه بیش‌تر آب زیرزمینی است. ایستگاه پل الماس با مقدار ۵/۸۳ مترمکعب بر ثانیه حداکثر رواناب را دارد. این مقدار زیاد می‌تواند به دلیل وسعت زیاد حوضه، تمرکز جریان و شرایط توپوگرافی بالادست باشد. دبی اوج سالانه ایستگاه‌های پل الماس (۲/۸۱) مترمکعب بر ثانیه) و یامچی (۲/۸۳ مترمکعب بر ثانیه) نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیش‌ترین مقادیر را دارند و نشان‌دهنده این است که این مناطق در برابر وقوع سیلاب آسیب‌پذیرتر هستند. ایستگاه پل الماس با مقدار ۶ کیلومتر بر کیلومترمربع بالاترین تراکم زهکشی را

در شکل (۳) نقشه نمودارهای تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه آبخیز بالیخلوچای ارائه شده است. بر اساس جدول (۲) و اطلاعات شکل (۳)، شاخص جریان پایه (BFI) ایستگاه نیر بالاترین مقدار این شاخص را (۰/۵) دارد، به این معنا که درصد قابل توجهی از جریان رودخانه از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. این ویژگی نشان‌دهنده پایداری جریان در شرایط کم بارش است و بیانگر تأثیر

دوره‌های خشک است. ایستگاه‌های پل‌الماس و یامچی دارای بیش‌ترین دبی اوج سالانه و حداکثر رواناب هستند، که آن‌ها را مستعد وقوع سیلاب می‌کند. ایستگاه لای دارای تراکم زهکشی بالا و بالاترین ضریب فروکش است، که نشان‌دهنده پاسخ سریع حوضه به بارش و سیلاب‌های سریع است. ایستگاه پل‌الماس که در پایین دست قرار دارد، بیش‌ترین تجمع رواناب و دبی را تجربه می‌کند، که نشان‌دهنده نقش کلیدی آن در مدیریت سیلاب حوضه است.

دارد و نشان‌دهنده زمین‌های با نفوذپذیری کم، شیب زیاد و رواناب سریع است که می‌تواند منجر به وقوع سیلاب‌های ناگهانی شود. ضریب فروکش ایستگاه لای دارای بیش‌ترین مقدار (۰/۱-) است و نشان‌دهنده کاهش آرام جریان پس از یک رویداد بارشی است که ممکن است به دلیل نفوذپذیری بالا و ذخیره آب در منابع زیرزمینی باشد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت، ایستگاه نیر دارای بیش‌ترین شاخص جریان پایه است که نشان‌دهنده پایداری جریان رودخانه در



شکل ۳- نمودارهای تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک (شاخص جریان پایه، حداکثر رواناب، تراکم زهکشی، ضریب فروکش، دبی اوج) در ایستگاه‌های هیدرومتری

Figure 3- Diagrams of changes in hydrological response indices (base flow index, maximum runoff, drainage density, subsidence coefficient, peak discharge) at hydrometric stations

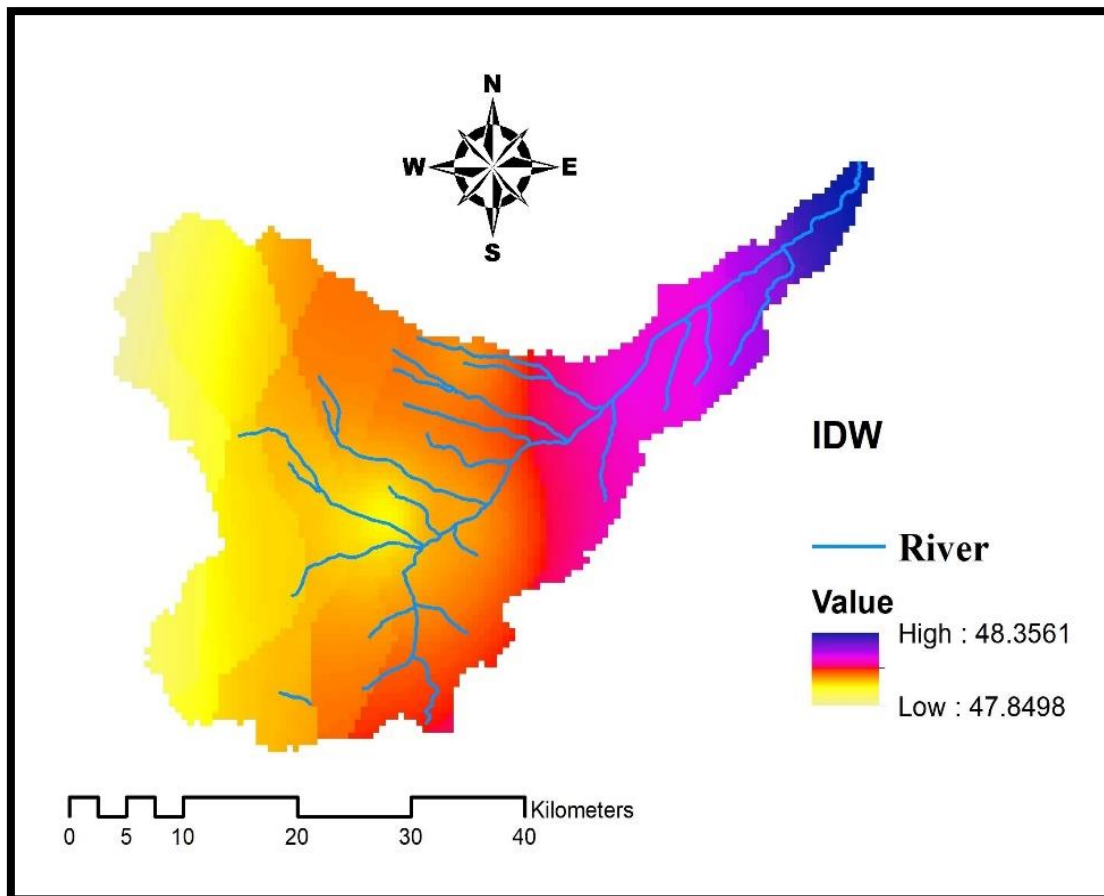
مناطق ویژگی‌های خاصی دارند که شامل بارندگی بیش‌تر که تأثیر مستقیم بر افزایش دبی رودخانه‌ها و تغذیه سیستم‌های سطحی و زیرسطحی آب دارند، شیب تندتر و نفوذپذیری کم‌تر خاک است که باعث کاهش فرصت نفوذ و افزایش سرعت رواناب می‌شود. در مقابل، مناطق پایین‌دست معمولاً با بارش کم‌تر،

۳- تحلیل مکانی تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک در محیط (GIS)

در شکل ۴ نقشه تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک ارائه شده است. بررسی نقشه‌های حاصل از IDW نشان می‌دهد که نواحی بالادست معمولاً با مقادیر بالای رواناب، دبی و بارش مرتبط هستند. این

بیشتر است. از جمله ویژگی‌های این مناطق بارندگی کم‌تر است که باعث کاهش تغذیه منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود.

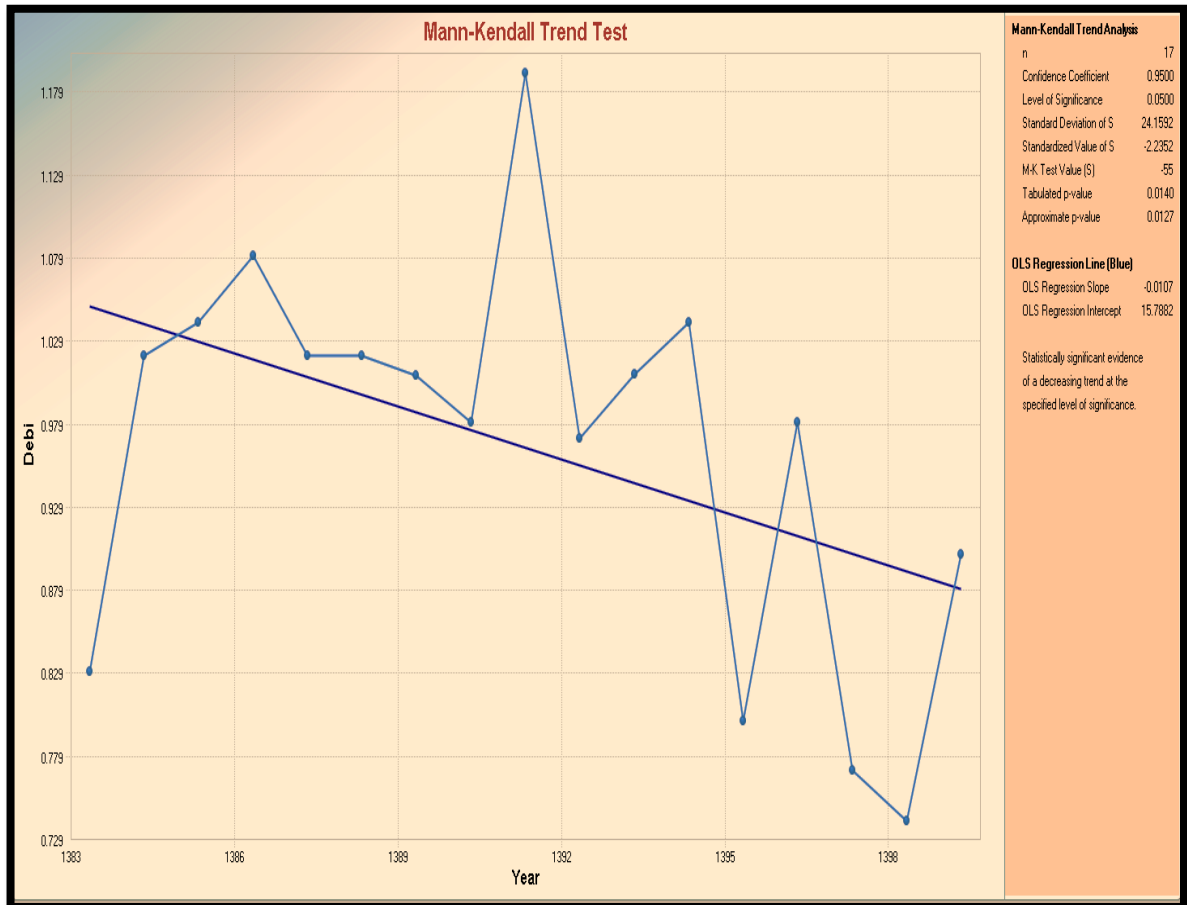
جریان‌های کم و نرخ نفوذپذیری بالاتر خاک مرتبط هستند. در این نواحی، ذخایر آب سطحی محدود بوده و جریان‌های رودخانه‌ای کم‌تر و دوره‌های خشکسالی



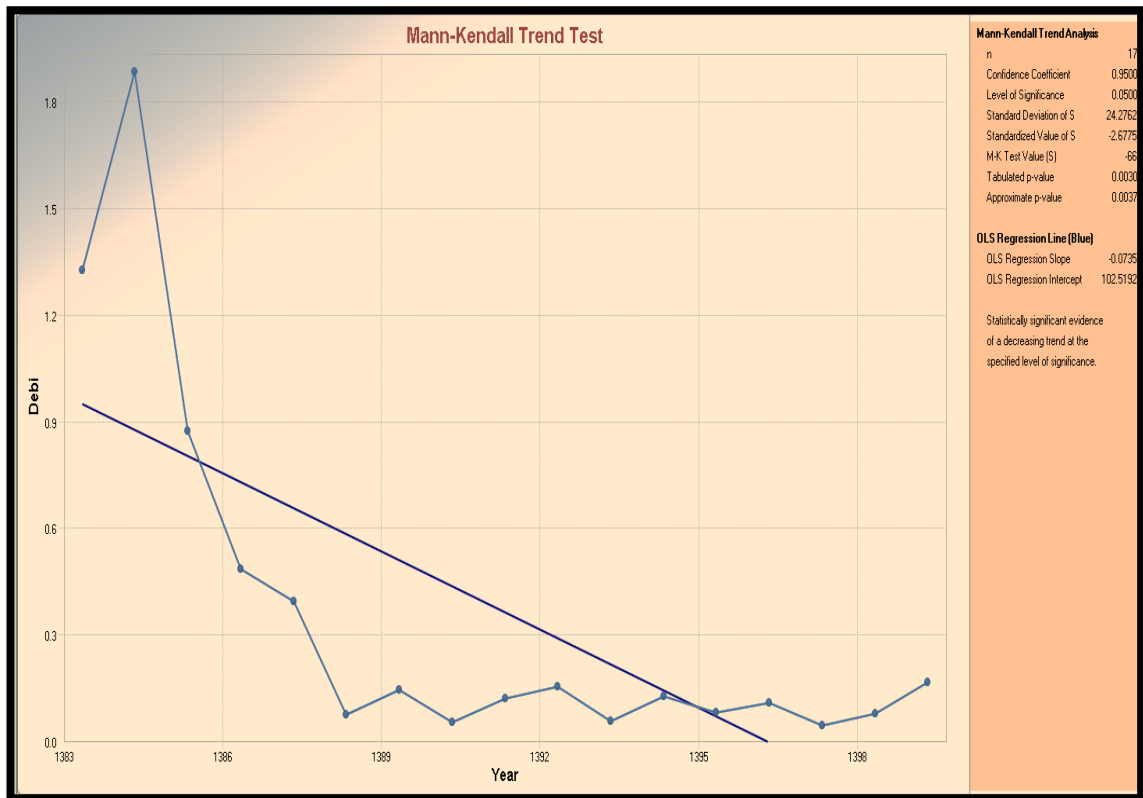
شکل ۴- نقشه تغییرات شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیک
Figure 4- Map of changes in hydrological response indicators

کاهش یافته‌اند. این موضوع می‌تواند به دلایلی مانند تغییرات اقلیمی (کاهش بارش‌ها)، کاهش تغذیه زیرزمینی رودخانه‌ها، یا تغییرات در استفاده از منابع آب و برداشت از منابع زیرزمینی باشد. در ایستگاه‌های پل الماس، گیلانده و یامچی، روند کاهش دبی در سطح یک درصد معنی‌دار است. در ایستگاه‌های نیر و لای، روند کاهش دبی در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

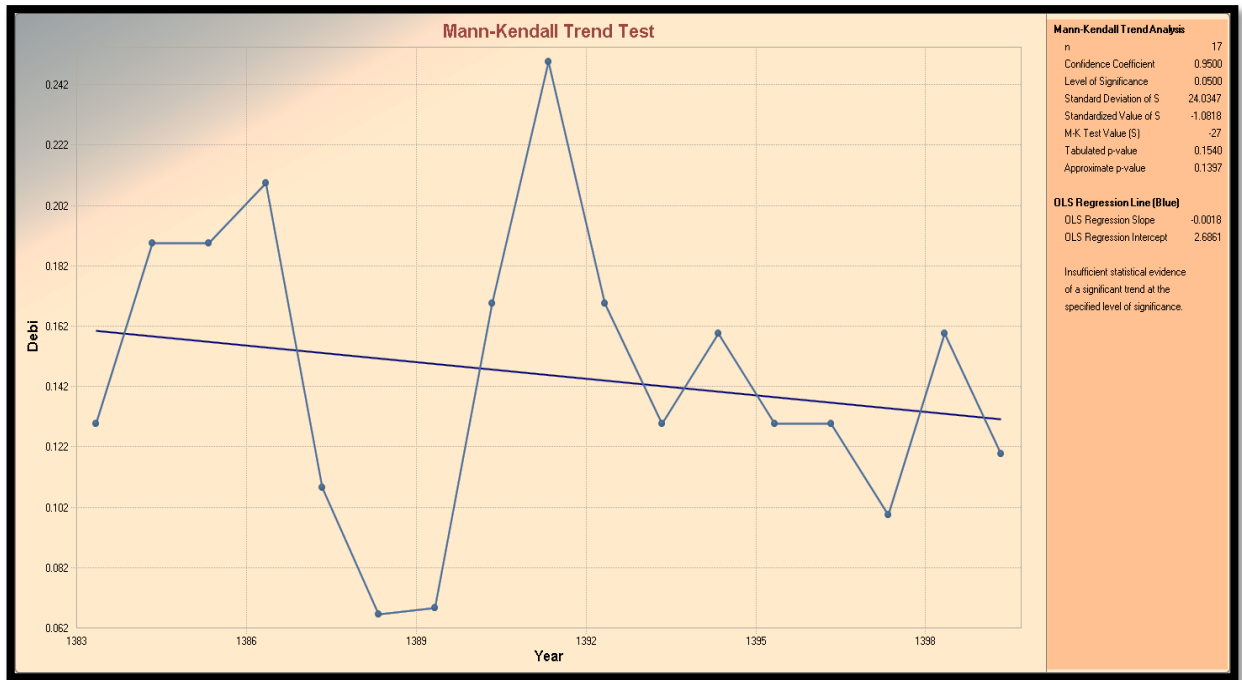
۴- نتایج روند داده‌های دبی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه با استفاده از آزمون من‌کنندال نتایج مربوط به آزمون من‌کنندال در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه به ترتیب در شکل ۶ ارائه شده است. مقادیر روند داده‌های دبی با آزمون من‌کنندال در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس یافته‌ها، روند تغییرات دبی در تمامی ایستگاه‌ها کاهش است و جریان‌های رودخانه‌ای در این مناطق به‌طور پیوسته



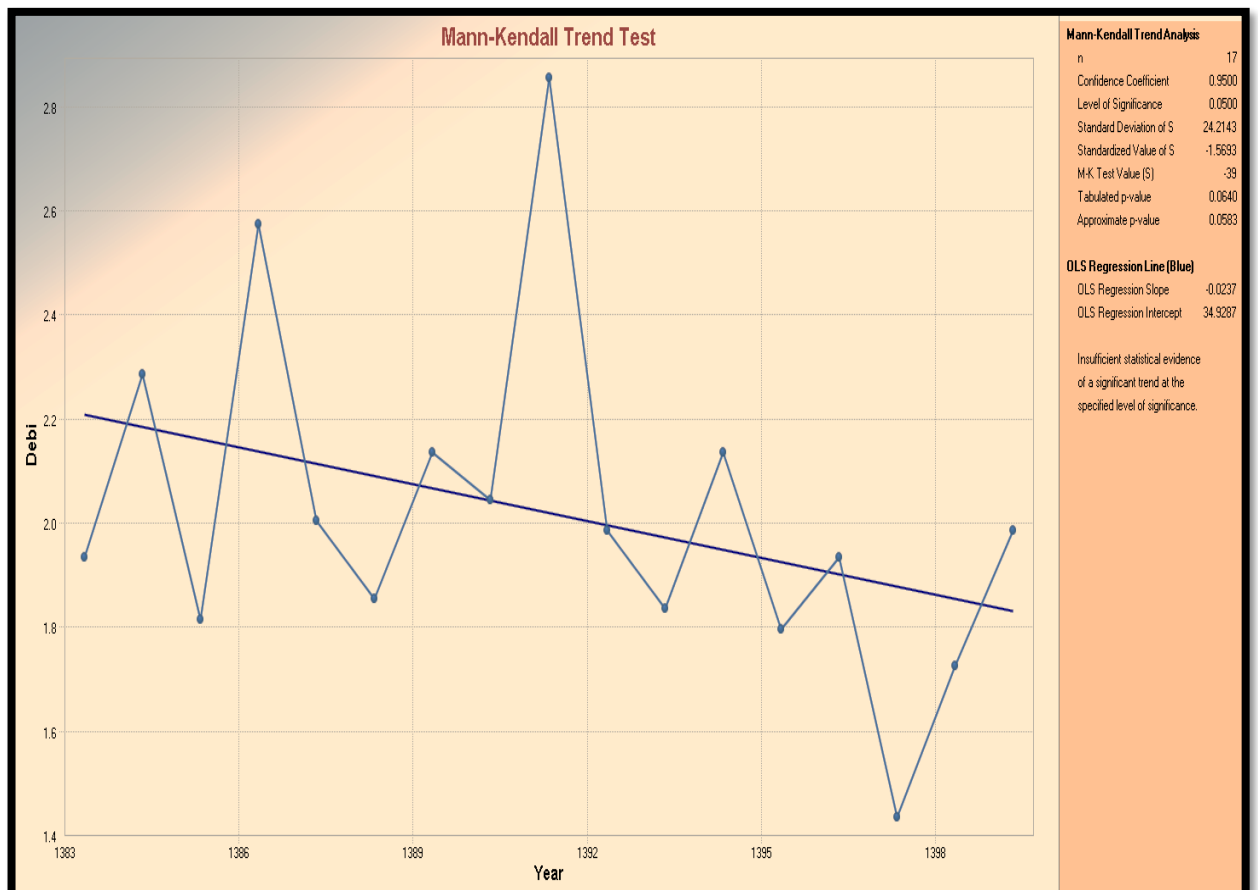
ایستگاه هیدرومتری نیر



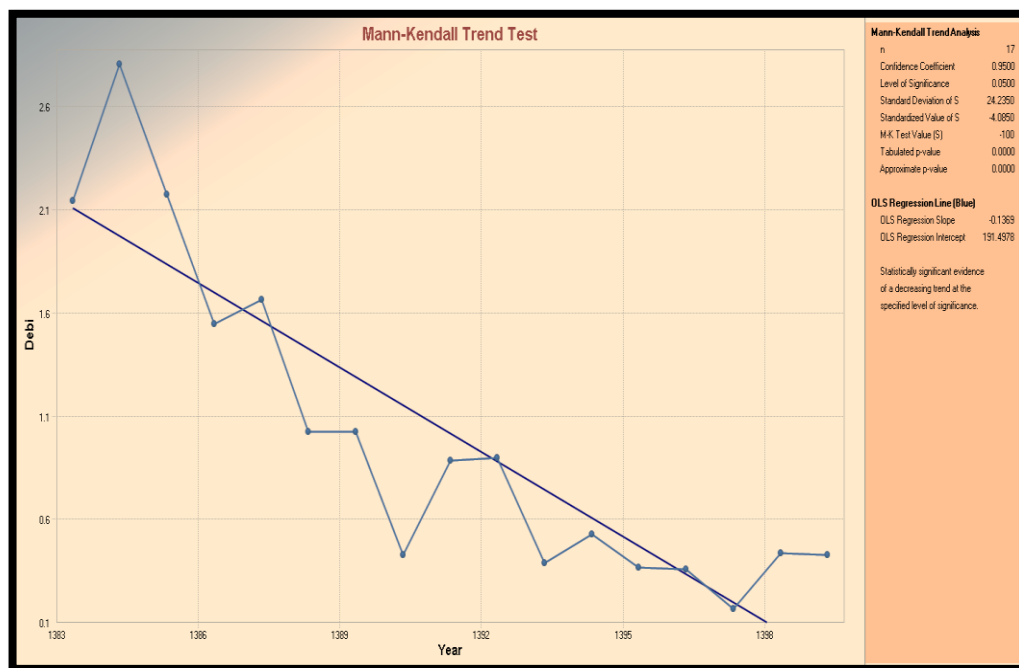
ایستگاه هیدرومتری گیلانده



ایستگاه هیدرومتری لای



ایستگاه هیدرومتری یامچی



ایستگاه هیدرومتری پل الماس

شکل ۶- روند تغییرات دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Figure 6- Trend of discharge changes at the studied hydrometric stations

جدول ۳- مقادیر روند تغییرات دبی با آزمون من کندال در ایستگاه‌های هیدرومتری

Table 3- Trends in discharge changes using the Mann-Kendall test at hydrometric stations

روند	آزمون من کندال		ایستگاه
	M-K Test Value (S)	p- value	
کاهشی**	-66	0.0037	گیلانده
کاهشی**	-39	0.05	یامچی
کاهشی**	-100	< 0.001	پل الماس
کاهشی*	-55	0.0127	نیر
کاهشی*	-27	0.14	لای

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

بحث

یا دارای شکستگی‌های فراوان است که موجب تغذیه مناسب سفره‌های زیرزمینی شده‌اند. در مقابل، ایستگاه لای با جریان پایه پایین‌تر و رواناب بیش‌تر در مناطقی با سنگ‌های نفوذناپذیر یا سازندهای رسی و مارنی واقع شده که توانایی نفوذپذیری کمی دارند و منجر به رواناب سریع سطحی می‌شوند. حوضه‌هایی مانند پل الماس و یامچی که دارای دبی اوج بالا و حداکثر رواناب زیاد هستند، در بخش‌هایی از حوضه قرار گرفته‌اند که کاربری آن‌ها به اراضی کشاورزی فشرده یا مناطق توسعه‌یافته انسانی تغییر یافته است. چنین تغییراتی موجب کاهش نفوذ، افزایش رواناب سطحی و

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS، تصویری جامع از رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بالیخوچای ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه‌های هیدرولوژیکی سیلاب از قبیل دبی اوج، جریان پایه، تراکم زهکشی و ضریب فروکش به‌طور مستقیم تحت تأثیر خصوصیات فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، اقلیم و کاربری اراضی حوضه هستند. در بخش‌هایی از حوضه مانند ایستگاه نیر، بالابودن شاخص جریان پایه حاکی از وجود سازندهای نفوذپذیر، آهکی

کوهستانی کارستی نشان دادند که آبخوان‌های کارستی سهم قابل توجهی در تأمین جریان پایه رودخانه دارند و تخلیه آب زیرزمینی از مجاری و ماتریکس کارستی موجب پایداری جریان رودخانه در دوره‌های کم‌آبی می‌شود. مطالعه Oudin و همکاران (۲۰۰۸) نیز در حوزه‌های آبخیز اروپایی تأکید داشت که شاخص‌های پاسخ هیدرولوژیکی اغلب تحت تأثیر ساختار حوضه، نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی هستند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بالیخوچای تحت تأثیر ترکیبی از عوامل فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شرایط اقلیمی قرار دارد. از جمله نتایج کلیدی می‌توان به کاهش معنی‌دار دبی در اغلب ایستگاه‌ها، وابستگی جریان پایه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و شکستگی‌ها، و تأثیر منفی تغییر کاربری اراضی به مناطق توسعه یافته بر شدت رواناب اشاره کرد. تطابق نتایج با مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که روند کاهش جریان رودخانه‌ها نه تنها یک پدیده محلی، بلکه بخشی از یک الگوی منطقه‌ای و جهانی در پاسخ به تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی بر منابع آب است. در تحلیل پاسخ سیلاب، توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، ظرفیت ذخیره زیرزمینی و شاخص‌های هیدرولوژیکی، برای برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب و کاهش خطر سیلاب ضروری است. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی علمی برای افزایش تاب‌آوری مناطق حساس در برابر تغییرات اقلیمی فراهم کند.

افزایش آسیب‌پذیری در برابر سیلاب‌ها می‌شود. در مقابل، نواحی با پوشش گیاهی طبیعی یا جنگلی، جریان پایه بیشتر و شدت سیلاب پایین‌تری دارند. بر اساس آزمون من-کندال، روند دبی در تمام ایستگاه‌ها کاهش یافته که در سه ایستگاه پل‌الماس، گیلانده و یامچی به صورت معنی‌دار در سطح ۱ درصد ثبت شده است. این نتایج با تغییرات اقلیمی اخیر، کاهش بارش‌ها، افزایش دما و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی هم‌راستا است. همچنین برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌تواند سهم زیادی در این روند منفی ایفا کند. مطالعات پیشین نیز یافته‌های این پژوهش را تأیید می‌کنند. Abghari و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی روند جریان رودخانه‌های غرب ایران طی ۴۰ سال، دریافتند که به دلیل کاهش بارش‌ها و تغییر در الگوی آن، اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه با روند کاهش در جریان رودخانه‌ها مواجه بوده‌اند. این پژوهش نتیجه می‌گیرد که تغییرپذیری بارش به‌ویژه در فصل بهار، عامل کلیدی و اصلی در کاهش جریان رودخانه‌های این منطقه است. Sarah و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تعاملات پیچیده میان پارامترهای هیدرولیکی و ویژگی‌های مورفومتریکی در سیستم‌های آبخوان مرتفع پرداختند. یافته‌ها حاکی از آن شد که میزان مشارکت جریان پایه به شدت تحت تأثیر هم‌افزایی بین نفوذپذیری هیدرولیکی اشباع و کنترل‌های توپوگرافی قرار دارد. در محیط‌های با زمین‌شناسی پیچیده، توزیع فضایی Ksat و شیب زمین، مکانیسم‌های تغذیه و تخلیه آبخوان را کنترل کرده و پایداری جریان‌های سطحی را تعیین می‌کنند. Neilson و همکاران (۲۰۱۸) در یک حوزه آبخیز

References

Abghari, H., Tabari, H., & Hosseinzadeh Talaei, P. (2013). River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: Impact of precipitation variability. *Global and Planetary Change*, 101, 52–60. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.003>

Ahmadi, F., Zamani, O., Mirzaei, H., & Azadi, H. (2024). Exploring the impact of dust storms on pastoralists' livelihoods in West Iran: Social, economic, and environmental consequences. *Environmental Quality Management*, 33(2), 821–833. <http://doi.org/10.1002/tqem.22158>

Bacchi, B., & Kottegoda, N.T. (1995). Identification and calibration of spatial

- correlation patterns of rainfall. *Journal of Hydrology*, 165(1-4), 311-348. [https://doi.org/10.1016/00221694\(94\)02590-8](https://doi.org/10.1016/00221694(94)02590-8)
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (Eds.). (2013). *Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/CBO9781139235761.006>
- Brandt, W. T., Haleakala, K., Hatchett, B. J., & Pan, M. (2022). A review of the hydrologic response mechanisms during mountain rain-on-snow. *Frontiers in Earth Science*, 10, 791760. <http://doi.org/10.3389/feart.2022.791760>
- Carey, W. C. (1969). Formation of floodplain lands. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 95, 981-994.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill
- Cristiano, E., ten Veldhuis, M. C., & Van De Giesen, N. (2017). Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas—a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3859-3878. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-3859-2017>
- D'Odorico, P., & Rigon, R. (2003). Hillslope and channel contributions to the hydrologic response. *Water Resources Research*, 39(5), 1125-1135. <https://doi.org/10.1029/2002WR001708>
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology*. Waveland Press. pp 643.
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., & Messner, F. (2018). Hydrologic response to land use change in a large basin in eastern Amazon. *Water*, 10(4), 429. <http://doi.org/10.3390/w10040429>.
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, 593, 125621. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- Ebel, B. A., Shephard, Z. M., Walvoord, M. A., Murphy, S. F., Partridge, T. F., & Perkins, K. S. (2023). Modeling post-wildfire hydrologic response: Review and future directions for applications of physically based distributed simulation. *Earth's Future*, 11(2), e2022EF003038. <https://doi.org/10.1029/2022EF003038>
- Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 168-173. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.005>
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Farrokhzadeh, B., Choobeh, S., Nouri, H., & Goodarzi, M. (2018). Study of climate change and land use changes impacts on surface runoff: BalighloChai Watershed in Ardebil. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 318-331. <http://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.107110.1165>
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K., & Frede, H. G. (2001). Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8), 577-582. [http://doi.org/10.1016/S14641909\(01\)00052-1](http://doi.org/10.1016/S14641909(01)00052-1)
- Garrote, J., Alvarenga, F. M., & Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage-damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611-625. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.006>
- Guhathakurta, P., Sreejith, O. P., & Menon, P. A. (2011). Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 359-373. <http://doi.org/10.1007/s12040-011-0082-5>
- Gupta, V. K., & Mesa, O. J. (1988). Runoff generation and hydrologic response via channel network. *Journal of Hydrology*, 102(1-4), 3-28. [https://doi.org/10.1016/00221694\(88\)90089-3](https://doi.org/10.1016/00221694(88)90089-3)
- Gustard, A., Bullock, A., & Dixon, J. M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. Institute of Hydrology.

- Johnstone, J. F., Chapin, F. S., Foote, J., Kemmett, S., Price, K., & Viereck, L. (2004). Fire, climate change, and forest resilience in interior Alaska. *Science*, 305(5685), 1234–1236. <https://doi.org/10.1126/science.1098941>
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin.
- McMillan, H. (2020). Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review. *Hydrological Processes*, 34(6), 1393–1409. <https://doi.org/10.1002/hyp.13632>
- Neilson, B. T., Tennant, H., Barnes, M., Stout, T., Miller, M. P., Gabor, R. S. (2018). Stream-Centric Methods for Determining Groundwater Contributions in Karst Mountain Watersheds. *Water Resources Research*, 54(9), 6708–6724. <https://doi.org/10.1029/2018WR022664>.
- Negese, A. (2021). Impacts of land use and land cover change on soil erosion and sediment yield in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021, Article ID 6669438.
- Ni, J., Liu, S., Huang, Y., & Gao, Y. (2024). Temperature and plant root effects on soil hydrological response and slope stability. *Computers and Geotechnics*, 174, 106663. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106663>
- Nicótina, L., Alessi Celegon, E., Rinaldo, A., & Marani, M. (2008). On the impact of rainfall patterns on the hydrologic response. *Water Resources Research*, 44(12), W12401. <https://doi.org/10.1029/2007WR006654>
- Nippgen, F., McGlynn, B. L., Marshall, L. A., & Emanuel, R. E. (2011). Landscape structure and climate influences on hydrologic response. *Water Resources Research*, 47(12), W12533. <http://doi.org/10.1029/2011wr011161>
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3), W03413.
- Poblete, D., Arévalo, J., Nicolis, O., & Figueroa, F. (2020). Optimization of Hydrologic Response Units (HRUs) using gridded meteorological data and spatially varying parameters. *Water*, 12(12), 3558. <https://doi.org/10.3390/w12123558>
- Posavec, K., Bačani, A., & Nakić, Z. (2006). A Visual Basic spreadsheet macro for estimating groundwater recharge. *Ground Water*, 44(5), 764–767. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x>.
- Samela, C., Albano, R., Sole, A., & Manfreda, S. (2018). A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.01.013>
- Sarah, S., Shah, W., Somers, L., Deshpande, R. D., & Ahmed, S. (2024). Saturated hydraulic conductivity (Ksat) and topographic controls on base flow contribution in high-altitude aquifers with complex geology. *Journal of Hydrology*, 647, Article 131763. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131763>
- Smakhtin, V. U. (2001). Estimating continuous monthly base flow and groundwater recharge from streamflow records: A comparison of techniques. *Water SA*, 27(2), 183–191. <http://doi.org/10.4314/wsa.v27i2.4995>
- Strahler, A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In *Handbook of applied hydrology*.
- Talaksen, L. M. (1995). A review of base flow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1–4), 349–370. [https://doi.org/10.1016/00221694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/00221694(94)02540-R)
- Trenberth, K. E. (2005). The impact of climate change and variability on the hydrological cycle and water resources. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 17, 1–11. <http://doi.org/10.1002/0470848944.hsa211>
- Voesenek, L. A., & Bailey-Serres, J. (2015). Flood adaptive traits and processes: An overview. *New Phytologist*, 206(1), 57–73. <https://doi.org/10.1111/nph.13209>
- Wang, C. Y., & Manga, M. (2010). Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*, 10(1–2), 206–216. <http://doi.org/10.1111/j.14688123.2009.00270.x>

Investigation of Land Use Changes in the Salehiyeh Wetland Basin Using Landsat Satellite Data

Mahdiye Shaker¹ , Hadi Eskandari Damaneh² , Hassan Khosravi^{1*} 

1. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

* Corresponding author: hakhosravi@ut.ac.ir

(Received: 29 April 2025

Revised: 28 Jun 2025

Accepted: 13 July 2025)

Extended Abstract

Introduction: Wetlands are among the most ecologically significant yet vulnerable ecosystems, playing a pivotal role in biodiversity conservation, water regulation, and climate stabilization. However, these ecosystems are increasingly threatened by both anthropogenic pressures and climate change, leading to widespread degradation. According to global assessments, more than 50% of wetlands have been lost since the early 20th century. This alarming trend underscores the urgent need for effective monitoring and management strategies, particularly in semi-arid regions where wetlands are critical for maintaining environmental balance. The Salehiyeh Wetland, located in Alborz Province, Iran, has experienced substantial environmental changes over recent decades, largely attributed to human interventions such as the construction of drainage systems. This study aims to investigate land use/land cover (LULC) changes in the Salehiyeh Wetland between 1988 and 2021 (1367–1400 in the Iranian calendar) by employing satellite remote sensing data, Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) indices, and the Random Forest (RF) machine learning algorithm.

Materials and Methods: This research utilized Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI/TIRS imagery to analyze temporal variations in land cover within the wetland and its surrounding areas. The satellite data underwent standard preprocessing, including geometric and radiometric corrections, to ensure optimal data quality. To quantify water bodies and vegetation cover, the NDWI and NDVI were computed. These indices were employed to distinguish between water surfaces and vegetation, providing critical insights into the wetland's hydrological and ecological dynamics. For land cover classification, the RF algorithm was applied, a robust and widely-used machine learning technique known for its high classification accuracy and ability to handle large, multidimensional datasets. The classification results were evaluated using traditional accuracy assessment metrics, including Overall Accuracy (OA) and Kappa Coefficient (Kappa), which are standard indicators for the reliability of remote sensing-based classifications.

Results and Discussion: The analysis of NDWI revealed that the highest water extent in the study area occurred in 1988, with a peak NDWI value of 0.64, indicating a substantial water coverage. However, over the 42-year period, a marked decline in aquatic areas was observed. Specifically, the extent of water bodies decreased from 2.64% of the total land area in 1988 to 0.05% in 2021, signifying a dramatic reduction in wetland habitats. In terms of land cover dynamics, rangelands predominated the landscape in 1988, 1998, and 2008, occupying over 49% of the study area. However, this trend reversed significantly by 2021, as large portions of rangeland were converted into agricultural lands. By 2021, agricultural areas expanded to cover 2,817.84 km², accounting for over 45% of the total area, marking a clear transition towards more intensive land use. Urbanization and the expansion of built-up areas also showed a significant upward trend. From 1988 to 2021, urban and residential areas increased from 46.25 km² to 770.21 km², reflecting growing human encroachment on natural ecosystems. This expansion further exacerbates the pressures on the wetland, as urban sprawl often leads to the drainage of surrounding water bodies. The performance of the RF classifier was exemplary, with overall classification accuracy exceeding 93%, and the Kappa coefficient exceeding 0.90, confirming the high reliability of the model for accurately detecting long-term LULC changes in the region.

Conclusion: This study provides compelling evidence of the profound environmental transformations occurring in the Salehiyeh Wetland over the past four decades. The construction of drainage systems, agricultural intensification, and urban sprawl have all contributed to the drastic reduction of natural water bodies and rangelands. The integration of satellite remote sensing data with advanced machine learning techniques, such as the RF algorithm, offers a highly effective framework for monitoring LULC changes over time. The high accuracy of the results highlights the potential of these methodologies for large-scale environmental monitoring and decision-making. Given the ecological importance of wetlands, it is imperative that policymakers adopt comprehensive conservation and restoration strategies to mitigate further degradation. A balanced approach that integrates urban development, agricultural needs, and ecological preservation is crucial for ensuring the long-term sustainability of wetland ecosystems. Continuous remote sensing monitoring should be prioritized to support evidence-based decision-making and adaptive management in the face of ongoing environmental challenges.

Keywords: Kappa coefficient, water table, MNDWI, NDVI, wetland

Citation: Shaker, M., Eskandari Damaneh, H., & Khosravi, H. (2026). Investigation of Land Use Changes in the Salehiyeh Wetland Basin Using Landsat Satellite Data. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 61-84. doi: 10.22034/iwm.2025.2058563.1222

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 تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست

مهديه شاکر^۱، هادی اسکندری دامنه^۲، حسن خسروی^{*۱}

۱. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۲. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: hakhosravi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

چکیده مبسوط

مقدمه: تالاب‌ها از نظر بوم‌شناختی جزو بااهمیت‌ترین و درعین‌حال آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌ها به شمار می‌روند. این اکوسیستم‌ها نقش اساسی در حفاظت از تنوع زیستی، تنظیم منابع آبی و تثبیت اقلیم ایفا می‌کنند. با این حال، این منابع طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در معرض تهدید ناشی از فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی قرار دارند و همین امر منجر به تخریب گسترده آن‌ها شده است. بر اساس ارزیابی‌های جهانی، بیش از ۵۰ درصد تالاب‌های جهان از اوایل قرن بیستم تاکنون از بین رفته‌اند. این روند نگران‌کننده، ضرورت توسعه راهبردهای مؤثر برای پایش و مدیریت تالاب‌ها را - به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک که تالاب‌ها نقشی حیاتی در حفظ تعادل زیست‌محیطی دارند - دوچندان می‌کند. تالاب صالحیه واقع در استان البرز ایران طی دهه‌های اخیر دچار تغییرات زیست‌محیطی گسترده‌ای شده است که بخش عمده‌ای از آن به مداخلات انسانی از جمله احداث زهکش‌ها نسبت داده می‌شود. هدف این مطالعه بررسی تغییرات کاربری و پوشش اراضی (LULC) در تالاب صالحیه طی بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ شمسی (معادل ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۱ میلادی) با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای، شاخص‌های NDVI و NDWI و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Random Forest) است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (TM) و لندست ۸ (OLI/TIRS) برای تحلیل تغییرات زمانی در پوشش اراضی تالاب و نواحی پیرامونی آن استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای پس از دریافت، تحت پردازش‌های اولیه شامل تصحیح هندسی و رادیومتریک قرار گرفتند تا کیفیت اطلاعات بهینه شود. به‌منظور استخراج اطلاعات درباره پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی، شاخص نرمال‌شده تفاوت آب (NDWI) و شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) محاسبه شد. این شاخص‌ها در تفکیک مؤثر بین آب، پوشش گیاهی و سایر کاربری‌ها بسیار مفید بودند و درک بهتری از پویایی‌های هیدرولوژیکی و بوم‌شناختی منطقه فراهم کردند. طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد؛ این الگوریتم یادگیری ماشین با دقت طبقه‌بندی بالا و توانایی پردازش داده‌های بزرگ و چندبعدی، یکی از روش‌های پرکاربرد در سنجنش‌ازدور محسوب می‌شود. برای ارزیابی عملکرد طبقه‌بندی، از شاخص‌های رایج دقت کلی (Overall Accuracy) و ضریب کاپا (Kappa Coefficient) استفاده شد که معیارهای استاندارد سنجنش دقت طبقه‌بندی در مطالعات سنجنش‌ازدور هستند.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از تحلیل شاخص NDWI نشان داد که در سال ۱۳۶۷ بیشترین میزان این شاخص (حداکثر ۰/۶۴) و وسیع‌ترین سطح پوشش آبی در منطقه وجود داشته است. با گذر زمان و به‌ویژه پس از احداث زهکش، مساحت پهنه‌های آبی از جمله تالاب صالحیه با روندی کاهشی مواجه شد. بر این اساس، سهم اراضی آبی از کل منطقه از ۲/۶۴ درصد در سال ۱۳۶۷ به ۰/۰۵ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است. در خصوص کاربری اراضی، بررسی‌ها نشان داد که در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۷، بیشترین مساحت به اراضی مرتعی اختصاص داشته که بیش از ۴۹ درصد از کل منطقه را در بر می‌گرفت. اما در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ این روند معکوس شده و اراضی کشاورزی جایگزین مراتع شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در سال ۱۴۰۰، مساحت اراضی کشاورزی به حدود ۲۸۱۷/۸۴ کیلومترمربع معادل بیش از ۴۵ درصد از کل منطقه رسیده است. رشد نواحی مسکونی نیز یکی دیگر از روندهای بارز مشاهده شده بود. این اراضی از ۴۶/۲۵ کیلومترمربع در سال ۱۳۶۷ به ۷۷۰/۲۱ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۰ افزایش یافتند. این موضوع حاکی از فشار فزاینده انسانی و توسعه‌طلبی شهری بر منابع طبیعی منطقه است. همچنین دقت کلی نقشه‌های طبقه‌بندی شده بالای ۹۳ درصد و ضریب کاپا بیش از ۰/۹۰ بود که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای الگوریتم جنگل تصادفی در تحلیل تغییرات کاربری اراضی است.

نتیجه‌گیری: این مطالعه شواهد روشنی از تغییرات گسترده زیست‌محیطی در تالاب صالحیه طی چهار دهه گذشته ارائه می‌دهد. احداث زهکش‌ها، تشدید فعالیت‌های کشاورزی و گسترش شهری از عوامل اصلی کاهش چشمگیر منابع آبی طبیعی و مراتع به شمار می‌روند. ادغام داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای با تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین نظیر الگوریتم جنگل تصادفی، چارچوبی کارآمد برای پایش تغییرات کاربری و پوشش اراضی در طول زمان فراهم می‌کند. با توجه به اهمیت تالاب‌ها، لازم است سیاست‌گذاران راهبردهای جامع حفاظتی و احیایی را به‌منظور جلوگیری از تخریب بیشتر اتخاذ کنند. دستیابی به توسعه پایدار در گرو رویکردی متوازن میان توسعه شهری، نیازهای کشاورزی و حفظ منابع طبیعی است. همچنین، پایش مستمر با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور باید به‌عنوان اولویت در برنامه‌های مدیریتی لحاظ شود تا امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و مدیریت تطبیقی در برابر چالش‌های زیست‌محیطی فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: ضریب کاپا، بستر آبی، NDVI، MNDWI، تالاب

استناد: شاکر، م.، اسکندری، دامنه، هـ و خسروی، ح. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز. ۱(۱)، ۶۱-۸۴.

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

تالاب‌ها ۶/۵ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند، با این حال خدمات اکوسیستمی به ارزش ۴۷/۴ تریلیون دلار در سال ارائه می‌دهند (Abdullah *et al.*, 2024) و تقریباً ۱۲ درصد از کربن جهانی در مناطق تالابی ذخیره می‌شود (IPCC, 2019). کنوانسیون رامسر تالاب‌ها را به عنوان "مناطق باتلاقی، مرداب، چه طبیعی و چه مصنوعی، دائمی یا موقت، با آب ساکن یا جاری، شیرین، لب‌شور یا شور، از جمله مناطقی از آب‌های دریایی که عمق آنها در جزر و مد از شش متر تجاوز نمی‌کند تعریف می‌کند. اکوسیستم تالاب در کنار اکوسیستم‌های جنگلی و دریایی جزو سه اکوسیستم اصلی روی زمین است که نقش به‌سزایی در حفظ تعادل اکولوژیکی، حفظ تنوع زیستی، حفظ آب، ذخیره سیل و جلوگیری از خشکسالی، تنظیم آب‌وهوا و تخریب آلودگی دارند (Sulman *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2023). اما به دلیل تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر از سطح مرطوب آن‌ها کاسته شده است که می‌تواند به‌عنوان یکی از کانون‌های گردوغبار محسوب شود. بر اساس اطلاعات منتشر شده، از سال ۱۹۰۰ میلادی تا کنون، جهان ۵۰ درصد از تالاب‌های خود را از دست داده است. این بررسی از ۱۸۹ گزارش تغییر در مساحت تالاب‌ها نشان می‌دهد که میانگین از دست رفتن طولانی‌مدت تالاب‌های طبیعی گزارش شده بین ۵۴ تا ۵۷ درصد است، اما از سال ۱۷۰۰ میلادی ممکن است تا ۸۷ درصد نیز رسیده باشد. در طول قرن بیستم و اوایل قرن بیست و یکم، سرعت از بین رفتن تالاب‌ها بسیار بیشتر (۳/۷ برابر) بوده است (Davidson, 2014). به طوری که از سال ۱۹۰۰ میلادی، ۶۴ تا ۷۱ درصد از تالاب‌ها از بین رفته‌اند. این میزان از دست رفتن تالاب‌ها در مناطق داخلی بیشتر و سریع‌تر از تالاب‌های طبیعی ساحلی بوده است. اگرچه سرعت از دست رفتن تالاب‌ها در اروپا کاهش یافته است و در آمریکای شمالی از دهه ۱۹۸۰ پایین مانده است، اما این سرعت در آسیا، جایی

که تبدیل سریع و گسترده تالاب‌های طبیعی ساحلی و داخلی ادامه دارد، همچنان بالا بوده است (Ramsar Convention on Wetlands, 2018).

از بین رفتن گسترده تالاب‌ها نه تنها منجر به ناپدید شدن زیستگاه‌ها و محل‌های تولیدمثل بسیاری از گونه‌ها شده است، بلکه نقش آنها را در حفاظت از سواحل، تنظیم آب و خاک و تصفیه آلودگی نیز کاهش داده است (Elmore *et al.*, 2023). این امر باعث ایجاد مجموعه‌ای از مسائل زیست‌محیطی، از جمله بیابان‌زایی، سیل، کاهش کیفیت آب و از بین رفتن تنوع زیستی شده است (Wang *et al.*, 2022; Karnatak *et al.*, 2022). در این بین تالاب‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، با اهمیت‌ترین نوع تالاب در جهان هستند که نقشی بی‌بدیل در تأمین آب‌های زیرزمینی و حفظ تنوع گونه‌ای دارند. با این حال، این مناطق توسط عوامل طبیعی و عوامل انسانی در سال‌های اخیر مورد تهدید قرار گرفته‌اند (Zhao *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2019). معمولاً از بین رفتن تالاب‌ها غیرقابل برگشت است و عوامل زیادی مانند سکونت‌گاه‌های انسانی، تحولات، پیشرفت اقتصادی و تغییرات اقلیمی مستقیماً بر دگرگونی تالاب‌ها تأثیر می‌گذارند که این امر به شدت به موقعیت‌ها و محیط‌های محلی وابسته است (Rebelo *et al.*, 2009; Rebelo *et al.*, 2019).

در مارس ۲۰۲۴، ۱۹۰ کشور در ششمین مجمع محیط زیست سازمان ملل متحد (Deslippe *et al.*, 2025) با مجموعه‌ای از قطعنامه‌ها برای بهبود کیفیت و کمیت آب از طریق احیا و حفاظت از تالاب‌ها موافقت کردند. به همین ترتیب، احیای تالاب‌ها یک استراتژی کلیدی برای دستیابی به اهداف متعدد سیاستی در جهت توسعه پایدار، از جمله امنیت آب و غذا، کاهش تغییرات اقلیمی و حمایت از سلامت انسان است (Tomscha *et al.*, 2023; Goyette *et al.*, 2023). برای مدیریت پایدار تالاب‌ها، تهیه نقشه تالاب‌های موجود و طبقه‌بندی آن‌ها برای مطالعه بیشتر و ایمن نگه‌داشتن

(Eskandari *et al.*, 2025). تجزیه و تحلیل، تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات می‌تواند منجر به قضاوت واقعی در شیوه‌های استفاده از کاربری و پوشش زمین شود (Ahmad, 2012). تشخیص تغییرات LULC شامل اطلاعات چندزمانی است که از طریق داده‌های سنجنش از دور و همچنین داده‌های مکانی حاصل از سیستم اطلاعات جغرافیایی به دست آمده در شناسایی تغییرات گذشته و حال هر پدیده یا اشیا می‌باشد و بنابراین به تعیین کمی تغییرات مرتبط با LULC کمک خواهد کرد (Zoran & Anderson, 2006; Othman *et al.*, 2014). مطالعه تغییرات LULC، اطلاعاتی از قبیل محل تغییرات، روند تغییرات، نوع تبدیل کاربری‌ها، سرعت تغییرات و علل و نیروهای محرک این تغییرات را نشان می‌دهد (Jamal & Ahmad, 2020). مطالعات مختلف با استفاده از اطلاعات به دست آمده از داده‌های سنجنش از دوری مخصوصاً داده‌های ماهواره لندست روند تغییرات پوشش سطح زمین را مورد بررسی قرار داده‌اند. Moisa و همکاران (۲۰۲۳) تلاش کردند تا پویایی تالاب حوزه آبخیز اتیوپی غربی را با استفاده از تکنیک‌های مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که اکوسیستم تالاب در منطقه، روندی کاهشی داشته به طوری که (۸/۸ درصد) با نرخ ۴/۲ کیلومتر مربع در سال کاهش یافته است (Moisa *et al.*, 2023). Peters و Kusimi (۲۰۲۳) به بررسی LULC با استفاده از داده‌های ماهواره لندست در سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۸ پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که یک الگوی تغییر در انواع عمده LULC وجود داشته است. تالاب‌ها در این طبقه‌بندی از ۱۸۲/۳۳ کیلومتر مربع به ۱۳۵/۱۱ کیلومتر مربع کاهش یافتند. مطالعات متعددی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش اراضی و پهنه‌های آبی تالاب‌های کشور با استفاده از شاخص‌های سنجنش از دور پرداخته‌اند. Feyzolahpour و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با استفاده از شاخص‌های NDBI و ENDBI

اکوسیستم برای نسل‌های آینده بسیار مهم است. در طول پنج دهه گذشته، سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزارهای ضروری در نقشه‌برداری، ارزیابی و پایش اطلاعات فضایی در مورد منابع طبیعی، از جمله اکوسیستم‌های آبی ظاهر شده‌اند (Singh *et al.*, 2024). حسگرهای مختلف در سنجنش از دور اطلاعات فراوانی را ذخیره می‌کنند و اطلاعات به دست آمده از این حسگرها به طور گسترده در نقشه‌برداری، بررسی تغییرات مکانی-زمانی اکوسیستم‌های تالاب استفاده می‌شوند (Park *et al.*, 2003). با این حال، اطلاعات دقیق در مورد پویایی تالاب برای طراحی استراتژی‌های حفاظت و مدیریت تالاب نامشخص است. داده‌های ماهواره لندست از جمله داده‌هایی هستند که برای برآورد تغییرات سطح زمین به خصوص پهنه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Van Deventer *et al.*, 2022). مطالعات نشان داده است که داده‌های ماهواره لندست از دقت مناسبی برخوردارند. از جمله موارد برتری این داده‌ها، دقت مکانی مناسب نسبت به سنجنده مودیس و همچنین بازه زمانی طولانی مدت نسبت به داده‌های ماهواره سنتینل می‌باشد (Zhang *et al.*, 2024).

تجزیه و تحلیل تغییرات در کلاس‌های کاربری و پوشش اراضی^۱ (LULC) حاصل از داده‌های سنجنش از دوری یک تکنیک مفید برای پایش تالاب‌ها، کیفیت محیطی و اکولوژیکی با مقیاس‌های فضایی-زمانی مختلف است (Kafy *et al.*, 2020). تغییرات کاربری و پوشش زمین ترکیبی از دو اصطلاح کاربری زمین-پوشش زمین است که مستلزم طبقه‌بندی سطح زمین به گروه‌های بسیاری بسته به اشکال متعدد پوشش زمین مانند جنگل‌ها، کشاورزی، مناطق شهری، بدنه‌های آبی و غیره است (Sawant *et al.*, 2023). بررسی روند تغییرات LULC معمولاً الگوهای تغییرات مکانی-زمانی در کاربری و پوشش زمین را نشان می‌دهد که می‌تواند در بهره‌برداری و مدیریت صحیح منابع کمک کند

۲۰۲۰ و ابتدای ۲۰۲۱، به دلیل تأمین آب از رودخانه جراحی و مخازن بالادست، وسعت تالاب به بیشترین حد خود در این بازه رسید.

تالاب صالحیه به‌عنوان یکی از تالاب‌های مهم در محدوده بین دو استان قزوین و استان البرز، در محدوده‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته که نقش حیاتی در حفظ تعادل آبی، تغذیه سفره‌های زیرزمینی، کنترل گردوغبار و حفظ تنوع زیستی منطقه ایفا می‌کند. با این حال، طی دو دهه اخیر این تالاب به‌دلیل عواملی همچون احداث زهکش، توسعه اراضی کشاورزی، افزایش جمعیت و کاهش بارندگی به‌شدت آسیب دیده و پهنه آبی آن تقریباً به‌طور کامل کاهش یافته است.

تاکنون اغلب مطالعات تالاب‌های ایران بر تالاب‌های ثبت‌شده در کنوانسیون رامسر (همچون گاوخونی، انزلی، هامون) متمرکز بوده‌اند، اما تالاب صالحیه علی‌رغم اهمیت محلی و منطقه‌ای آن، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو انتخاب این منطقه برای مطالعه، پاسخی به خلأ علمی موجود و گامی در جهت ارزیابی جامع تأثیر مداخلات انسانی (به‌ویژه زهکشی) و تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های حساس داخلی است. از این رو در این پژوهش، به بررسی روند تغییرات کاربری تالاب صالحیه با استفاده از مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی، قبل از احداث زهکش (۱۳۸۶-۱۳۷۶) و پس از احداث زهکش (۱۴۰۰-۱۳۸۷) با استفاده از شاخص‌های کمکی NDWI و NDVI حاصل از تصاویر لندست ۵ و ۸ پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

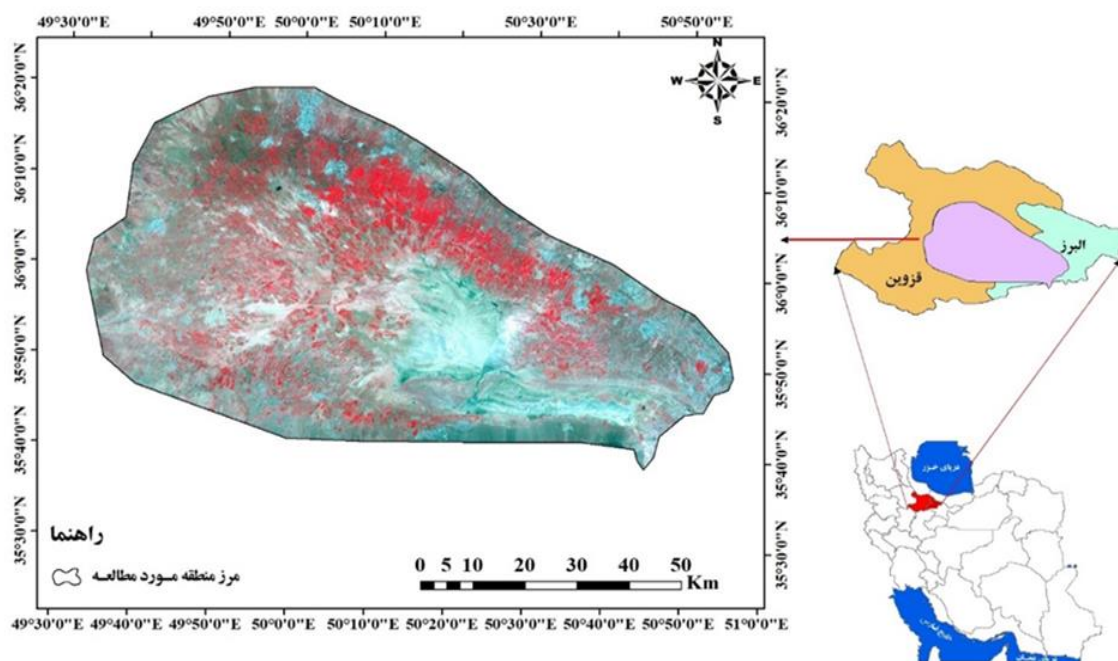
منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از دو استان البرز و قزوین است. تالاب صالحیه واقع در جنوب روستای صالحیه در نظرآباد استان البرز تنها تالاب این استان است. عرض جغرافیایی این منطقه بین $35^{\circ}30'$ تا $36^{\circ}20'$ شمالی و طول جغرافیایی آن بین $49^{\circ}30'$

به این نتیجه رسیدند که روند گسترش مناطق ساخته‌شده در حوزه تالاب انزلی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، در همین راستا شاخص NDVI از ۰/۶۷ در سال ۱۳۷۱ به ۰/۵۹ در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته و شاخص NDWI نیز از ۰/۳۴ به ۰/۱۰ رسیده است که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر پوشش گیاهی و منابع آبی است. به‌علاوه، بر اساس مدل RTC، وسعت پهنه آبی از ۴۴/۱۷ کیلومترمربع در سال ۱۳۷۱ به ۶/۳۶ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر، Golafarin و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل درخت تصمیم و تصاویر ماهواره‌ای به بررسی پویایی زمانی و مکانی پوشش اراضی تالاب پریشان پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶، از مجموع ۱۹۶۳ هکتار مساحت اولیه پهنه آبی تالاب، تنها ۱۳ هکتار در پایان دوره باقی مانده است. مقایسه سال‌های مختلف نشان می‌دهد که نسبت به سال ۱۳۶۶، حدود ۱۹۵۰ هکتار، نسبت به ۱۳۷۷ حدود ۳۶۰۵ هکتار و نسبت به ۱۳۸۶ حدود ۲۲۷۲ هکتار از سطح آبی کاسته شده است.

Soltani و همکاران (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از شاخص‌های MNDWI، AWEI و WRI به تحلیل تغییرات پهنه‌های آبی دریاچه فصلی جازموریان پرداختند. یافته‌ها نشان داد که میزان آگیری پلاهای جازموریان ارتباط مستقیمی با بارش‌های فصلی و سیلاب‌ها دارد. ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.89$) میان بارش سالانه و وسعت پهنه‌های آبی بر پایه شاخص MNDWI نشان‌دهنده تأثیر اصلی بارندگی بر پایداری اکوسیستم آبی این منطقه است. Seyed Mousavi و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی تغییرات درون‌سالی و بین‌سالی پهنه‌های آبی تالاب بین‌المللی شادگان در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ با استفاده از سامانه Google Earth Engine و شاخص MNDWI پرداختند. نتایج این تحلیل مکانی-زمانی نشان داد که در این دوره، روندی نزولی در وسعت پهنه‌های آبی تالاب مشاهده شده است. با این حال، در انتهای سال

قزوین شناخته می‌شود. دمای میانگین سالانه آن حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد است که براساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است. ارتفاع محدوده از ۱۰۶۹ تا ۱۱۳۵ متر از سطح دریا متغیر بوده و از نظر تقسیمات حوضه‌های آبریز کشور، در حوضه آبریز فلات مرکزی و زیرحوضه دریاچه نمک و رودخانه شور قرار دارد (Eskandari et al., 2025). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در دو استان البرز و قزوین نشان می‌دهد.

۵۰°۵۰' شرقی است و این تالاب از رودخانه‌های ابهرود، خررود و تعدادی مسیل بزرگ و کوچک تغذیه می‌شود. ازجمله مهم‌ترین رودخانه‌های جاری در منطقه می‌توان به ابهرود، خررود، شور، فشند و کردان اشاره کرد (Doroudi, 2018). بخش عمده‌ای از مساحت تالاب در استان قزوین واقع شده و بیشتر با نام‌های الله‌آباد و شوره‌زار مرکزی دشت قزوین شناخته می‌شود. بیشتر مساحت تالاب در استان قزوین قرار گرفته که بیشتر با نام الله‌آباد و شوره‌زار مرکزی دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در دو استان البرز و قزوین
Figure 1- Location of the study area in Alborz and Qazvin provinces

(Landsat 8) از وب‌سایت^۱ USGS و با سطح پردازش Level-1TP تهیه شدند. مشخصات این تصاویر در جدول ۱ آمده است. با توجه به سطح پردازش-Level-1TP، تصحیح‌های هندسی و رادیومتریک اولیه به صورت پیش‌فرض توسط USGS انجام شده‌اند و نیازی به اعمال مجدد آن‌ها نبوده است. در این سطح، موقعیت مکانی تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی

روش تحقیق

داده‌های ماهواره‌ای و پردازش‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰، از تصاویر ماهواره‌ای لندست با فواصل زمانی ۱۰ ساله استفاده شد. ابزارهای مورد استفاده شامل نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، ArcGIS Pro 3.1، ENVI 5.3 و Excel بوده‌اند. تصاویر مربوط به سنجنده‌های TM (Landsat 5) و OLI

1 earthexplorer.usgs.gov

سنجنده‌های ۵ و ۸ در ماهواره لندست استفاده شده است. داده‌های NDVI و NDWI برای هر تصویر، پس از تصحیح‌های اتمسفریک، در محیط نرم‌افزار ENVI5.3 استخراج گردیدند و به‌عنوان ورودی کمکی در فرآیند طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات تصاویر استفاده‌شده

Table 1- Images specifications

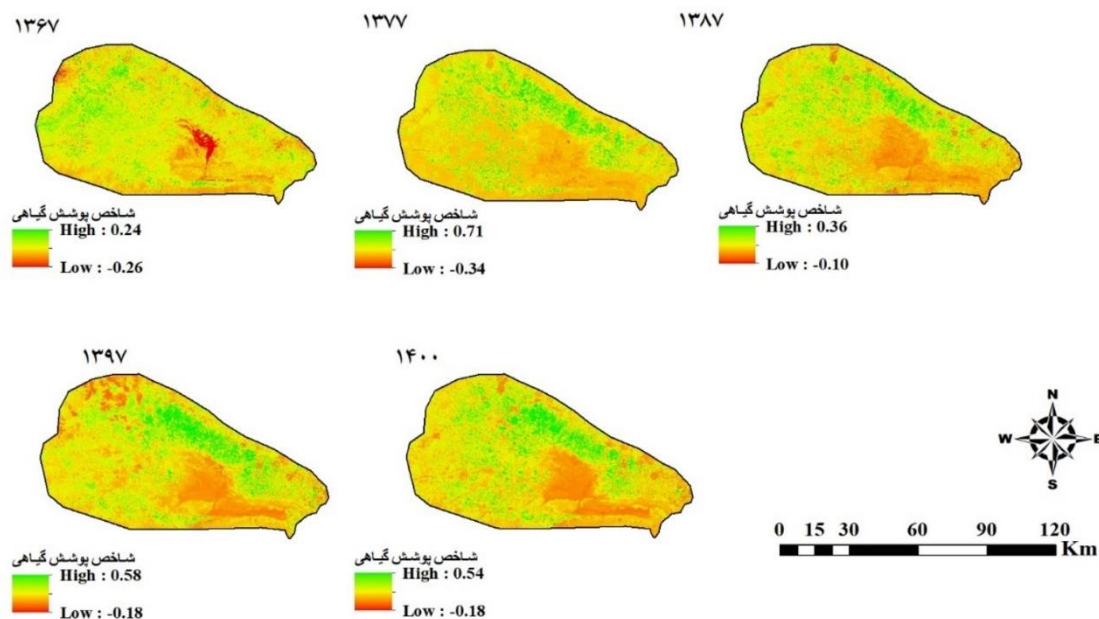
خطای زمین مرجع (متر)	درصد ابرناسی	ماهواره	تاریخ میلادی
±12.5	10<	لندست 5	1989.03.13
± 12.5	10<	لندست 5	1999.03.09
± 12.5	10<	لندست 5	2009.02.16
±12	10<	لندست 8	2019.03.16
±12	10<	لندست 8	2022.04.01

جدول ۲- جزئیات کاربری‌های موردنظر

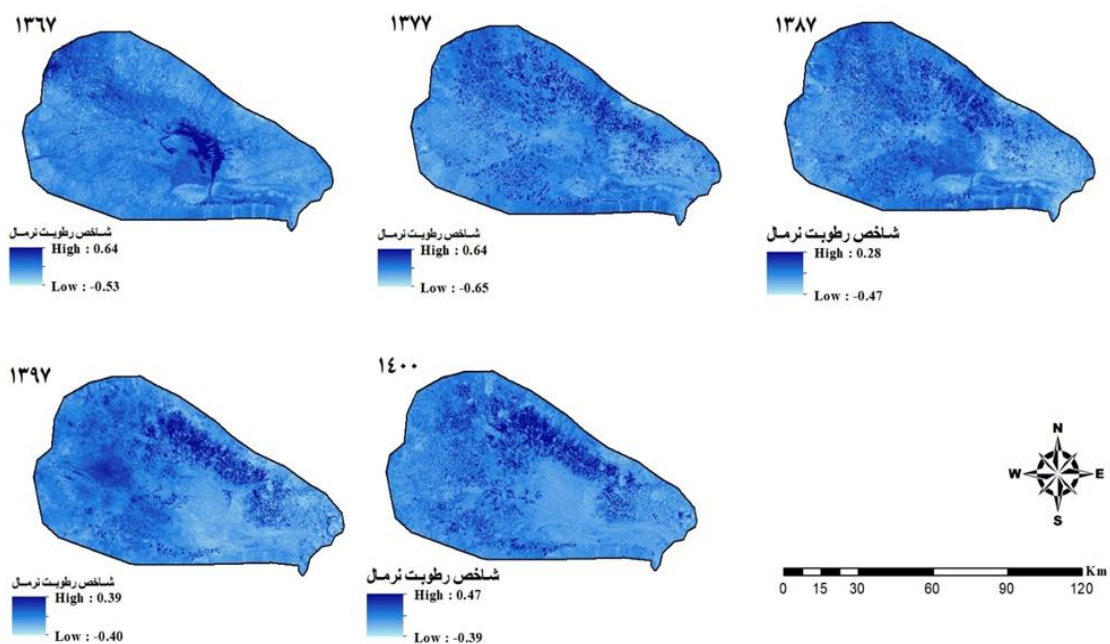
Table 2- Details of the selected land uses

توضیحات	کاربری اراضی
تالاب، اراضی مرطوب حاشیه تالاب، زهکش‌ها، رودها	بسترهای آبی
مناطق مسکونی، تجاری، شبکه‌های حمل‌ونقل مانند جاده‌ها و شبکه ریلی	مناطق مسکونی و انسان‌ساخت
پوشش گیاهی متراکم، اراضی کشاورزی، باغی، زراعی	پوشش گیاهی
مراتع، اراضی با پوشش گیاهی پراکنده، پوشش ضعیف، پوشش ناچیز	اراضی مرتعی
اراضی شور، ماسه‌زارها، اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی	اراضی شور و بایر

(DEM) و نقاط کنترل زمینی (GCP) تنظیم شده است. با این حال، برای دستیابی به بازتاب سطحی دقیق، تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. این الگوریتم، بر پایه مدل MODTRAN، اثرات جوی از جمله بخار آب، ذرات معلق و گازهای اتمسفری را کاهش داده و بازتاب واقعی سطح زمین را تخمین می‌زند. پس از اعمال پیش‌پردازش‌های لازم، نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ با استفاده از روش یادگیری ماشین، جنگل تصادفی در نرم‌افزار ArcGIS Pro3 تهیه شد (جدول ۲). در این پژوهش، برای تحلیل پوشش گیاهی و شناسایی پهنه‌های آبی، از شاخص‌های نرمال‌شده NDVI^۱ و NDWI^۲ استفاده شد. شاخص NDVI که توسط Tucker و همکاران (۱۹۸۶) معرفی شده است، تفاوت بازتاب طیفی بین باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز را نسبت به مجموع آن‌ها محاسبه می‌کند و در بازه عددی بین منفی یک تا مثبت یک قرار دارد (شکل ۲). مقادیر مثبت بالا معمولاً نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و فعال هستند. از سوی دیگر، شاخص NDWI برای شناسایی نواحی آبی به کار می‌رود و بر اساس اختلاف بین بازتاب باند سبز و باند مادون قرمز نزدیک نسبت به مجموع آن‌ها محاسبه می‌شود (Gao et al., 1996). این شاخص نیز در بازه ۱- تا +۱ قرار داشته و مقادیر مثبت آن معمولاً بیانگر وجود آب یا رطوبت بالا در سطح زمین هستند (شکل ۳). در محاسبه این شاخص‌ها، از باندهای استاندارد



شکل ۲- شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 2- Normalized difference vegetation index (NDVI) from 1988 to 2021



شکل ۳- شاخص رطوبت نرمال (NDWI) در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 3- Normalized Difference Water Index (NDWI) from 1988 to 2021

ناپارامتریک مناسب برای مدل‌سازی داده‌های پیوسته و گسسته روش درخت تصمیم است (Seyedian *et al.*, 2017). الگوریتم جنگل تصادفی از روش تجمیع تصادفی با جایگزینی (Bootstrap Aggregating) یا

جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک نوع مدرن از روش‌های درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیونی می‌باشد. همچنین یکی از روش‌های

که در آن M مجموع مجذور خطاهای درخت تصمیم است. h_u مقدار خروجی نمونه u در مجموعه داده است. h_v مقدار پیش‌بینی شده گره برگ پایانی درخت تصمیم است. برای k مجموعه آموزشی، k درخت تصمیم تشکیل می‌شود و نتیجه T با میانگین‌گیری نتایج $(T_1, T_2 \dots T_k)$ درخت‌های تصمیم (همه درخت‌های تصمیم به یک اندازه مهم هستند) به صورت زیر در رابطه ۴ ادغام می‌شود (Zhou et al., 2023).

$$T = \frac{1}{k} \sum (T_1 + T_2 + \dots + T_k) \quad (4)$$

ارزیابی صحت

پس از پایان مرحله طبقه‌بندی، نتایج طبقه‌بندی با استفاده از معیارهای تعیین صحت، به صورت کمی برآورد شد. برای ارزیابی دقت و صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده، با تطبیق دادن نقشه‌های طبقه‌بندی شده با نقشه‌ی واقعیت زمینی، ماتریس خطا^۱ تشکیل می‌شود و بر اساس آن، دقت کلی^۲، ضریب کاپا^۳، دقت کاربر^۴ و صحت تولیدکننده^۵ محاسبه می‌گردد (Kafy et al., 2021). به منظور تهیه داده‌های تعلیمی (Training Samples) جهت الگوریتم جنگل تصادفی، از ترکیبی از منابع زیر استفاده شد:

بازدید میدانی و GPS سال‌های اخیر (برای سال ۱۴۰۰): در این سال، نقاط نمونه از طریق بازدید میدانی و جمع‌آوری داده‌های زمینی برداشت شدند. این داده‌ها با استفاده از تصاویر Google Earth و داده‌های مکانی محلی کنترل و تکمیل شدند.

استفاده از تصاویر Google Earth در گذشته: برای سال‌های گذشته که دسترسی به بازدید میدانی وجود نداشت، از تصاویر تاریخی Google Earth با دقت مکانی بالا بهره گرفته شد. تصاویر مرجع از همان فصل سال (اسفند تا فروردین) انتخاب شده‌اند تا با تصاویر ماهواره‌ای هم‌زمان‌سازی شوند. برای هر سال، مجموعه داده‌های تعلیمی (Training) و داده‌های ارزیابی

(Bagging) استفاده می‌کند، به این صورت که چندین زیرمجموعه تصادفی از داده‌های آموزشی با بازگرداندن نمونه‌ها انتخاب شده و برای هر کدام یک درخت تصمیم ساخته می‌شود. سپس نتایج همه درخت‌ها برای تصمیم‌گیری نهایی به صورت رای‌گیری اکثریت تجمیع می‌شود (Zhou et al., 2022). فرایند الگوریتم جنگل تصادفی از روش تجمیع تصادفی به شرح زیر است که از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید: k نمونه آموزشی به طور تصادفی از مجموعه نمونه اصلی حاوی n نمونه به روش بوت‌استرپینگ انتخاب می‌شوند و k مجموعه آموزشی جدید از طریق k بار نمونه‌برداری بدون هیچ‌گونه جایگزینی نمونه به دست می‌آید (k مجموعه‌های آموزشی مستقل از یکدیگر هستند و عناصر را می‌توان تکرار کرد). نسبت مجموعه آموزشی جدید حاوی نمونه‌هایی از مجموعه نمونه اصلی به شرح زیر است (Zhou et al., 2022).

(۱)

$$x = 1 - \left(1 - \frac{1}{k}\right)^n$$

زمانی که k در رابطه ۲ به بی‌نهایت میل کند:

(۲)

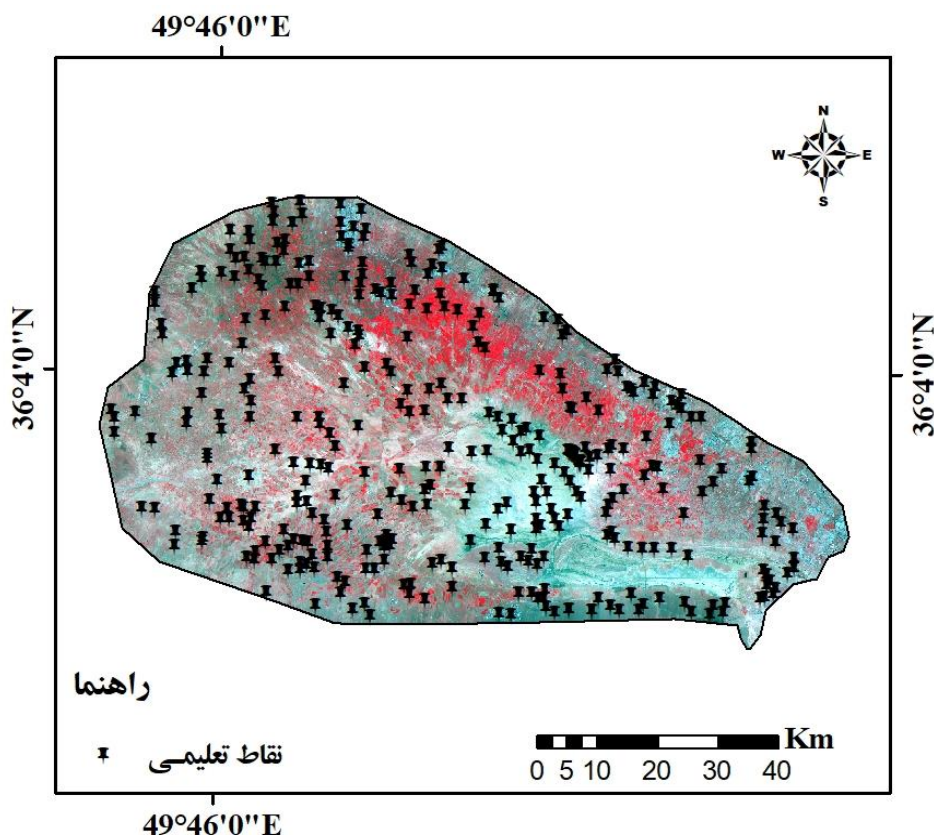
$$\lim_{k \rightarrow \infty} x = 1 - \lim_{k \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^k = 1 - e^{-1} \approx 0.632 = 63.2\%$$

نمونه‌هایی در مجموعه نمونه اصلی که در مجموعه آموزشی جدید وجود ندارند، پیش‌بینی‌کننده‌های خارجی نامیده می‌شوند که برای ارزیابی عملکرد درخت‌های تصمیم‌گیری تولیدشده توسط مجموعه آموزشی جدید استفاده می‌شوند. از رابطه ۳ برای ارزیابی شکل‌گیری درخت‌های تصمیم استفاده می‌شود.

$$M = \operatorname{argmin} \sum_{u \in U} \sum_{v \in V} (h_u - h_v)^2 \quad (3)$$

به صورت یکنواخت بین کلاس‌های مختلف کاربری توزیع گردید (شکل ۴).

(Validation) به صورت مجزا انتخاب شدند. در مجموع، ۵۰۰ نقطه نمونه تعلیمی برای طبقه‌بندی تهیه شد که



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۰ و نقاط تعلیمی استفاده شده

Figure 4- Land Use Map for 2021 and Training Points

کیفیت نمونه‌های تعلیمی و ارزیابی مناسب تلقی می‌شود. دقت تولیدکننده یعنی احتمال اینکه یک کلاس در تصویر کلاس‌بندی در همان کلاس در روی زمین قرار بگیرد و دقت کاربر یعنی احتمال اینکه یک کلاس مشخص در روی زمین در همان کلاس بر روی تصویر طبقه‌بندی شده قرار بگیرد که از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌گردند (Rasti et al., 2022).

$$PA = \frac{ta}{n1} \times 100 \quad (5)$$

$$UA = \frac{ta}{ga} \times 100 \quad (6)$$

که در این روابط PA درصد دقت کلاس a برای دقت تولیدکننده، ta تعداد پیکسل‌های صحیح

از این تعداد، ۷۰ درصد از نمونه‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی صحت مورد استفاده قرار گرفتند. در انتخاب نمونه‌ها، تلاش شد تا نقاط از سراسر منطقه مورد مطالعه و برای تمامی کلاس‌های کاربری به صورت یکنواخت و هدفمند انتخاب شوند. همچنین از روش نمونه‌برداری تصادفی^۱ طبقه‌بندی شده برای انتخاب نمونه‌ها استفاده شد. به دلیل محدودیت دسترسی به زمین در سال‌های گذشته، امکان برداشت میدانی برای آن سال‌ها فراهم نبود؛ بنابراین، تصاویر تاریخی Google Earth و اطلاعات جانبی به‌عنوان جایگزین معتبر در تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نتایج ارزیابی دقت بالای ۹۳ درصد،

1- Stratified Random Sampling

$$\text{LULC Change} = \frac{\text{Km}^2}{\text{year}} = \frac{\text{A2}-\text{A1}}{\text{Z}} \quad (9)$$

که در آن A1 و A2 مساحت LULC در کیلومتر مربع در زمان است و Z فاصله زمانی بین A1 و A2 در سال است.

نتایج

طبقه‌بندی شاخص NDWI

شاخص تفاوت نرمال شده نواحی آبی (NDWI) در این پژوهش برای سال‌های منتخب ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ با استفاده از روش Natural Breaks Classification به صورت طبقه‌بندی شده در قالب هفت کلاس رطوبتی استخراج گردید. این کلاس‌ها شامل بسیار خشک / بایر، خشک / بدون پوشش، خاک مرطوب / کشاورزی آبیاری شده، رطوبت کم، رطوبت متوسط، رطوبت زیاد و رطوبت خیلی زیاد می‌باشند. در سال ۱۳۶۷، مساحت کلاس خاک مرطوب بیش از ۱۹۲۰ کیلومتر مربع و کلاس رطوبت خیلی زیاد حدود ۹۸۴ کیلومتر مربع بوده است. در سال ۱۳۷۷، کلاس بسیار خشک / بایر بیشترین مساحت را با بیش از ۳۵۵۱ کیلومتر مربع به خود اختصاص داده است. در سال ۱۳۸۷، کلاس بسیار خشک با ۲۷۱۱ کیلومتر مربع و کلاس خاک مرطوب با حدود ۲ کیلومتر مربع گزارش شده است. در سال ۱۳۹۷، کلاس خاک مرطوب با ۱۵۲۱ کیلومتر مربع و کلاس رطوبت کم با ۱۵۲۵ کیلومتر مربع در صدر قرار داشته‌اند. در سال ۱۴۰۰، کلاس خاک مرطوب همچنان بزرگ‌ترین طبقه با مساحتی بالغ بر ۱۸۶۹ کیلومتر مربع بوده است (جدول ۴).

طبقه‌بندی شده به عنوان کلاس a، ga تعداد پیکسل‌های کلاس a در واقعیت زمینی، UA درصد دقت کلاس a برای دقت کاربر n1 تعداد پیکسل‌های کلاس a می‌باشد. از نظر تئوری احتمالات، دقت کل نمی‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی نتایج طبقه‌بندی باشد؛ زیرا در این شاخص نقش شانس قابل توجه است. دقت کلی از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها طبق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\text{OA} = \frac{1}{N} \times \sum P \quad (7)$$

در این رابطه OA برابر با دقت کلی N تعداد پیکسل‌های آزمایشی و $\sum P$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس می‌باشد. شاخص کاپا، پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی شده را مدنظر قرار می‌دهد و صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. شاخص کاپا با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{io} \times X_{oi})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{io} \times X_{oi})} \quad (8)$$

در این رابطه K شاخص کاپا، r تعداد ردیف ماتریس طبقه‌بندی شده، xii تعداد مشاهدات در ردیف ستون (محور اصلی ماتریس)، Xio مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر کاربری)، Xoi مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون برای هر کاربری) و N مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه‌بندی می‌باشد در محاسبه ضریب کاپا علاوه بر پیکسل‌هایی که درست طبقه‌بندی شده پیکسل‌های نادرست نیز دخالت داده می‌شود. در نتیجه معیاری مناسب برای مقایسه نتایج طبقه‌بندی مختلف می‌باشد (Rezaee et al., 2016).

ارزیابی درجه تغییرات

بعد از تهیه نقشه کاربری اراضی و صحت‌سنجی آن، ارزیابی درجه تغییرات انجام می‌شود. مقدار مساحت تغییر یافته، در واحد زمان با استفاده از (۹) تعیین می‌شود (Gessesse et al., 2017; Abebe et al., 2019; Moisa et al., 2022).

جدول ۴- توزیع مساحت طبقات شاخص NDWI در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های منتخب بر حسب کیلومتر مربع
Table 4 – Area distribution of NDWI classification in Salehiyeh wetland for selected years (Km²)

سال مورد بررسی					طبقه‌بندی شاخص NDWI
1400	1397	1387	1377	1367	
1491.315	559.682	2711.91	3551.306	705.957	بسیار خشک / بایر
358.605	942.868	1833.404	1507.461	2262.835	خشک / خاک بدون پوشش
1869.417	1521.897	2.288	0.791	1920.595	خاک مرطوب / کشاورزی آبیاری شده
1259.779	1525.21	1134.568	70.856	136.0359	رطوبت کم / پوشش گیاهی با رطوبت
542.976	934.306	22.929	609.548	45.524	رطوبت متوسط
366.824	481.063	317.94	285.528	89.537	رطوبت زیاد
256.376	180.2226	122.73	119.832	989.420	رطوبت خیلی زیاد

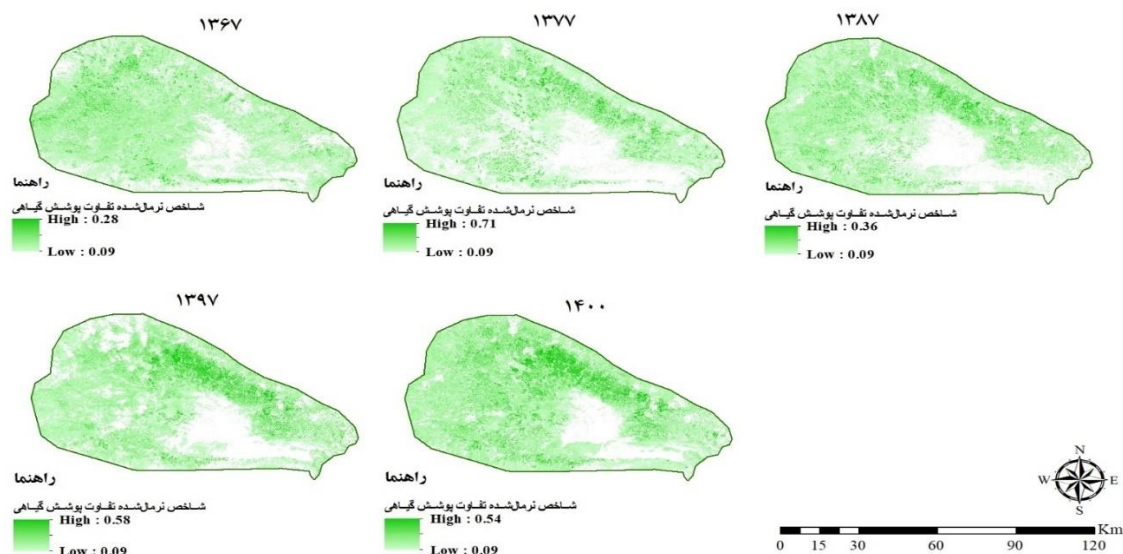
می‌دهد که در سال ۱۳۶۷، عمده مساحت منطقه در کلاس‌های پایین‌تر قرار داشته است؛ به طوری که کلاس خیلی ضعیف با ۲۵۱۶/۳۰ کیلومتر مربع و ضعیف با ۱۵۹۶/۰۸ کیلومتر مربع، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. این روند در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۷ نیز با کمی نوسان تکرار شده است. در سال ۱۳۹۷، مساحت کلاس‌های متوسط و خوب افزایش یافته و به ترتیب به ۵۹۲/۵۹ و ۲۶۷/۰۵ کیلومتر مربع رسیده است. این روند در سال ۱۴۰۰ ادامه یافته و بهبود قابل توجهی در وضعیت پوشش گیاهی ثبت شده است؛ به طوری که مساحت کلاس متوسط به ۶۹۵/۶۸ و کلاس خوب به ۴۱۰/۰۸ کیلومتر مربع افزایش یافته است.

طبقه‌بندی شاخص NDVI

در این پژوهش، برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰، از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. جهت طبقه‌بندی مقادیر NDVI، روش آماری Sturges (استرجس) به کار گرفته شد؛ با این تفاوت که به منظور تمرکز بر نواحی دارای پوشش گیاهی واقعی، تمام مقادیر NDVI کمتر از ۰/۰۹ به عنوان نواحی فاقد پوشش گیاهی یا خاک برهنه در نظر گرفته شده و از طبقه‌بندی حذف گردید (شکل ۵) در نتیجه، فقط مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۰۹ وارد طبقه‌بندی نهایی شدند که شامل چهار کلاس پوشش خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط و خوب می‌باشد. نتایج به دست آمده از جدول مقایسه‌ای (جدول ۵) نشان

جدول ۵- توزیع مساحت طبقات شاخص NDVI در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های منتخب بر حسب کیلومتر مربع
Table 5 – Area distribution of NDVI classification in the Salehiyeh wetland for selected years (Km²)

سال مورد بررسی					طبقه بندی شاخص NDVI
1400	1397	1387	1377	1367	
2139.31	2148.65	2479.20	2583.13	2516.30	پوشش خیلی ضعیف ($0.09 < NDVI \leq 0.15$)
1653.82	1301.52	1449.51	898.57	1596.08	ضعیف ($0.15 < NDVI \leq 0.22$)
695.68	592.59	450.85	415.79	379.10	متوسط ($0.22 < NDVI \leq 0.35$)
410.08	267.05	166.48	196.15	47	خوب ($NDVI > 0.35$)



شکل ۵_ نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی بر اساس شاخص NDVI با استفاده از روش (Sturges)

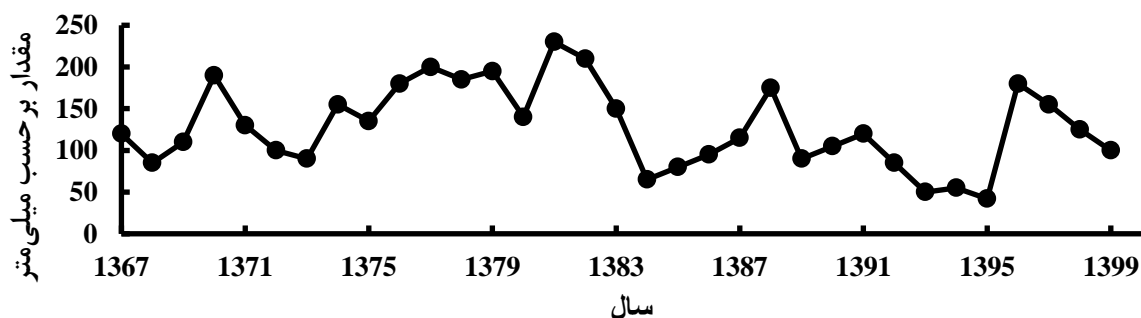
Figure 5- Vegetation cover classification map based on NDVI using the Sturges method

این افت بارش احتمالاً تأثیر مستقیمی بر کاهش منابع آبی سطحی و زیرزمینی و تشدید خشکی تالاب‌ها و اراضی پیرامونی داشته است. در مقابل، سال‌های پر بارش شامل ۱۳۷۱، ۱۳۷۷، ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و به‌ویژه ۱۳۹۶ هستند که در آن‌ها بارش سالانه به بیش از ۱۸۰ میلی‌متر رسیده است. با این حال، این افزایش‌ها عمدتاً مقطعی و فاقد استمرار بوده‌اند و به‌سرعت در سال‌های بعد کاهش یافته‌اند. الگوی کلی نشان می‌دهد که بارش سالانه در منطقه از شدت نوسان بالا و توزیع زمانی نامنظم برخوردار است (شکل ۶).

بررسی روند تغییرات بارش سالانه

به‌منظور بررسی روند اقلیمی منطقه تالاب صالحیه، داده‌های بارش سالانه طی دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱ مورد تحلیل قرار گرفت. نمودار تغییرات بارندگی سالانه نشان‌دهنده نوسانات قابل‌ملاحظه‌ای است که از نبود الگوی پایدار بارشی در منطقه حکایت دارد. در طول این بازه، چندین دوره خشکسالی چشمگیر قابل شناسایی است. به‌طور مشخص، سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ و همچنین بازه ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ از جمله کم‌بارش‌ترین دوره‌ها محسوب می‌شوند که بارش سالانه در آن‌ها به حدود ۶۰ تا ۸۰ میلی‌متر کاهش یافته است.

میانگین بارش سالانه برحسب میلی‌متر



شکل ۶- روند تغییرات بارش سالانه در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱

Figure 6- Annual precipitation trend in the Salehiyeh wetland region from 1989 to 2021

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی و صحت‌سنجی

نتایج ارزیابی دقت پنج کاربری اراضی کشاورزی، اراضی مرتعی، اراضی بایر و شوره‌زار و بسترهای آبی در یک بازه زمانی ۳۲ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰) نشان داد که دقت کلی بالای ۹۳٪ و ضریب کاپا نیز بالای ۹۰٪ مساحت ۲۸۱۷/۸۴ کیلومترمربع و درصد مساحت بیش از ۴۵ درصد انتقال یافته است. همچنین مساحت بسترهای آبی از جمله تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه آن به شدت کاهش یافته است. این مناطق در سال ۱۳۶۷ حدود ۲/۶۴ درصد از مساحت منطقه و در

سال ۱۴۰۰ حدود ۰/۰۵ درصد را شامل می‌شوند که دارای پایین‌ترین درصد در بین اراضی طبقه‌بندی شده می‌باشند (جدول ۶). در این دوره زمانی ۳۲ ساله اراضی کشاورزی، اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین اراضی مسکونی و انسان‌ساخت روندی افزایشی داشته است که به ترتیب از ۳۳/۶۹، ۰/۱۵ و ۰/۷۵ در سال ۱۳۶۷ به ۴۵/۸۴، ۸/۱۹ و ۱۲/۵۴ درصد در سال ۱۴۰۰ رسیده است. همچنین کاربری‌های مرتعی و بسترهای آبی نیز روندی کاهشی داشته که به ترتیب از ۶۲/۷۸ و ۲/۶۴ در سال ۱۳۶۷ به ۳۳/۳۸ و ۰/۰۵ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶- مساحت و درصد مساحت کاربری‌های منطقه مورد مطالعه

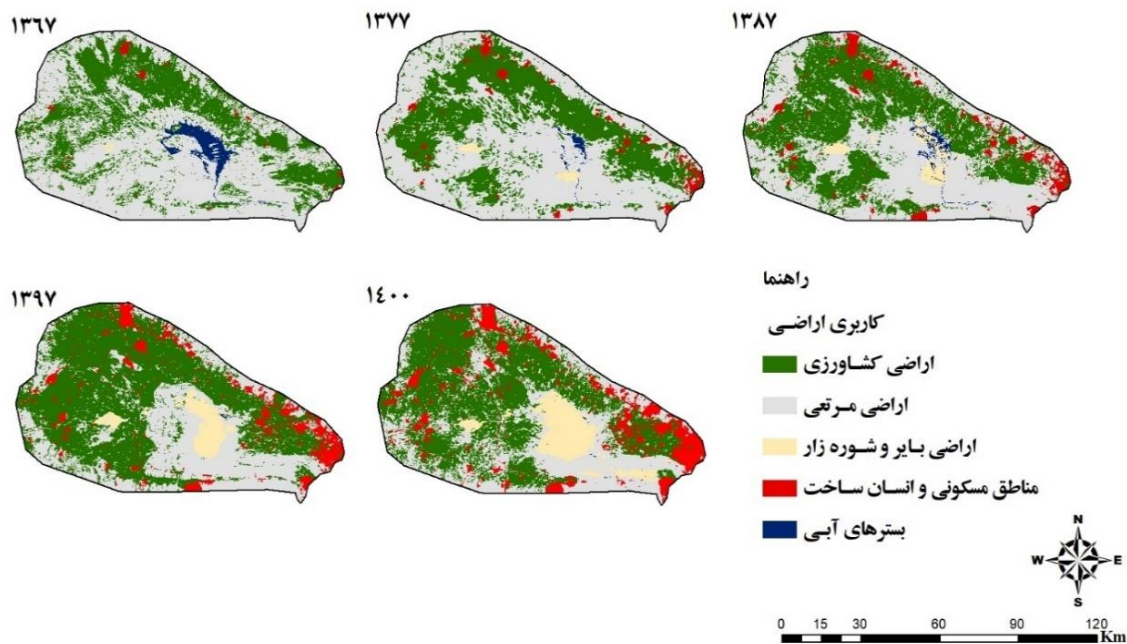
Table 6 - Area and Percentage of Land Uses in the Study Area

1400		1397		1387		1377		1367		طبقه‌بندی اراضی
Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	
2817.8	45.8	3165	51.5	2545.3	41.4	2248.0	36.5	2070.2	33.6	اراضی کشاورزی
2050.4	33.3	2184.7	35.5	6530.8	49.8	3635.9	59.1	3857.8	62.7	اراضی مرتعی
503.4	8.1	271.4	4.4	171.9	2.8	54.3	0.8	9.0	0.1	اراضی بایر و شوره‌زار
770.2	8.4	520.5	12.5	337.4	5.4	180.3	2.9	46.	0.7	مناطق مسکونی و انسان‌ساخت
3.2	0.06	3.4	0.05	24.7	0/4	26.4	0.4	161.9	2.6	بسترهای آبی
6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	جمع کل

جدول ۷- دقت کلی، ضریب کاپا، دقت کاربر و دقت تولید کننده طبقه‌بندی کاربری اراضی برای سال‌های مختلف

Table 7 – Overall Accuracy, Kappa Coefficient, User Accuracy and Producer Accuracy of Land Use Classification for Different Years

سال	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کاربر	دقت تولید کننده
1367	92.4 %	0.89	97.2 %	96%
1377	93.1 %	0.91	97.8 %	95.4 %
1387	94.6 %	0.92	95.4 %	94.2 %
1397	95.3 %	0.93	98.2 %	98.3 %
1400	96.1 %	0.94	99.6 %	99.2 %

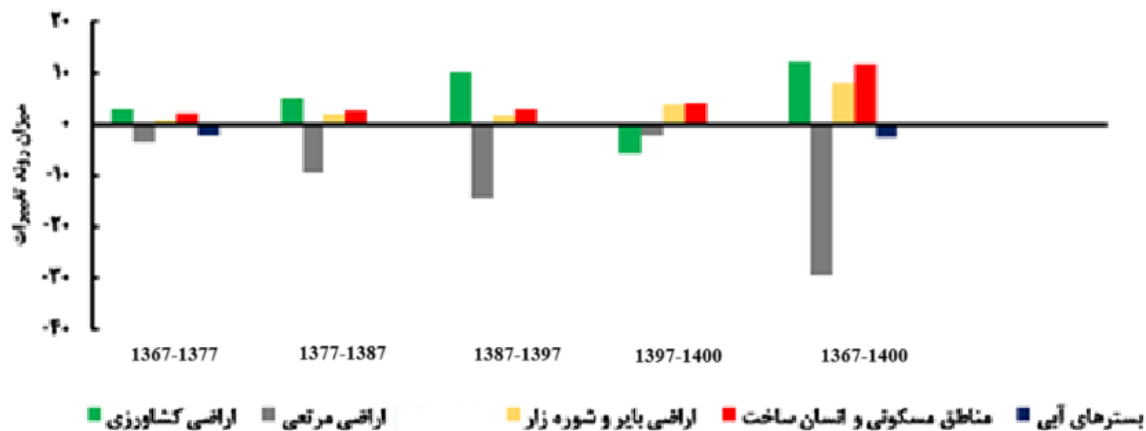


شکل ۷- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 7 - Land Use Map of the Study Area from 1988 to 2021

بسترهای آبی با منفی ۲/۵۸ درصد کاهش به دست آورده است. این بررسی سال به سال نشان داد که افزایش اراضی کشاورزی در بین سال‌های ۱۳۶۷-۱۴۰۰، از کاهش ۲۹/۴۰ درصدی اراضی بایر بوده است. از طرفی دیگر در این بازه ۳۲ ساله حدود ۲/۵۸ درصد کاهش بسترهای آبی باعث افزایش ۸/۰۵ درصدی اراضی شور نیز شده است.

درجه تغییرات کاربری در بازه زمانی ۱۳۶۷-۱۴۰۰

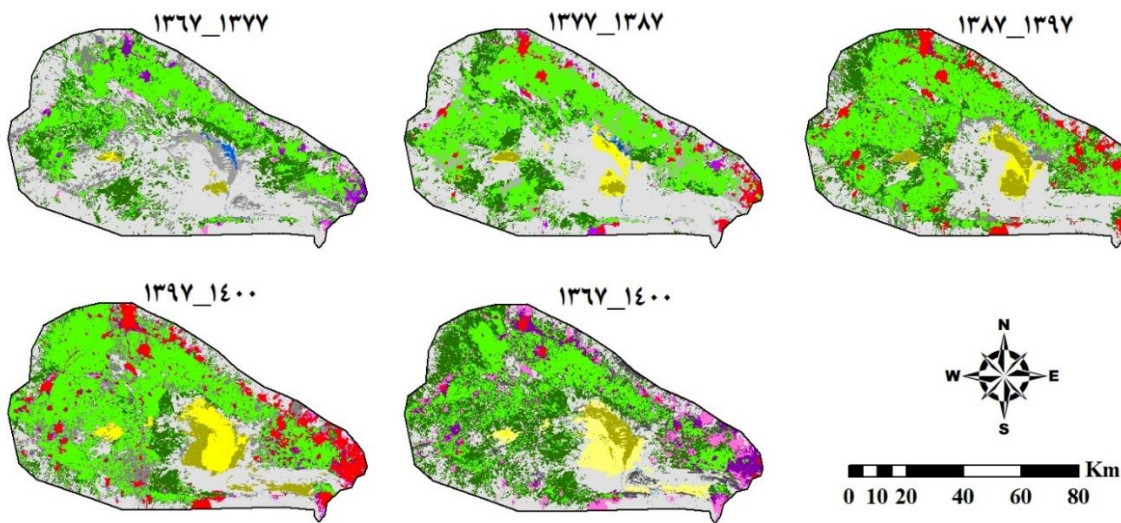
نتایج بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در گام زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ نشان داد که اراضی کشاورزی در حال افزایش بوده و در نهایت افزایش ۱۲/۱۷ درصدی را داشته است که این افزایش را از کاهش اراضی مرتعی با منفی ۲۹/۴۱ درصد کاهش و



شکل ۸- روند تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۷_۱۴۰۰
 Figure 8- Trend of Land Use Changes from 1988 to 2021

ساله بین سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ روند تغییرات کاربری اراضی مرتعی همچنان به صورت کاهش بوده است به طوری که ۲۳/۲۱ درصد به اراضی کشاورزی، ۱۰/۹۹ درصد به اراضی بایر و شوره‌زار و ۵/۰۲ درصد نیز به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت تغییر کاربری داده است. به طور کلی روند تغییرات به سوی افزایش کشاورزی و مناطق انسان‌ساخت و همچنین اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین کاهش قابل توجه اراضی مرتعی و بسترهای آبی بوده است (شکل‌های ۸ و ۹). نقشه روند تغییرات کاربری اراضی در شکل ۹ در واقع بیانگر تبدیل اراضی به یک‌دیگر در طی سال‌های متمادی می‌باشد. به این صورت که به عنوان مثال اراضی کشاورزی که با شماره ۱ مشخص شده‌اند به اراضی بایر و یا اراضی شهری با شماره‌های ۲ و ۴ تبدیل شده‌اند. همچنین، بسترهای آبی با شماره ۵ به مناطق بایر و شوره‌زار با شماره ۳ تغییر یافته‌اند.

به طور خاص روند تغییرات کاربری اراضی در شکل ۸ در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ بسیار متغیر بوده به طوری که بیشترین تغییرات مربوط به اراضی مرتعی بوده است که از سال ۱۳۶۷ حدود ۲۴/۱۱ درصد این کاربری اراضی به اراضی کشاورزی، ۱/۵۰ درصد به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۱۰/۹ درصد به اراضی بایر و شوره‌زار در سال ۱۳۷۷ تبدیل شده است. بین سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷ نیز اراضی مرتعی بیشترین تغییرات را داشته است ۲۳/۶۶ درصد این اراضی به اراضی کشاورزی، ۳ درصد به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۲/۹۸ درصد آن به اراضی بایر و شوره‌زار تبدیل شده است. همچنین کاربری اراضی مرتعی بیشترین تغییرات را در بازه‌ی ۱۰ ساله‌ی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۷ داشته است به طوری که ۳۲/۵۵ درصد آن به اراضی کشاورزی، ۴/۱۴ درصد به کاربری اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۲/۸۹ درصد آن به کاربری اراضی بایر و شوره‌زار تبدیل شده است. در یک بازه ۳



راهنما

روند تغییرات اراضی	5,3	4,4	3,5	2,3	1,3	1, 1
	5,5	5,2	3,3	2,1	2,4	1,4
	5,4	5,1	3,2	2,2	1,5	1,2

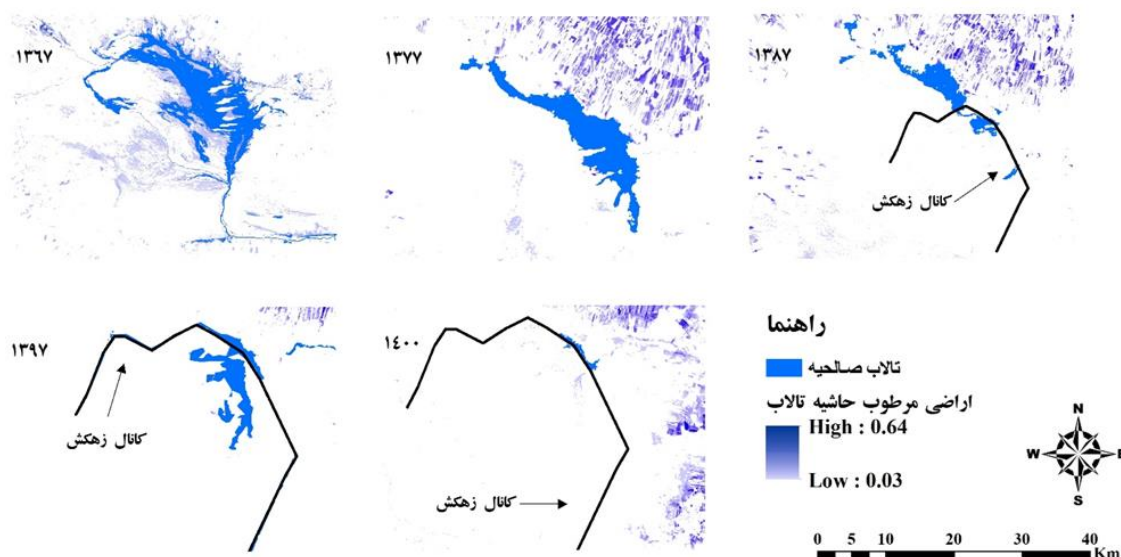
شکل ۹- نقشه روند تغییرات کاربری اراضی (اعداد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب کاربری کشاورزی، مراتع، اراضی بایر و شوره‌زارها، مناطق مسکونی و انسان‌ساخت و بسترهای آبی است)

Figure 9 - Map of Land Use Change Trends (Numbers 1, 2, 3, 4, and 5 represent Agricultural Land, Pastures, Barren and Saline Lands, Residential and Built-up Areas, and Water Bodies, respectively)

شده است. همچنین در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷ حدود ۳۵/۴۰ درصد بسترهای آبی به اراضی مرتعی و ۱۵/۸۳ درصد آن، به اراضی بایر و شورزار تغییر کاربری داده است. در بازه زمانی ۱۰ ساله ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ نیز همچنان کاهش بستر آبی مشهود است به طوری که تنها ۲/۷۰ درصد این بستر در سال ۱۳۹۷ باقی مانده است و ۵۱/۰۱ درصد از آن به اراضی بایر و شورزار و ۴۰/۹۱ درصد آن به اراضی مرتعی تغییر یافته است. در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ مجدد کاهش بستر آبی نمایان است به طوری که در سال ۱۳۹۷ در حدود ۵۲/۶۱ درصد این کاربری اراضی به کاربری اراضی مرتعی و ۱۹ درصد آن به اراضی بایر و شورزار در سال ۱۴۰۰ تبدیل شده است.

کاهش بسترهای آبی در این بازه ۳۲ ساله از ۱۶۱/۹۳ کیلومترمربع به ۳/۳۵ کیلومترمربع رسیده است که حدود ۸۰/۳۱ درصد این کاربری به اراضی بایر و شورزار تبدیل شده است.

بررسی تغییرات بستر آبی تالاب صالحیه باتوجه به اهمیت بسترهای آبی در این پژوهش روند تغییرات آن به صورت مجزا در ادامه شرح داده خواهد شد (شکل ۱۰). بررسی تغییرات کاربری تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه‌ی آن در شکل ۱۰ نشان داد که در بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۷ کاهش قابل توجهی داشته است به طوری که از ۱۰۰ درصد مساحت آن در سال ۱۳۶۷ حدود ۸۰/۲۱ درصد آن به اراضی مرتعی و ۲/۰۵ در آن به اراضی بایر و شورزار در سال ۱۳۷۷ تبدیل



شکل ۱۰- روند تغییرات تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه تالاب
Figure 10- Trend of Changes in Salehiyeh Wetland and its Margins

چرخه‌های آبی طبیعی تالاب‌ها شده و کاهش سطح آب، تخریب زیستگاه‌ها و اختلال در تعادل اکولوژیکی را به دنبال دارد. به همین دلیل، اقدامات بازسازی و احیای تالاب‌ها به منظور بازیابی زیستگاه‌های از دست رفته و تأمین منابع غذایی برای جانوران منطقه آغاز شده است. همچنین، درباره تأثیر تالاب‌ها بر منابع آب زیرزمینی، هنوز شناخت کافی وجود ندارد و نیاز به پژوهش‌های بیشتری احساس می‌شود. لذا بررسی دقیق

بحث

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که تالاب‌ها به دلیل فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی آسیب‌پذیر شده‌اند و این امر باعث کاهش کارکردهای طبیعی آن‌ها شده است. یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی که بر تالاب‌ها تأثیرگذار است، زهکشی است که معمولاً به منظور توسعه کشاورزی یا شهرسازی انجام می‌شود (Bring et al., 2022). این فرآیند موجب تغییر در

پهنه‌های آبی در منطقه است، واکنش خطی یا هم‌راستایی با بارندگی‌ها نشان نمی‌دهد. برای مثال، انتظار می‌رفت که در پی بارش شدید سال ۲۰۱۸، در سال ۲۰۱۹ یا ۲۰۲۰ شاهد افزایش محسوس در سطح رطوبت باشیم، اما تنها افزایش محدود و کوتاه‌مدتی در کلاس‌های NDWI ثبت شده و در سال ۲۰۲۱ مجدداً روند کاهشی مشاهده شده است.

این ناهم‌خوانی میان افزایش بارندگی و کاهش رطوبت سطحی نشان می‌دهد که بارش به‌تنهایی تعیین‌کننده وضعیت منابع آبی تالاب نیست. به نظر می‌رسد که تغییرات ساختاری در سامانه هیدرولوژیکی منطقه، به‌ویژه احداث زهکش‌ها و کانال‌های انحرافی، تأثیر بیشتری در وضعیت آبی تالاب دارند. زهکش‌های ایجادشده با هدف تخلیه آب مازاد اراضی کشاورزی، موجب کاهش تغذیه طبیعی تالاب و انحراف روان‌آب‌های سطحی شده و نهایتاً باعث کاهش کارایی بارش در بهبود شرایط رطوبتی منطقه شده‌اند.

بنابراین، NDWI و بارندگی سالانه به‌وضوح بیانگر آن است که با وجود وقوع دوره‌های ترسالی، سامانه زهکشی و سایر مداخلات انسانی مانع از احیای طبیعی رطوبت و آب تالاب شده‌اند. تأثیر برنامه‌های زهکشی بر تالاب‌ها موضوعی است که در مطالعات محیط‌زیست موردتوجه قرار گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ی Dorche و همکاران (۲۰۱۹) کیفیت آب تالاب‌ها در مناطق سرد و خشک ارزیابی گردید و اهمیت درک تأثیرات اکولوژیکی و مداخلات انسانی بر تالاب‌ها را برجسته نمود. با توجه به تغییرات چشمگیر در شاخص NDWI و کاهش شدید بستر آبی در سال‌های پس از احداث زهکش، می‌توان عنوان کرد که برنامه احداث زهکش منجر به کاهش محتوی رطوبتی تالاب، به‌ویژه در منطقه جمع‌آوری آب و ایجاد یک روند منفی در رطوبت در برخی از بخش‌های منطقه جمع‌آوری فعلی شده است. همچنین در مطالعه‌ی Uossef و Gomrokchi (۲۰۲۲) نشان داده شد که آب ورودی به این مناطق اغلب به دلیل رقابت با سایر مصارف آبی مانند کشاورزی، مصرف انسان و دام و

تغییرات سطح تالاب‌هایی مانند تالاب صالحیه برای فهم بهتر تأثیرات فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه زهکشی، بر اکوسیستم اهمیت فراوانی دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی تغییرات کاربری با تأکید بر تغییرات تالاب صالحیه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ OLI و لندست ۵ TM برای دوره زمانی ۳۲ ساله از سال ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ استفاده گردید. این بررسی روند تغییرات نشان داد که در این بازه زمانی ۳۲ ساله اراضی کشاورزی، اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین اراضی شهری روندی افزایشی داشته است که به ترتیب از ۳۳/۶۹، ۰/۱۵ و ۰/۷۵ به ۴۵/۸۴، ۸/۱۹ و ۱۲/۵۴ درصد رسیده است همچنین کاربری‌های مرتعی و بسترهای آبی نیز روندی کاهشی داشته که به ترتیب از ۶۲/۷۸ و ۲/۶۴ به ۳۳/۳۸ و ۰/۰۵ درصد کاهش پیدا کرده است. در راستای این نتایج Javadi و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهش خود در بازه زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۴ دریافتند که اراضی شوره‌زار ۳/۰۱ کیلومترمربع و اراضی رهاشده و بایر ۴۳/۶ کیلومترمربع در منطقه اشتهاارد واقع در استان البرز افزایش یافته است (Javadi et al., 2020). تحلیل تلفیقی شاخص NDWI و داده‌های بارش سالانه در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱، روندی مهم و نگران‌کننده را در ارتباط بین منابع آبی و فعالیت‌های انسان‌ساز، به‌ویژه زهکشی، آشکار می‌سازد.

نمودار بارندگی سالانه منطقه نشان می‌دهد که طی سه دهه گذشته، الگوی بارش با نوسانات قابل توجهی همراه بوده است. در برخی دوره‌ها، مانند سال‌های ۱۹۹۳، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۰، بارش سالانه افزایش یافته و به بیش از ۱۸۰ میلی‌متر رسیده است؛ اوج این بارندگی‌ها در سال ۲۰۱۸ ثبت شده که بارش به حدود ۳۰۰ میلی‌متر رسیده است. در مقابل، دوره‌هایی چون ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ و همچنین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ با کاهش محسوس بارش همراه بوده و مقدار آن به کمتر از ۸۰ میلی‌متر کاهش یافته است.

با وجود این نوسانات شدید در میزان بارش، شاخص NDWI که نشان‌دهنده میزان رطوبت سطحی و وسعت

اطراف تالاب، از جمله احداث زهکش‌ها، ساخت آزادراه آبیک-چرمشهر، تأسیس فرودگاه آزادی و گسترش اراضی کشاورزی، فشارهای اکولوژیکی بیشتری را بر این زیست‌بوم وارد کرده‌اند. این اقدامات نه تنها زیستگاه گونه‌های جانوری را تهدید می‌کند، بلکه موجب تشدید انزوای جغرافیایی و اختلال در ارتباطات اکولوژیکی تالاب با مناطق پیرامونی شده است. احداث زهکش به طول ۴۵ کیلومتر در سال ۱۳۸۸ با هدف مدیریت آب‌های سطحی، کاهش سطح آب زیرزمینی، آزادسازی اراضی برای کشاورزی و جلوگیری از پیشروی نمک انجام شد؛ اما این سازه در عمل به کانالی برای خروج آب از تالاب تبدیل شده است که تعادل آبی تالاب را بر هم زده است. از دیگر تهدیدات زیست‌محیطی تالاب، ورود پساب صنعتی از شهرک صنعتی نظرآباد در سال‌های اخیر است که به‌عنوان یک منبع آلودگی پایدار، اثرات منفی بر کیفیت آب و زیستگاه‌های وابسته به آن داشته است. در همین راستا، مطالعات صورت‌گرفته در سایر نقاط جهان نیز تأثیرات مشابهی را گزارش کرده‌اند. به عنوان نمونه، پژوهش Qu و همکاران (۲۰۲۳) در تالاب دشت سانجیانگ در چین نشان داد که تغییرات کاربری زمین و در پی آن، اختلال در چرخه هیدرولوژیکی تالاب، به‌طور قابل توجهی تنوع زیستی این زیست‌بوم را با تهدید مواجه ساخته است. این تغییرات باعث کاهش کیفیت زیستگاه‌ها، اختلال در الگوهای مهاجرتی گونه‌های پرندگان آبی و افزایش آسیب‌پذیری گونه‌های بومی شده است. Konar و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که چرخه‌ی هیدرولوژیک مهم‌ترین نقش را در حفاظت از تنوع زیستی دشت‌های سیلابی بر عهده دارند. هرچند نباید از این نکته غافل بود که جدا از فعالیت‌های انسانی، نقش تغییرات اقلیمی در رابطه با برآورد آبی تالاب معنی‌دار بوده و می‌تواند هدف مطالعه‌های مجزا قرار گیرد. در ایران نیز Asgharizade و همکاران (۲۰۱۹) به پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در تالاب بین‌المللی شادگان پرداختند

استفاده صنعتی تحت تنش شدید هستند. از طرف دیگر، احداث زهکش در محدوده بالایی تالاب صالحیه باعث شده که سیستم هیدرولوژیکی این تالاب از حالت تعادل خود خارج شود و آبی که در گذشته در مسیر خود وارد قسمت کم‌ارتفاع تالاب می‌شده به‌وسیله زهکش، مسدود و تخلیه شود. از سوی دیگر، شاخص NDVI که بیانگر تراکم پوشش گیاهی است، الگوی متفاوتی نشان می‌دهد. در سال ۱۳۶۷، کلاس‌های بالای NDVI بسیار محدود بوده‌اند که می‌تواند ناشی از شرایط خشکسالی یا عدم پوشش سبز وسیع در آن دوره باشد. اما از سال ۱۳۷۷ به بعد، افزایش تدریجی در کلاس‌های NDVI متوسط تا زیاد دیده می‌شود که به‌خصوص در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰، کلاس‌های سوم و دوم (با پوشش گیاهی کم تا متوسط) بیشترین سهم را دارند. این مسئله، هم‌راستا با افزایش اراضی کشاورزی آبیاری شده است. به‌علاوه، مناطق شهری و انسان‌ساخت در حال افزایش بوده که این می‌تواند حاصل از افزایش جمعیت و نیاز جمعیت به مناطق مسکونی و همچنین گسترش مناطق صنعتی باشد و به پیرو این افزایش جمعیت، اراضی کشاورزی برای تأمین غذا افزایش یافته است. رشد جمعیت و تأمین مسکن و غذا برای این جمعیت در حال رشد، باعث تبدیل و تغییر در کاربری‌های مختلف شده است. این افزایش اراضی کشاورزی و جمعیت نیاز به تأمین آب دارد که باعث کاهش بستر آبی تالاب صالحیه شده است.

در میان عوامل مختلف انسانی که چرخه طبیعی تالاب صالحیه را مختل کرده‌اند، تغییر در الگوی تخصیص حقا به‌ویژه به دلیل احداث زیرساخت‌های بزرگ آبی و عمرانی، نقش تعیین‌کننده‌ای داشته است. ساخت سد «کینه‌ورس» بر روی رودخانه ابهررود، احداث بند انحرافی بر رودخانه کردان با هدف تغذیه مصنوعی دشت هشگرد و همچنین احداث سد انحرافی روی رودخانه زیاران، همگی باعث تغییر در جریان‌های ورودی به تالاب و برهم خوردن چرخه هیدرولوژیکی آن شده‌اند. افزون بر این، پروژه‌های عمرانی در داخل و

و پایش پهنه آبی تالاب، و شاخص NDVI برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی در سطح منطقه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در این مدت، اراضی کشاورزی و مناطق شهری با روندی افزایشی مواجه شده‌اند، در حالی که مساحت پوشش گیاهی و بستر آبی تالاب به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. این تغییرات عمدتاً به واسطه‌ی فعالیت‌های انسانی نظیر گسترش کشاورزی و توسعه شهری، به‌ویژه پس از احداث زهکش، و همچنین تأثیرات تغییرات اقلیمی و کاهش نزولات جوی رخ داده است. مطالعات مشابه انجام‌شده در سایر مناطق نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم میان گسترش اراضی کشاورزی و شهری و کاهش مساحت تالاب‌ها و بسترهای آبی است. به‌ویژه در تالاب صالحیه، روند کاهش رطوبت و پوشش گیاهی به‌وضوح مشهود است و این امر تهدیدی جدی برای پایداری اکوسیستم‌های آبی و تنوع زیستی منطقه به‌شمار می‌آید؛ بنابراین، یافته‌های این تحقیق تأکید بر ضرورت استفاده از فناوری‌های سنجش از دور به‌عنوان ابزاری مؤثر در پایش تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی تأثیرات ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی دارند. علاوه بر این، مدیریت پایدار منابع آبی و اتخاذ تدابیر حفاظتی برای جلوگیری از تخریب بیشتر تالاب‌ها و اکوسیستم‌های مرتبط، به‌ویژه در مناطق حساس نظیر تالاب صالحیه، امری ضروری به نظر می‌رسد. انجام مطالعات تکمیلی با توجه به داده‌های اقلیمی و بررسی دقیق‌تر اثرات فعالیت‌های انسانی می‌تواند به بهبود سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی کمک شایانی نماید.

References

Abdullah, H. M., Mukti, M., Miah, M. G., Karim, M. A., Tanzir, M. T., & Hossain, M. S. (2024). Development at the cost of unsustainable degradation of wetlands: Unraveling the dynamics (historic and future) of wetlands in the megacity Dhaka. *World Development Sustainability*, 4,

که نتایج آن نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه مساحت پوشش اولیه تالاب و افزایش پهنه‌های کشاورزی و مناطق شهری در اطراف آن بود. پیش‌بینی‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که در صورت تداوم روند موجود، تا سال ۲۰۳۰ بخش بیشتری از تالاب به کاربری‌های انسانی اختصاص خواهد یافت. همچنین Salar و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر تالاب جازموریان پرداختند، بررسی نقشه‌های تهیه شده نشان داد که سطح اراضی زیر آب از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۷۴ افزایش و پس از آن سیر نزولی داشته و از ۱۱۹۵۵۲ هکتار در سال ۱۳۷۴ به ۷۲۳ هکتار در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته‌اند. سطح اراضی کشاورزی از ۲۱۳۱ هکتار در سال ۱۳۵۴ به ۱۳۳۹۱۳ هکتار در سال ۱۳۸۷ افزایش یافته و در سال ۱۴۰۱ به ۱۰۵۷۹۵ هکتار کاهش یافته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، در این دوره با ایجاد سد در بالادست رودخانه هلیل‌رود از یک‌طرف و توسعه اراضی کشاورزی، سطح آب تالاب کاهش پیدا کرده است؛ به‌طوری که در سال ۱۴۰۱ تالاب به‌طور کامل خشک شده است که همسو با تأثیرات فعالیت‌های انسانی از قبیل احداث زهکش در تالاب صالحیه می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، روند تغییرات تالاب صالحیه و اراضی اطراف آن طی دوره ۳۲ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰) با بهره‌گیری از دو شاخص سنجش‌از‌دور NDWI و NDVI و به کمک الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص NDWI برای استخراج

100131.

<https://doi.org/10.1016/j.wds.2024.100131>

Abebe, M. S., Derebew, K. T., & Gemed, D. O. (2019). Exploiting temporal-spatial patterns of informal settlements using GIS and remote sensing technique: a case study of Jimma city, Southwestern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-

11. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0133-5>
Ahmad, F. (2012). Detection of change in vegetation cover using multi-spectral and multi-temporal information for District Sargodha, Pakistan. *Sociedade & Natureza*, 24, 557-571. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132012000300014>
- Asghari Poudeh, Z., Ghadirian Baharanchi, O., Nematollahi, S., Fakheran, S., & Pourmanafi, S. (2019). Monitoring and prediction of land use/cover changes in Shadegan International Wetland, Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8(3), 63-76. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-934-en.html>
- Bring, A., Thorslund, J., Rosen, L., Tonderski, K., Aberg, C., Envall, I., & Laundon, H. (2022). Effects on ground water storage of restoring, constructing or draining wetlands in temperate and boreal climates: A systematic review. *Environmental Evidence*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00289-5>
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941. <http://doi.org/10.1071/MF14173>
- Deslippe, J. R., & Bentley, S. B. (2025). The role of wetland restoration in mediating phosphorus ecosystem services in agricultural landscapes. *Current Opinion in Biotechnology*, 91, 103227. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103227>
- Dorche, E. E., Fathi, P., & Ofogh, A. E. (2019). Wetland water quality assessment in cold and dry regions (Case study: Choghakhor wetland, Iran). *Limnological Review*, 19(2), 57-75. <https://doi.org/10.2478/limre-2019-0006>
- Doroudi, H. (2018). Breeding report of Greater Sand Plover *Charadrius leschenaultii* (Lesson, 1826) in Salhiyeh Lagoon (Karpozarbad) Nazarabad. *Zist Sepehr Student Magazine*, 13(1), 1-6. (In Persian)
- Elias, E., Seifu, W., Tesfaye, B., & Girmay, W. (2019). Impact of land use/cover changes on lake ecosystem of Ethiopia central rift valley. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1595876. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1595876>
- Elmore, J. A., Londe, D. W., Davis, C. A., Fuhlendorf, S. D., & Loss, S. R. (2024). Associations with landscape and local-scale wetland habitat conditions vary among migratory shorebird species during stopovers. *Wildlife Biology*, 2024(2), e01132. <https://doi.org/10.1002/wlb3.01132>
- Eskandari damaneh, H., & Ghasemi Aryan, Y. (2025). Investigating the trend and explaining the key drivers of desertification and land degradation in Salehiyeh wetland and Qazvin salt plain. *Integrated Watershed Management*, 4(4), 81-93. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2026209.1146>
- Feyzolahpour, M. (2024). Analysis of changes in the surface of Anzali Wetland using spectral indices, Random Tree Classification (RTC), and Maximum Likelihood Classification (MLC) from 1992 to 2022. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 5(3), 17-36. <https://doi.org/10.22124/gscaj.2024.24889.1251>
- Gessesse, A. T., Chanie, T., Feyisa, T., & Jemal, A. (2017). Impact Assessment of land use/land cover change on soil erosion and rural livelihood in Andit Tid watershed, North Shewa, Ethiopia. *Asia Pacific Journal of Energy and Environment*, 4(2), 49-56. <https://doi.org/10.18034/apjee.v4i2.242>
- Golafarin, Z., Bahram Malekmohammadi, H., J., Ahmadreza, Y., & Ahmad Noheh, G. (2024). Spatiotemporal dynamics analysis of land cover in Parishan Wetland using decision tree model and satellite image processing. *Environmental Science and Technology*, 26(1), 101-118. (In Persian)
- Goyette, J. O., Savary, S., Blanchette, M., Rousseau, A. N., Pellerin, S., & Poulin, M. (2023). Setting targets for wetland restoration to mitigate climate change effects on watershed hydrology. *Environmental management*, 71(2), 365-378. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01763-z>
- IPCC. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food*

- security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/srccel/>
- Islam, I. (2008). *Wetlands of Dhaka Metro area: a study from social, economic, and institutional perspectives.* Dhaka: AH Development Publishing House.
- Jamal, S., & Ahmad, W. S. (2020). Assessing land use land cover dynamics of wetland ecosystems using Landsat satellite data. *SN Applied Sciences*, 2, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03685-z>
- Javadi, S., Zehtabian, G., Khosravi, H., & Abolhasani, A. (2020). Assessing the impact of land use change on Soil physical and chemical characteristics (Case study: Eshtehard, Alborz province). *Journal of Rangeland*, 14(2), 208-220. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080891.1399.14.2.4.4>
- Kafy, A. A., Rahman, M. S., Hasan, M. M., & Islam, M. (2020). Modelling future land use land cover changes and their impacts on land surface temperatures in Rajshahi, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100314>
- Kafy, A.-A., Dey, N. N., Al Rakib, A., Rahaman, Z. A., Nasher, N. R., & Bhatt, A. (2021). Modeling the relationship between land use/land cover and land surface temperature in Dhaka, Bangladesh using CA-ANN algorithm. *Environmental Challenges*, 4, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100190>
- Karnatak, G., Das, B. K., Sarkar, U. K., Borah, S., Roy, A., Parida & Chandra, P. (2022). Integration of pen aquaculture into ecosystem-based enhancement of small-scale fisheries in a macrophyte dominated floodplain wetland of India. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(50), 75431-75440. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21112-1>
- Khemiri, K., Jebari, S., Mahdhi, N., Saidi, I., Berndtsson, R., & Bacha, S. (2022). Drivers of Long-Term Land-Use Pressure in the Merguellil Wadi, Tunisia, Using DPSIR Approach and Remote Sensing. *Land*, 11(1), 138. <https://doi.org/10.3390/land11010138>
- Konar, M., Jason Todd, M., Muneeppeerakul, R., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2013). Hydrology as a driver of biodiversity: Controls on carrying capacity, niche formation, and dispersal. *Advances in Water Resources*, 51, 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.009>
- Moisa, M. B., Bulto, T. W., Werku, B. C., Berkessa, Y. W., Chebo, A. K., Negash, D. A., & Gemed, D. O. (2023). Analyzing Wetland Dynamics Using Geospatial Techniques: A Case of Abay Choman and Jimma Geneti Watershed, Horo Guduru Wollega Zone, Western Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*, 16, 11786221221150183. <https://doi.org/10.1177/11786221221150183>
- Moisa, M. B., Dejene, I. N., Merga, B. B., & Gemed, D. O. (2022). Impacts of land use/land cover dynamics on land surface temperature using geospatial techniques in Anger River Sub-basin, Western Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 81(3), 99. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10221-2>
- Othman, A. A., Al-Saady, Y. I., Al-Khafaji, A. K., & Gloaguen, R. (2014). Environmental change detection in the central part of Iraq using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0870-0>
- Park, N.-W., Chi, K.-H., & Kwon, B.-D. (2003). Geostatistical integration of spectral and spatial information for land-cover mapping using remote sensing data. *Geosciences Journal*, 7, 335-341. <https://doi.org/10.1007/BF02919565>
- Peters, M. K., & Kusimi, J. M. (2023). Changes in wetland and other landscape elements of the Keta Municipal area of Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 27(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s11852-022-00928-6>
- Qu, Y., Zeng, X., Luo, C., Zhang, H., & Ni, H. (2023). Prediction of wetland biodiversity pattern under the current land-use mode and wetland sustainable management in Sanjiang Plain, China. *Ecological Indicators*, 147, 109990. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109990>
- Ramsar Convention on Wetlands. (2018). *Global Wetland*

- Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.*
- Rasti, S., Mahdavi-fardn, M., Shaykh Ghaderi, H., Nasiri, A., & Taktaz, N. Z. (2022). Improving Classification accuracy by combining multi-season images of Sentinel 1 and 2 in order to prepare a land use map in the cloud space of Google Earth Engine (Case study: Guilan province). *Geography and Human Relationships*, 5(3), 357-373. <https://doi.org/10.22034/gahr.2022.336692.1696>
- Rebello, A. J., Morris, C., Meire, P., & Esler, K. J. (2019). Ecosystem services provided by South African palmiet wetlands: A case for investment in strategic water source areas. *Ecological Indicators*, 101, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.043>
- Rebello, L.-M., Finlayson, C. M., & Nagabhatla, N. (2009). Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of environmental management*, 90(7), 2144-2153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>
- Rezaee, M. M. H., Jabbari, I., & Pirouzinjad, N. (2016). A study of meandering, braided and anabranching channel planforms, using sinuosity and braided indexes in Gamasiab River. *Journal of Water and Marine Resources*, 7(13), 283. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.283>
- Salar, A., Shahriari, M., Rahdari, V., & Maleki, S. (2024). Investigating the impact of land use and land cover changes on wetlands using satellite data (Case study: Jazmourian Wetland). *Journal of Water and Soil Science*, 28(2), 85-96. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.28.2.6215>
- Sawant, S., Garg, R. D., Meshram, V., & Mistry, S. (2023). Sen-2 LULC: Land use land cover dataset for deep learning approaches. *Data in Brief*, 51, 109724. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109724>
- Seyed Mousavi, S. M., & Akhoondzadeh, M. (2023). A quick seasonal detection and assessment of international Shadegan wetland water body extent using Google Earth Engine cloud platform. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W1-2022, 699-706. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-699-2023>
- Seyedian, S. M., Rohani, H., Fathabadi, A., & Javadi Alinezhad, M. (2017). Stochastic modeling of sediment yield using random forest and quantile regression. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 103-122. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12600.2732>
- Shen, G., Yang, X., Jin, Y., Xu, B., & Zhou, Q. (2019). Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China. *Ecological Indicators*, 104, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.063>
- Singh, R., Saritha, V., & Pande, C. B. (2024). Monitoring of wetland turbidity using multi-temporal Landsat-8 and Landsat-9 satellite imagery in the Bisalpur wetland, Rajasthan, India. *Environmental Research*, 241, 117638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117638>
- Soltani, N., & Mohammadnejad, V. (2021). Efficiency of Google Earth Engine (GEE) system in land use change assessment and predicting it using CA-Markov model (Case study of Urmia plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(3), 101-114. (In Persian)
- Sulman, B. N., Desai, A. R., & Mladenoff, D. J. (2013). Modeling soil and biomass carbon responses to declining water table in a wetland-rich landscape. *Ecosystems*, 16, 491-507. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9624-1>
- Tomscha, S., Jackson, B., Benavidez, R., de Róiste, M., Hartley, S., & Deslippe, J. (2023). A multiscale perspective on how much wetland restoration is needed to achieve targets for ecosystem services. *Ecosystem Services*, 61, 101527. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101527>
- Uossef Gomrokchi, A., Hassanoghli, A., Akbari, M., Mostashari Mohasses, M., & Amini, D. (2022). Prediction of soil salinity using neural network and multivariate regression based on remote sensing indices and comparison: A case study of Qazvin

- plain's Salt Marsh. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(28), 73-88.
<https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.28.51>
- Van Deventer, H., Linström, A., Naidoo, L., Job, N., Sieben, E. J. J., & Cho, M. A. (2022). Comparison between Sentinel-2 and WorldView-3 sensors in mapping wetland vegetation communities of the Grassland Biome of South Africa, for monitoring under climate change. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100875.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100875>
- Wang, Z., Zhao, H., & Zhao, C. (2022). Temporal and spatial evolution characteristics of land use and landscape pattern in key wetland areas of the West Liao River Basin, Northeast China. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(1), 195-205.
<https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16382>
- Xu, W., Fan, X., Ma, J., Pimm, S. L., Kong, L., Zeng, Y., Li, X., Xiao, Y., Zheng, H., & Liu, J. (2019). Hidden loss of wetlands in China. *Current Biology*, 29(18), 3065-3071.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.053>
- Zhang, C., Xiao, X., Wang, X., Qin, Y., Doughty, R., Yang, X., Meng, C., Yao, Y., & Dong, J. (2024). Mapping wetlands in Northeast China by using knowledge-based algorithms and microwave (PALSAR-2, Sentinel-1), optical (Sentinel-2, Landsat), and thermal (MODIS) images. *Journal of environmental management*, 349, 119618.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119618>
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., & Gao, Z. (2016). A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, 60, 442-452.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.003>
- Zhou, J., Chen, Y., & Yong, W. (2022). Performance evaluation of hybrid YYPO-RF, BWOA-RF and SMA-RF models to predict plastic zones around underground powerhouse caverns. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(6), 179.
<https://doi.org/10.1007/s40948-022-00496-x>
- Zhou, J., Dai, Y., Tao, M., Khandelwal, M., Zhao, M., & Li, Q. (2023). Estimating the mean cutting force of conical picks using random forest with salp swarm algorithm. *Results in Engineering*, 17, 100892.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100892>
- Zhou, J., Huang, S., & Qiu, Y. (2022). Optimization of random forest through the use of MVO, GWO and MFO in evaluating the stability of underground entry-type excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 124, 104494.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104494>
- Zhu, X., Jiao, L., Wu, X., Du, D., Wu, J., & Zhang, P. (2023). Ecosystem health assessment and comparison of natural and constructed wetlands in the arid zone of northwest China. *Ecological Indicators*, 154, 110576.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110576>
- Zoran, M., & Anderson, E. (2006). The use of multi-temporal and multispectral satellite data for change detection analysis of the Romanian Black Sea coastal zone. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 8(1), 252.

Development of a nonparametric K-Nearest neighbors model enhanced by the PSO metaheuristic catalyst for dust storm modeling in Western Iran

Mohammad Ansari Ghojghar ^{1*}, Haniyeh Mohammadi ²

1. Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

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

(Received: 03 May 2025

Revised: 06 Jun 2025

Accepted: 15 July 2025)

Extended Abstract

Introduction: Dust storms are among the most significant climatic hazards in the arid and semi-arid regions of Iran, accompanied by consequences such as reduced visibility, severe air pollution, threats to public health, decreased agricultural productivity, and damage to urban and rural infrastructure. In recent years, particularly in the western regions of the country, an increasing trend has been observed in the intensity, frequency, and spatial extent of this phenomenon. This alarming trend results from a combination of natural factors, such as recurring droughts, declining soil moisture, and strong winds, as well as human-induced drivers, including unbalanced land use changes, excessive exploitation of water resources, and unsustainable land management practices. Given the widespread impacts of this phenomenon on the environment and the livelihoods of local populations, accurately predicting the number of dusty days within specific time periods is of great importance as a critical tool for damage mitigation and informed operational and managerial decision-making. Achieving this goal requires the use of advanced data-driven methods and artificial intelligence algorithms that can be effective in identifying complex, nonlinear, and non-deterministic patterns.

Materials and methods: In this study, a nonparametric predictive model based on the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm was developed. The Particle Swarm Optimization (PSO) metaheuristic algorithm was employed as a catalyst to optimize the model structure and enhance its prediction accuracy. The input data included the Frequency of Dust Storm Days (FDSD) index from 26 synoptic stations located in 11 provinces across western Iran, covering the long-term period from 1981 to 2020. To construct the predictive model, lagged values of the FDSD index over the four previous time steps were used as input variables to accurately capture the temporal patterns of this phenomenon. Initially, the base KNN model was implemented by adjusting the k parameter. Subsequently, the PSO algorithm was applied to optimize key model parameters, including the number of influential neighbors and the weighting of input variables. The models' performance was evaluated using four statistical indicators: the correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Nash–Sutcliffe efficiency (NS) coefficient, to assess the model's accuracy and stability in predicting the FDSD index.

Results and Discussion: The results show that the KNN-PSO model outperformed the standalone KNN model. The application of the PSO algorithm allowed for automatic and optimal determination of key KNN parameters, such as the optimal number of neighbors (k) and weighting of input variables. For instance, at Abadan station, the correlation coefficient (R) of the KNN-PSO model increased to 0.997, while the RMSE decreased to 0.113. In contrast, the KNN model values were 0.654 and 0.437, respectively, indicating a significant improvement in prediction accuracy using the hybrid model. Comparison between observed and predicted values confirmed the improved model performance with an increased frequency of dust storm days. Among the stations studied, Abadan, which recorded the highest FDSD values, showed the highest agreement between the observed and predicted data. Overall, high-dust stations, such as Abadan, Ahvaz, Masjed Soleyman, Bostan, Sarpol-e Zahab, and Bandar Mahshahr, exhibited strong correlations between actual and predicted values. In scatter plots, these predictions closely followed the 1:1 line ($f(x) = x$), indicating the high efficiency of the KNN-PSO model. Furthermore, results revealed that using lagged FDSD indices from previous seasons did not enhance model performance, and simpler models utilizing only one-step lag yielded more accurate predictions.

Conclusions: Overall, the results demonstrate that the hybrid KNN-PSO model can significantly enhance the accuracy of predicting the frequency of dust storm days, particularly at stations with high occurrence rates, such as Abadan. By leveraging the capability of the PSO algorithm to automatically and optimally determine the sensitive parameters of the KNN model, this approach improves predictive performance compared to the base model. The findings indicate that integrating metaheuristic optimization algorithms such as PSO with simple data-driven models such as KNN not only increases prediction accuracy and efficiency in climatically challenging regions but also enhances the stability and generalizability under varying climatic and spatial conditions. Therefore, the use of such hybrid approaches can be considered an effective strategy for improved monitoring and management of climate-related hazards, including dust storms, in arid and semiarid regions.

Keywords: Metaheuristic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Dust Storm, Hybrid Models, Artificial Intelligence.

Citation: Ansari Ghojghar, M., & Mohammadi, H. (2026). Development of a nonparametric K-Nearest neighbors model enhanced by the PSO metaheuristic catalyst for dust storm modeling in Western Iran. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 85-106. doi= 10.22034/iwm.2025.2059627.1226

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>).



توسعه مدل ناپارامتریک K نزدیکترین همسایه با کاتالیزور فراابتکاری PSO به منظور مدل

سازی طوفان‌های گرد و غباری در غرب ایران

محمد انصاری قوجقار^{۱*}، هانیه محمدی^۲

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

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

چکیده مبسوط

مقدمه: طوفان‌های گرد و غبار از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به شمار می‌آیند و با پیامدهایی نظیر کاهش دید افقی، آلودگی شدید هوا، تهدید سلامت عمومی، کاهش بازدهی محصولات کشاورزی و آسیب به زیرساخت‌های شهری و روستایی همراه هستند. در سال‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق غربی کشور، روند افزایشی در شدت، بسامد و گستره مکانی این پدیده مشاهده شده است. این روند نگران‌کننده عمدتاً تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی نظیر خشکسالی‌های مکرر، افت رطوبت خاک و وزش بادهای شدید، در کنار عوامل انسانی همچون تغییرات نامتوازن کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و مدیریت ناپایدار سرزمین شکل گرفته است. نظر به تبعات گسترده این پدیده بر محیط‌زیست و زندگی ساکنان آن مناطق، پیش‌بینی دقیق پیش‌بینی دقیق تعداد روزهای گرد و غباری در بازه‌های زمانی مشخص، به عنوان ابزاری کلیدی در کاهش خسارات و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و عملیاتی اهمیت فراوان دارد. دستیابی به این هدف مستلزم بهره‌گیری از روش‌های نوین داده‌محور و الگوریتم‌های هوش مصنوعی است که می‌توانند در شناسایی الگوهای پیچیده، غیرخطی و غیرقطعی مؤثر واقع شوند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، یک مدل ناپارامتریک پیش‌بینی بر پایه الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) توسعه داده شد که با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات (PSO) به‌عنوان کاتالیزور، ساختار مدل بهینه‌سازی و دقت پیش‌بینی آن ارتقاء یافت. داده‌های مورد استفاده شامل شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار (FSDS) از ۲۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در ۱۱ استان در نیمه‌غربی کشور، طی یک دوره بلندمدت ۴۰ ساله (۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) بود. برای ساخت مدل پیش‌بینی، از مقادیر تأخیری شاخص FSDS در قالب چهار گام زمانی گذشته به‌عنوان ورودی استفاده شد تا الگوی تغییرات زمانی این پدیده به‌درستی شناسایی شود. در مرحله نخست، مدل پایه KNN با تنظیم پارامتر k اجرا شد و سپس الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی مدل، از جمله تعداد همسایگان مؤثر و وزن دهی به متغیرهای ورودی، به کار گرفته شد. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از چهار معیار آماری شامل ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب کارایی نش-سانتکلیف (Nash-Sutcliffe Efficiency - NS) صورت گرفت تا میزان دقت و پایداری مدل در پیش‌بینی شاخص FSDS سنجیده شود.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که مدل KNN-PSO عملکرد بهتری نسبت به مدل انفرادی KNN دارد. استفاده از الگوریتم PSO موجب شد تا پارامترهای حساس مدل KNN از جمله تعداد همسایگان (k) و وزن‌دهی به متغیرهای ورودی به‌صورت خودکار و بهینه تعیین شود. به‌طوری‌که در ایستگاه آبادان، ضریب همبستگی (r) مدل KNN-PSO به ۰/۹۹۷ افزایش و ضریب RMSE به ۰/۱۱۳ کاهش یافت، در حالی که این مقادیر در مدل KNN به ترتیب ۰/۶۵۴ و ۰/۴۳۷ بودند که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر دقت پیش‌بینی با استفاده از فرامدل ترکیبی است. مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده، بهبود عملکرد مدل‌ها را با افزایش فراوانی روزهای گرد و غباری تأیید می‌کند. در این میان، ایستگاه آبادان که بالاترین مقدار شاخص FSDS را در میان ایستگاه‌های مطالعه‌شده دارد، بیشترین انطباق بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده را نشان داد. به‌طور کلی، ایستگاه‌های پرگرد و غبار مانند آبادان، اهواز، مسجدسلیمان، بستان، سرپل‌ذهاب و بندرماهشهر، همبستگی بالایی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده داشتند؛ به‌گونه‌ای که در نمودارهای پراکندگی، به خط نیمساز ربع اول $f(x)=x$ بسیار نزدیک بودند و نشان‌دهنده کارایی بالای مدل KNN-PSO می‌باشند. همچنین نتایج نشان داد که به‌کارگیری شاخص‌های تأخیری از فصول گذشته موجب بهبود عملکرد مدل نشد و مدل‌های ساده‌تری که تنها از یک گام تأخیر استفاده کردند، دقت بالاتری را ارائه دادند.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج نشان داد که مدل ترکیبی KNN-PSO قادر است دقت پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار را به‌ویژه در ایستگاه‌هایی با فراوانی بالا نظیر آبادان، به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. این مدل با استفاده از قابلیت الگوریتم PSO در تعیین خودکار و بهینه پارامترهای حساس مدل KNN، توانست عملکرد پیش‌بینی را نسبت به مدل پایه بهبود دهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که تلفیق الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاووشی مانند PSO با مدل‌های داده‌محور ساده نظیر KNN نه تنها موجب افزایش دقت و کارایی پیش‌بینی در مناطق پرچالش اقلیمی می‌شود، بلکه می‌تواند پایداری و تعمیم‌پذیری این مدل‌ها را در شرایط متغیر اقلیمی و مکانی نیز ارتقاء دهد؛ بنابراین، استفاده از چنین رویکردهای ترکیبی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای پیش و مدیریت بهتر مخاطرات اقلیمی از جمله طوفان‌های گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراکاووشی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، طوفان گرد و غبار، مدل‌های ترکیبی، هوش مصنوعی.

استناد: انصاری قوجقار، م؛ و محمدی، ه (۱۴۰۵). توسعه مدل ناپارامتریک K نزدیک‌ترین همسایه با کاتالیزور فراابتکاری PSO به منظور مدل‌سازی طوفان‌های گرد و غباری در غرب ایران. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز. ۱۰۶-۸۵.

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

گرد و غبار جوی یکی از پدیده‌های رایج اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست، سلامت انسان و سامانه‌های اقتصادی داشته باشد. ذرات گرد و غبار عمدتاً توسط فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سراسر جهان تولید می‌شوند. برآورد می‌شود که انتشار گرد و غبار جهانی حدود ۳۰۰۰ میلیون تن در سال است که مقدار قابل توجهی از این گرد و غبار منتشر شده در اقیانوس‌ها رسوب می‌کند. با این حال، چنین برآوردهایی در مطالعات مختلف از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلیون تن متغیر است (Shao, 2008). بزرگترین منابع انتشار گرد و غبار معدنی در جهان در صحرای بزرگ آفریقا، خاورمیانه و مناطق بیابانی مرکزی تا شرق آسیا قرار دارند (Xiong et al., 2020). برآورد می‌شود که نرخ سالانه انتشار گرد و غبار در این مناطق، که به آن کمربند گرد و غبار نیز گفته می‌شود، به ۱۳۰۰-۱۰۰۰ میلیون تن برسد که بیش از سه چهارم از انتشار گرد و غبار جهانی را به خود اختصاص دهد (Ginoux et al., 2012). با توجه به مناطق وسیع خشک، خاورمیانه به‌طور مکرر شاهد وقوع طوفان‌های گرد و غبار است. بر اساس گزارش سال ۲۰۲۲ سازمان جهانی هواشناسی، چهار کانون اصلی در این منطقه که بیشترین فراوانی طوفان‌های گرد و غبار را تجربه می‌کنند، شامل: (۱) شمال سودان و جنوب مصر، (۲) شبه‌جزیره عربستان (به‌ویژه عربستان سعودی)، (۳) بین‌النهرین (عراق و شرق سوریه) و (۴) منطقه فلات ایران تا شمال پاکستان و افغانستان است (WMO, 2022). کشورهای سودان، عربستان سعودی، عراق، ایران، افغانستان و پاکستان درون این مناطق قرار دارند و به‌طور منظم طوفان‌های گرد و غبار را تجربه می‌کنند. با این حال، توزیع زمانی و مکانی این حوادث در مناطق مختلف یکسان نیست (Rezazadeh et al., 2013). پنج

منطقه در ایران وجود دارد (دشت خوزستان در جنوب غربی ایران، دشت ساحلی خلیج فارس، قسمت غربی ایران، منطقه طبس در قسمت مرکزی شرقی ایران و منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران) که طوفان‌های گرد و غبار در آن‌ها به‌طور مکرر اتفاق می‌افتد (Alizadeh-Choobari et al., 2016). با این وجود، به‌طور کلی پذیرفته شده است که مقدار قابل توجهی از ذرات گرد و غبار در ایران از منابع فرامرزی، به‌ویژه همسایگان غربی مانند عراق و سوریه منتشر می‌شود (Shahsavani et al., 2012; Ashrafi et al., 2014). طوفان‌های گرد و غبار زمانی رخ می‌دهند که سرعت باد در مناطق خشک و بیابانی (بین ۶/۵ تا ۷ متر بر ثانیه) از آستانه فرسایش عبور کند، که موجب افزایش تعداد ذرات خاک معلق در هوا می‌شود (Namdari et al., 2021). بر اساس تعریف سازمان جهانی هواشناسی^۱، طوفان‌های گرد و غبار ناشی از آشفته‌گی‌های جوی هستند که باعث ورود حجم بالایی از گرد و غبار به جو شده که در نتیجه آن دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش می‌یابد (Goudie & Middleton, 2006). از طرف دیگر طوفان‌های گرد و غبار پدیده‌های جوی فاجعه‌باری هستند که به شدت بر اقتصاد، محیط‌زیست، سلامت (بیماری‌های تنفسی حاد) و محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارند (Rashki et al., 2021). افزایش وقوع این پدیده در مناطق مختلف جهان از جمله ایران، توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده و منجر به اجرای پروژه‌های پژوهشی متعدد در این زمینه شده است. به عنوان مثال، Razavi-Termeh و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای برای شناسایی وقوع گرد و غبار و تهیه نقشه حساسیت به گرد و غبار^۲ (DSM) در استان بوشهر، از تصاویر MODIS و مدل TabNet استفاده شد. این مدل با

اثربخشی مدل ترکیبی در مدیریت نایستایی و پیچیدگی داده‌های AOD تأکید دارد (Panicker & Valarmathi, 2025).

روش‌های سنتی پیش‌بینی فراوانی طوفان‌های گرد و غبار عمدتاً بر مشاهده و تحلیل آماری داده‌های هواشناسی گذشته و حال برای شناسایی الگوها و روندها تمرکز داشته‌اند (Albugami et al., 2019; Dar et al., 2022) و همچنین از مدل‌های عددی اقلیمی برای شبیه‌سازی شرایط جوی بهره گرفته‌اند (Akhlaq et al., 2012). با این حال، عوامل پیچیده و پویایی مانند منابع گرد و غبار، پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی، نیاز به رویکردی جامع‌تر از روش‌های سنتی دارند (Middleton & Goudie, 2001). پیشرفت‌های اخیر در پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار استفاده از روش‌های یادگیری ماشین را دربرگرفته‌اند (Alshammari et al., 2022). در همین راستا، بهره‌گیری از مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و فراگیری عمیق، به عنوان ابزارهایی قدرتمند در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه گرد و غبار را به خود جلب کرده است. این مدل‌ها با توانایی بالا در شناسایی الگوها و روابط پنهان میان متغیرهای متعدد محیطی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر وقوع و شدت طوفان‌های گرد و غبار را فراهم می‌سازند (Alshammari et al., 2024).

به عنوان مثال، در یکی از مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک ایران، نه مدل مختلف یادگیری ماشین از جمله SVM، KNN، RF و XGBoost برای پیش‌بینی شاخص طوفان گرد و غبار^{۱۱} (DSI) در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ به‌کار گرفته شد و نتایج نشان داد که روش

کمک سه الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات^۱ (PSO)، بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۲ (GWO) و جستجوی بازی‌های گرسنگی^۳ (HGS) بهبود یافت. نتایج نشان داد که مدل TabNet-HGS با مقادیر AUC برابر ۰/۹۹۴ و R² برابر ۰/۹۴۷، بالاترین دقت را در پیش‌بینی حساسیت به گرد و غبار دارد. این تحقیق نشان داد که ادغام الگوریتم‌های بهینه‌سازی با مدل TabNet دقت مدل‌سازی حساسیت به گرد و غبار را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Razavi-Termeh et al., 2024). همچنین در مطالعه‌ای دیگر که توسط Ansari Ghojghar و همکاران (۲۰۲۰) صورت گرفت، عملکرد دو مدل ترکیبی W-SVM^۴ و AF-SVM^۵ با مدل SVM در پیش‌بینی شاخص فراوانی روزهای همراه با گرد و غبار^۶ (FDS) استفاده از داده‌های ۴۰ ساله پنج ایستگاه سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد مدل ترکیبی موجک-ماشین بردار پشتیبان (W-SVM) با مقادیر بالای ضریب تبیین (تا ۰/۹۸۴) و ضریب نش ساتکلیف (تا ۰/۹۶۵) نسبت به سایر مدل‌ها دقت بهتری در پیش‌بینی این شاخص دارد. در تحقیق دیگری، مدلی ترکیبی به نام PSOSARIMA-PSOSVR برای پیش‌بینی عمق نوری آئروسول^۷ (AOD) ارائه شده است که با تلفیق قابلیت‌های مدل خطی SARIMA^۸ و مدل غیرخطی SVR^۹ و بهینه‌سازی پارامترها با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، توانسته است دقت پیش‌بینی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این مدل با داده‌های ماهواره‌ای MODIS در شمال هند (۲۰۱۹-۲۰۰۱) آزمایش شد و نسبت به مدل‌های منفرد SARIMA، SVR^{۱۰} و LSTM^{۱۰} عملکرد بهتری نشان داد و بر

7- Aerosol Optical Depth

8- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average

9- Support Vector Regression

10- Long Short-Term Memory

11- Dust Storm Index

1- Particle Swarm Optimization

2- Grey Wolf Optimizer

3- Hunger Games Search

4- Support Vector Machine-Wavelet

5- Support Vector Machine-artificial plants algorithm

6- Frequency of Dust Storm Days

این تحقیق با هدف توسعه رویکردهای مدرن پیش‌بینی شاخص FDSM، بر مبنای به‌کارگیری دو مدل یادگیری ماشین، شامل KNN و نسخه بهبود یافته‌ی آن با بهینه‌سازی ازدحام ذرات (KNN-PSO)، انجام شده است. به این منظور، داده‌های ۲۶ ایستگاه سینوپتیک در غرب و جنوب‌غرب ایران، واقع در ۱۱ استان، طی دوره بلندمدت ۴۰ ساله (۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در نیمه‌غربی کشور را نشان می‌دهد. اطلاعات به‌کار رفته شامل داده‌های ساعتی دید افقی و کدهای طبقه‌بندی شده طبق استانداردهای سازمان جهانی هواشناسی (WMO) است. در این داده‌ها، مشاهدات وضعیت جوی هر سه ساعت یک‌بار (روزانه هشت بار) ثبت شده و پدیده‌های آب‌وهوایی در قالب ۱۰۰ کد مختلف (از ۰ تا ۹۹) گزارش شده‌اند که از این میان، ۱۱ کد مختص پدیده‌های مرتبط با گرد و غبار است (O'Loingsigh *et al.*, 2014). بر اساس دستورالعمل‌های سازمان جهانی هواشناسی، اگر در دست‌کم یکی از گزارش‌های سه‌ساعته یک روز، یکی از کدهای مربوط به گرد و غبار (کدهای ۰۶، ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸) ثبت شده باشد و همزمان دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر گزارش شود، آن روز به‌عنوان «روز گرد و غباری» شناخته می‌شود (Mohammadi, 2015). با توجه به اینکه داده‌های اولیه شامل کلیه پدیده‌های هم‌دید بود، در گام نخست، کدهای مربوط به گرد و غبار استخراج و جداسازی شد (Goudie & Middleton, 2006).

الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایگی

الگوریتم KNN برای پیش‌بینی به شناسایی الگوهای مشابه در داده‌های تاریخی متکی است و برای عملکرد مناسب نیاز به داده‌های کافی و بلندمدت دارد. این مدل تنها قادر به درون‌یابی بین مقادیر مشاهده‌شده گذشته

میانگین‌گیری از مدل‌ها دقت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد دارد. همچنین، فاکتورهایی مانند سرعت باد و شاخص پوشش گیاهی به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع گرد و غبار شناسایی شدند (Ebrahimi-Khusfi *et al.*, 2021). با این حال، استفاده از الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایگی^۱ (KNN)، به‌ویژه در ترکیب با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند PSO برای بهبود عملکرد در پیش‌بینی FDSM، تاکنون به‌ندرت و به‌صورت محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برخی تحقیقات مشابه در حوزه‌های دیگر نشان داده‌اند که بهینه‌سازی پارامترهای KNN با PSO می‌تواند دقت مدل را به شکل قابل‌توجهی افزایش دهد (Bui *et al.*, 2020; Kadry & Ismael, 2019). با توجه به افزایش فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار در سال‌های اخیر و تأثیرات گسترده آن بر سلامت عمومی، کشاورزی و زیرساخت‌ها، ضرورت توسعه مدل‌های دقیق و قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی این پدیده بیش از پیش احساس می‌شود. در این میان، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محدوده جنوب غرب ایران، روندی افزایشی در تعداد روزهای گرد و غباری و شدت آن‌ها طی دو دهه اخیر مشاهده شده است که زنگ خطری جدی برای ساکنان و منابع طبیعی این منطقه محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، ارائه یک مدل داده‌محور دقیق و کارآمد برای پیش‌بینی وقوع طوفان‌های گرد و غبار است که بر پایه الگوریتم KNN بنا شده و با استفاده از الگوریتم PSO به‌صورت خودکار تنظیم و بهینه‌سازی می‌شود. این رویکرد، با انتخاب بهینه پارامترها و متغیرهای مؤثر، تلاش دارد دقت پیش‌بینی را افزایش داده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های مؤثرتر در مدیریت مخاطرات اقلیمی و زیست‌محیطی باشد.

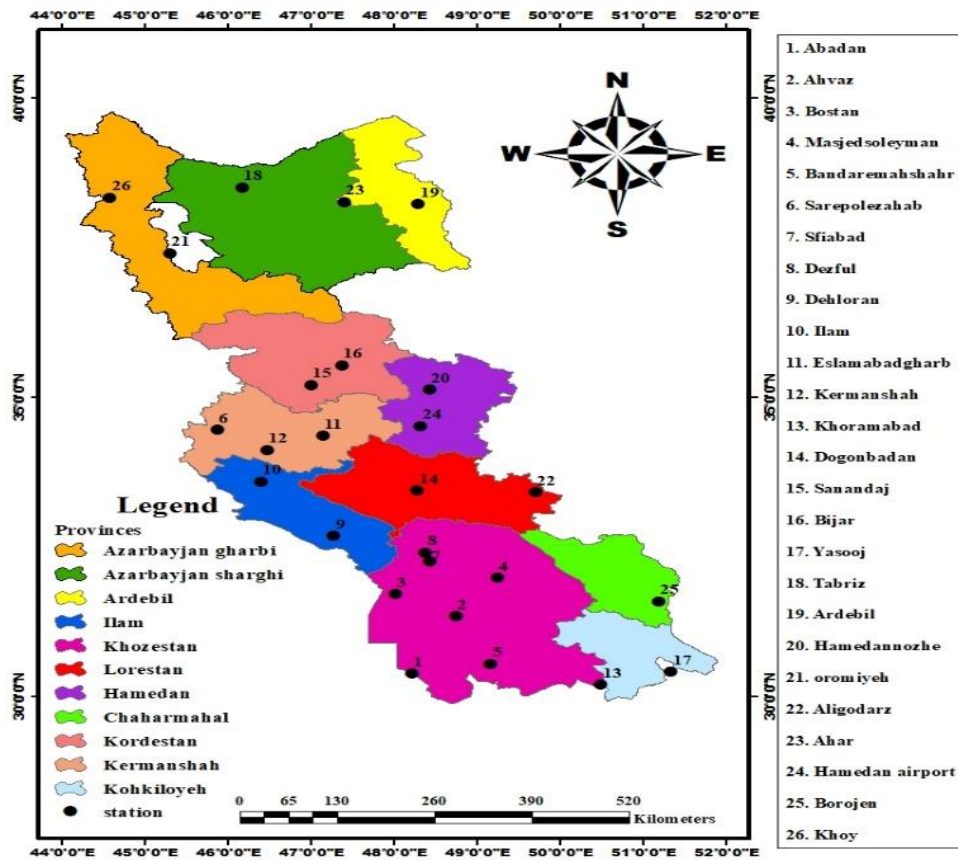
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و منابع داده‌ای

1- K-Nearest Neighbors

ممکن است باعث بروز خطاهای قابل توجه شود (KarAmooz & Araghi-Nejad, 2015).

است و نمی تواند مقادیری خارج از بازه تاریخی (برون یابی) تولید کند. از این رو، استفاده از آن با داده های کوتاه مدت یا برای پیش بینی مقادیر غیرحدی



شکل ۱- ایستگاه های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

Figure 1- The stations studied in the present research

استفاده از روش KNN به صورت زیر است (KarAmooz & Araghi-Nejad, 2015):

۱- ماتریس بردار سطری m ستونه مقادیر متغیرهای پیش بینی کننده X_j در زمان t به صورت رابطه (۱) قابل تعریف است:

$$Pr_{jt} = (X_{jt}) \quad j = 1 \dots m \quad (1)$$

ماتریس m ستونه و n سطری از مقادیر متغیرهای پیش بینی کننده X_j در سری زمانی تاریخی به صورت رابطه (۲) است:

$$Pr_{j,(t-i)} = (X_{j,(t-i)}) \quad j = 1 \dots m, i = 1 \dots n \quad (2)$$

در الگوریتم KNN، توزیع مقادیر پیش بینی شده با استفاده از تابع کرنل به صورت ناپارامتری برآورد می شود. این مدل با مشاهده متغیرهای مستقل فعلی، به دنبال الگوهای مشابه در داده های تاریخی می گردد و رویدادهای گذشته در این الگوها را به عنوان حالت های محتمل برای شرایط فعلی در نظر می گیرد. احتمال وقوع هر رویداد بر اساس میزان شباهت بین شرایط فعلی و داده های تاریخی تعیین می شود. دو عامل مهم در به کارگیری روش KNN، تعداد همسایه ها (k) و وزن پیش بینی کننده ها (W_j) هستند. براساس توضیحات ارائه شده، الگوریتم انجام پیش بینی با

می‌شود که تکرار این مراحل تا کسب پاسخ مطلوب ادامه خواهد یافت (Shi, 2001).

الگوریتم ترکیبی KNN-PSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، روشی نوین و سریع برای کاهش ابعاد داده‌ها از طریق تبدیل ماتریس اولیه به ماتریسی با ابعاد کمتر است (Shafiee & Nakhaei, 2018). هدف این مقاله بررسی امکان استفاده از PSO و وزن‌دهی به همسایه‌های الگوریتم KNN، هم‌زمان با کاهش خطای داده‌های اولیه و خطای دسته‌بندی KNN می‌باشد. الگوریتم PSO با بهره‌گیری از چندین نقطه جستجو و به‌کارگیری مفاهیم Pbest و Gbest، قابلیت جستجوی سراسری در مسائل پیوسته و گسسته را دارد، هرچند در جستجوی محلی ممکن است به بهینه محلی محدود شود. در این پژوهش، با ترکیب PSO و KNN الگوریتم جدیدی با عنوان PSO-WeightedKNN ارائه شده است. در این روش، ابتدا ابعاد داده کاهش یافته، سپس با استفاده از PSO به داده‌ها وزن‌دهی می‌شود تا فاصله بین داده ورودی و همسایه‌ها بهینه شده و خطای دسته‌بندی کاهش یابد. تابع هدف PSO بر اساس دقت الگوریتم KNN تعریف شده است. همانطور که در شکل (۲) آمده، تابع شایستگی برای الگوریتم PSO با استفاده از کارایی الگوریتم KNN تعریف می‌شود. بدین صورت که در ابتدا وزن‌های تصادفی به ذره‌ها یا همان همسایه‌ها داده می‌شود و سپس این وزن‌های تصادفی بر روی k همسایه داده تست، اعمال شده و عمل دسته‌بندی بر روی داده موردنظر انجام می‌گیرد. میزان خطای دسته‌بندی به عنوان $fitness$ روی الگوریتم PSO از قبیل مکان ذره و سرعت ذره و همچنین Gbest و Pbest به روزرسانی می‌شوند و این روند تا یافتن، بهترین وزن برای همسایه‌ها که منجر به کمینه شدن میزان خطا و بیشینه شدن دقت دسته‌بندی است، ادامه می‌یابد

با استفاده از تابع فاصله‌سنجی $Dist$ ، فواصل بین بردار $Pr_{j,t}$ با سطرهای ماتریس $Pr_{j,(t-i)}$ به‌صورت رابطه (۳) استخراج می‌گردد.

$$Dist(t-i) = f(W_j, X_{j,(t-i)}, X_{jt}) \quad (3)$$

که در این رابطه اندیس j نشان‌دهنده متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و اندیس i بیان‌کننده گام زمانی در سری تاریخی است. مقادیر W_j ، وزن‌هایی است که برای پیش‌بینی‌کننده‌ها در نظر گرفته می‌شود.

۲- از یک تابع کرنل گسسته برای وزن‌دهی به همسایه‌ها استفاده می‌شود. Yakowitz (۱۹۸۵)، تابع کرنل طبق رابطه (۴) را پیشنهاد داده است:

$$K(Dist(t-i)) = \frac{1/Dist(t-1)}{\sum_{i=1}^k 1/Dist(t-i)} \quad (4)$$

در این روش، نزدیک‌ترین همسایه‌ها بر اساس وزن، از ۱ تا K رتبه‌بندی می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که همسایه با وزن بیشتر، رتبه پایین‌تری دارد. در صورت برابر بودن وزن، همسایه‌ای که فاصله زمانی کمتری با زمان پیش‌بینی دارد، رتبه بهتری می‌گیرد. یکی از چالش‌های این روش، تعیین تعداد بهینه همسایه‌ها برای پیش‌بینی دقیق‌تر است. در نهایت مقدار پیش‌بینی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$D(t) = \sum_{i=1}^K k(Dist(t-i)) \times D(t-i) \quad (5)$$

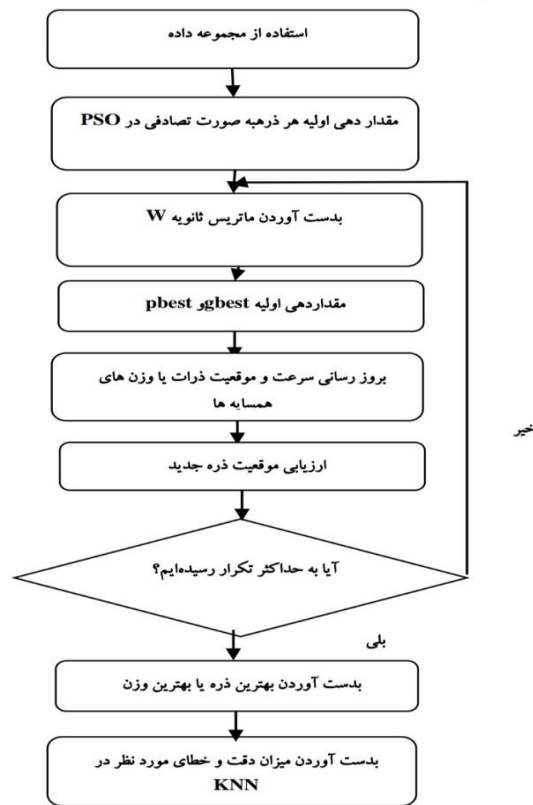
که در این رابطه $D(t-i)$ ، مقدار متغیر وابسته در زمان $t-i$ و $D(t)$ مقدار متغیر وابسته در زمان t است.

الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی الهام گرفته از طبیعت می‌باشد. چارچوب این الگوریتم که تعدادی ذره را شامل می‌شود که در فضای جستجوی تابع هدف مسئله باید کمینه شوند. مقدار تابع هدف توسط هر ذره در موقعیت فعلی خود محاسبه می‌شود، سپس بهترین موقعیت قبلی و اطلاعات یک یا چند عدد از بهترین ذرات با استفاده از ترکیب اطلاعاتی که در اختیار قرار گرفته، مشخص شده و در نهایت جهتی برای حرکت انتخاب می‌شود. هر ذره جهتی را برای حرکت اتخاذ می‌کند و بعد از حرکت، یک مرحله از الگوریتم تمام

سایز ماتریس ثانویه را هم داراست و بدین ترتیب می-توان تصمیمی در این باره اتخاذ نمود که بهترین ماتریس ثانویه در نظر گرفته شود. در شکل (۲) مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی آمده است.

(Chen et al., 2015). تعداد تکرار، تعداد ذرات و نیز تعداد همسایه ها در این الگوریتم قابل تغییر می باشد و به همین دلیل می توان بهترین مقدار مناسب برای هر پارامتر را کشف نمود، همچنین الگوریتم قابلیت تغییر



شکل ۲- مراحل انجام تکنیک PSO-WeightedKNN

Figure 2- The steps for implementing the PSO-WeightedKNN technique

جهت شبیه سازی و پیش بینی شاخص FDS، دو فرامدل مختلف شامل KNN و مدل ترکیبی KNN- PSO مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور، از داده های دید افقی و کدهای گزارش های هواشناسی با تأخیر زمانی سه ساعته طی یک دوره ۴۰ ساله استفاده شد. پس از استخراج شاخص FDS، ۷۰ درصد داده ها برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد آن برای آزمون مدل ها به کار گرفته شد. در این فرآیند، با بهره گیری از شاخص های نیکویی برازش، بهترین عملکرد مدل ها در هر مرحله پیش بینی انتخاب شد. برای پیش بینی مقادیر فصل آتی، از اطلاعات یک تا چهار فصل گذشته شاخص FDS استفاده گردید. در

در الگوریتم پایه PSO، جمعیت اولیه ذرات به صورت تصادفی و یک بعدی تولید می شود؛ در الگوریتم پیشنهادی نیز همین روند رعایت شده، با این تفاوت که مقدار k (تعداد همسایه ها) به عنوان ستون آخر به هر ذره اضافه شده است. این ذرات در واقع وزن های الگوریتم KNN وزن دار را تشکیل می دهند. از ابتدا می توان ماتریس وزن ها (W) را تولید و برای دسته بندی آماده کرد. سپس الگوریتم با استفاده از این وزن ها و تعداد متغیر همسایه ها، فرآیند دسته بندی را تکرار می کند.

مدل های پیش بینی

طوری که به ترتیب از سه و چهار فصل پیشین برای پیش‌بینی مقادیر آینده استفاده شد. روابط (۶) تا (۹)، نحوه ساخت این مدل‌های پیش‌بینی را تشریح می‌کنند. همچنین، در شکل (۳) چگونگی انتخاب تعداد فصل‌های گذشته برای پیش‌بینی فصل آینده نمایش داده شده است.

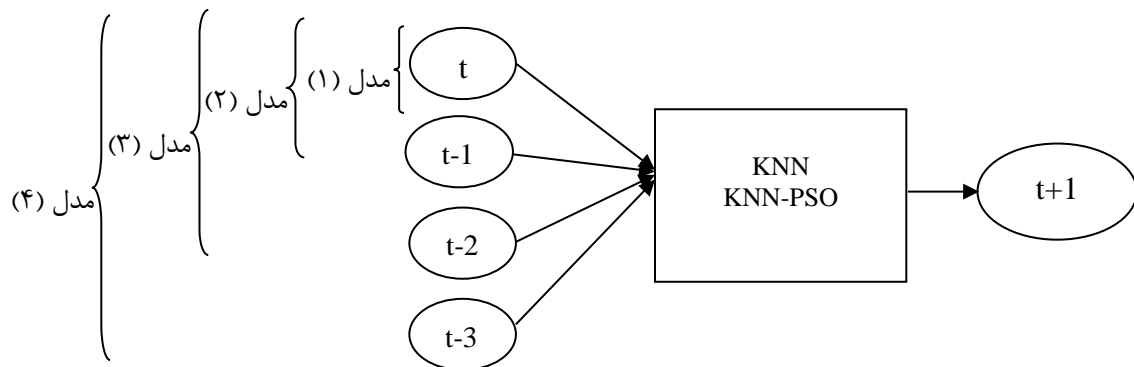
مدل اول، پیش‌بینی بر اساس مقدار شاخص در یک فصل گذشته انجام شد؛ بدین صورت که مقدار FDS_D در فصل t برای پیش‌بینی مقدار فصل t+1 به کار رفت. در مدل دوم، داده‌های مربوط به دو فصل گذشته به عنوان ورودی پیش‌بینی فصل آینده لحاظ شدند. همین روند برای مدل‌های سوم و چهارم نیز ادامه یافت، به

$$FDS_{D(t+1)} = f(FDS_{D(t)}) \quad \text{مدل ۱} \quad (۶)$$

$$FDS_{D(t+1)} = f(FDS_{D(t)}, FDS_{D(t-1)}) \quad \text{مدل ۲} \quad (۷)$$

$$FDS_{D(t+1)} = f(FDS_{D(t)}, FDS_{D(t-1)}, FDS_{D(t-2)}) \quad \text{مدل ۳} \quad (۸)$$

$$FDS_{D(t+1)} = f(FDS_{D(t)}, FDS_{D(t-1)}, FDS_{D(t-2)}, FDS_{D(t-3)}) \quad \text{مدل ۴} \quad (۹)$$



شکل ۳- چارچوب‌های به کار گرفته شده برای پیش‌بینی شاخص FDS
Figure 3- The frameworks used for predicting the FDS index

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه نتایج روش‌های مختلف، از چهار معیار ارزیابی یعنی ضریب همبستگی^۱ (r)، جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا^۳ (MAE) و نش-ساتکلیف^۴ (NS) استفاده شد. این معیارها به صورت روابط (۱۰) تا (۱۳) تعریف می‌شوند:

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}} \quad (۱۰)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - f_i)^2} \quad (۱۱)$$

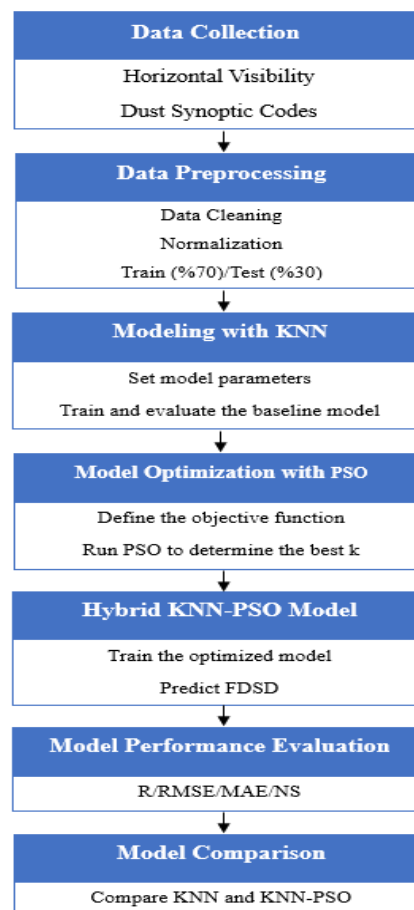
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - f_i| \quad (۱۲)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۳)$$

در این روابط، O_i مقادیر مشاهده شده در گام زمانی i ام، f_i مقادیر پیش‌بینی شده در گام زمانی i ام، \bar{O} میانگین

شده با کاهش فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار رابطه مستقیمی دارد. بدین معنی که با کاهش فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار، مقادیر معیارهای ارزیابی مورد استفاده نیز تقلیل می‌یابند. به نحوی که ضریب همبستگی برای داده‌های آزمایشی در فرامدل‌های KNN و KNN-PSO به ترتیب از مقادیر ۰/۶۴۵ و ۰/۹۹۷ به ۰/۶۱۱ و ۰/۹۷۷ کاهش یافته است. همچنین ضریب RMSE به ترتیب از ایستگاه آبادان تا خوی برای فرامدل‌های ذکر شده از مقدار ۰/۴۳۷ و ۰/۱۱۳ به ۰/۴۷۶ و ۰/۱۳۳ و ضریب MAE نیز به ترتیب از مقدار ۰/۳۰۴ و ۰/۰۴۴ به ۰/۳۴۳ و ۰/۰۷۱ افزایش یافته است که نشان‌دهنده ضعیف شدن عملکرد فرامدل‌های هوش مصنوعی با کاهش فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در ایستگاه‌های مورد بررسی می‌باشد. با بررسی مقادیر معیارهای ارزیابی مدل‌های KNN و KNN-PSO در ۲۶ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه، مشاهده شد که استفاده از روش ترکیبی KNN-PSO در مقایسه با مدل انفرادی عملکرد بهتری در پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار داشته است که نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل‌های ترکیبی در بهبود دقت پیش‌بینی این پدیده اقلیمی می‌باشد. به طوری که مقادیر معیارهای ارزیابی r ، RMSE، MAE و NS در ایستگاه آبادان که فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار را در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر دارد به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۱۱۳، ۰/۰۴۴ و ۰/۹۸۱ و در ایستگاه خوی که ضعیف‌ترین ایستگاه از لحاظ فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر است به ترتیب ۰/۹۷۷، ۰/۱۳۳، ۰/۰۷۱ و ۰/۹۶۳ می‌باشند. اما در مدل انفرادی KNN مقادیر معیارهای ارزیابی r ، RMSE، MAE و NS در ایستگاه آبادان ۰/۶۵۴، ۰/۴۶۷، ۰/۳۴۳ و ۰/۶۸۳ و در ایستگاه خوی نیز به ترتیب ۰/۶۱۱، ۰/۴۷۶، ۰/۳۴۳ و ۰/۶۶۱ می‌باشند. با مقایسه نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از دو مدل KNN و KNN-PSO مشخص شد که ادغام الگوریتم PSO با مدل KNN به بهبود قابل توجه دقت

مقادیر مشاهده‌شده، \bar{f} میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده و n تعداد داده‌ها است. هر مدلی که دارای r و NS بیشتر و RMSE و MAE کمتر باشد از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. شکل (۴) فلوچارت انجام مراحل تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

Figure 4- Flowchart of the research process

نتایج و بحث

مدل‌سازی با فرامدل‌های یادگیری ماشین

جدول‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از مدل‌سازی شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار با بهره‌گیری از فرامدل‌های هوش مصنوعی KNN و KNN-PSO را ارائه می‌کنند. با توجه به اینکه در این جداول ترتیب ایستگاه‌ها از آبادان تا خوی به صورت نزولی بوده، می‌توان دریافت که کاهش عملکرد روش پیش‌بینی ذکر

یافته است که به نظر می‌رسد با توجه به شرایط آب و هوایی در منطقه مورد مطالعه، تأثیر شاخص FDSO فصل‌های قبل به‌منظور پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در فصل آینده، آنچنان قابل قبول نیست که دلیل آن را می‌توان عدم تأثیر ذرات به جامانده از طوفان‌های قبلی و فصل‌های گذشته بر شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غبار فصل آینده جستجو کرد. در نهایت با توجه به نتایج ذکر شده و با مقایسه معیارهای ارزیابی در دو روش پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار می‌توان استنباط کرد که استفاده از فرامدل ترکیبی پیشنهادی KNN-PSO توانسته است با بهینه‌سازی وزن همسایه‌ها در مدل KNN، موجب کاهش خطا و افزایش دقت پیش‌بینی در شرایط پیچیده‌تر اقلیمی شود. این موضوع بیانگر آن است که بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوچی در کنار مدل‌های پایه، می‌تواند پایداری و قدرت تعمیم مدل‌های پیش‌بینی را در مناطق حساس اقلیمی، به‌ویژه مناطق متأثر از طوفان‌های گرد و غبار، به‌طور معنی‌داری ارتقاء دهد که این موضوع با مطالعات Razavi-Termeh و همکاران (۲۰۲۴) و Panicker و Valarmathi (۲۰۲۵) مطابقت دارد. فرامدل ترکیبی پیشنهادی دارای قدرت پیش‌بینی بیشتری می‌باشد که می‌تواند جهت مدل‌سازی طوفان‌های گرد و غبار در سایر مناطق غرب کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

و کارایی پیش‌بینی شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار منجر شده است. این بهبود عملکرد به ویژه در ایستگاه‌هایی که فراوانی روزهای گرد و غباری بالاتری داشته‌اند، نظیر ایستگاه آبادان، محسوس‌تر بوده است. در جدول‌های ۱ و ۲، مدل‌های بهینه در پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار به ترتیب از ۱ تا ۴ شماره‌گذاری شده است. در نتیجه می‌توان استنباط کرد که انتخاب مدل ساده‌تر به‌عنوان مدل بهینه پیش‌بینی‌کننده در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه نتیجه بهتری را از خود نشان می‌دهد. به‌نحوی که برای پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در همه ایستگاه‌های مورد بررسی مدل شماره ۱ (با یک گام تأخیر) نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که در ساختار فرامدل‌های هوش مصنوعی در منطقه غرب و جنوب‌غربی کشور، استفاده از سوابق فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در فصل‌های قبل، موجب بهبودی چشمگیری در نتایج پیش‌بینی نمی‌شود. به‌طوری که در دوره آزمایش، با اعمال شاخص FDSO از چهار به یک فصل قبل، مقدار RMSE در فرامدل KNN-PSO در ایستگاه آبادان از ۰/۱۱۹ روز به ۰/۱۱۳ روز و در ایستگاه خوی از ۰/۱۴۶ روز به ۰/۱۳۳ روز کاهش یافت. در مقابل، در مدل پایه KNN، مقدار RMSE در ایستگاه آبادان از ۰/۴۴۱ روز به ۰/۴۳۷ و در ایستگاه خوی از ۰/۴۷۳ روز به ۰/۴۷۲ روز کاهش

جدول ۱- خروجی‌های مدل KNN و عوامل بهینه جهت پیش‌بینی شاخص FDSO

Table 1- The outputs of the KNN model and the optimal factors for predicting the FDSO index

داده‌های آموزشی				داده‌های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.754	0.273	0.421	0.711	0.683	0.304	0.437	0.654	1	آبادان
0.753	0.274	0.422	0.709	0.682	0.305	0.438	0.653		
0.753	0.275	0.423	0.709	0.681	0.307	0.439	0.651		
0.751	0.275	0.425	0.706	0.679	0.309	0.441	0.649		
0.753	0.274	0.423	0.708	0.682	0.306	0.438	0.652	2	اهواز
0.752	0.275	0.424	0.707	0.681	0.308	0.439	0.652		
0.751	0.276	0.425	0.706	0.679	0.309	0.441	0.651		
0.749	0.277	0.426	0.705	0.676	0.311	0.443	0.647		
0.751	0.275	0.425	0.707	0.681	0.308	0.439	0.651	1	بستان
0.749	0.276	0.426	0.706	0.679	0.311	0.441	0.649		

داده های آموزشی				داده های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.748	0.277	0.427	0.704	0.677	0.313	0.442	0.646	3	مسجد سلیمان
0.746	0.278	0.428	0.703	0.675	0.314	0.444	0.644	4	
0.749	0.276	0.426	0.705	0.679	0.309	0.441	0.651	1	
0.746	0.277	0.427	0.704	0.677	0.312	0.442	0.648	2	
0.745	0.278	0.428	0.702	0.676	0.315	0.443	0.644	3	بندر ماهشهر
0.744	0.279	0.429	0.702	0.674	0.316	0.445	0.643	4	
0.748	0.277	0.428	0.704	0.677	0.311	0.442	0.649	1	
0.746	0.278	0.429	0.703	0.675	0.313	0.443	0.647	2	
0.744	0.279	0.431	0.701	0.674	0.317	0.444	0.645	3	سرپل ذهاب
0.743	0.281	0.432	0.701	0.673	0.319	0.446	0.643	4	
0.747	0.279	0.431	0.702	0.675	0.313	0.443	0.647	1	
0.745	0.279	0.432	0.701	0.674	0.315	0.444	0.645	2	
0.743	0.281	0.433	0.701	0.673	0.318	0.445	0.643	3	صفی آباد
0.741	0.283	0.434	0.699	0.672	0.321	0.447	0.641	4	
0.746	0.281	0.432	0.698	0.674	0.314	0.444	0.645	1	
0.744	0.282	0.433	0.697	0.673	0.316	0.445	0.643	2	
0.741	0.282	0.435	0.697	0.672	0.319	0.446	0.641	3	دزفول
0.739	0.283	0.436	0.695	0.671	0.322	0.448	0.639	4	
0.745	0.282	0.433	0.696	0.673	0.315	0.445	0.643	1	
0.743	0.283	0.434	0.695	0.671	0.317	0.446	0.642	2	
0.741	0.284	0.436	0.695	0.669	0.321	0.448	0.638	3	دهلران
0.737	0.285	0.437	0.693	0.668	0.323	0.449	0.637	4	
0.744	0.283	0.435	0.694	0.671	0.316	0.446	0.642	1	
0.742	0.284	0.436	0.693	0.669	0.318	0.447	0.641	2	
0.739	0.285	0.438	0.691	0.667	0.322	0.449	0.639	3	ایلام
0.735	0.286	0.439	0.691	0.665	0.324	0.451	0.635	4	
0.734	0.284	0.436	0.693	0.669	0.317	0.447	0.641	1	
0.741	0.285	0.437	0.692	0.668	0.319	0.448	0.637	2	
0.738	0.287	0.439	0.689	0.665	0.313	0.451	0.634	3	کرمانشاه
0.734	0.288	0.441	0.688	0.664	0.325	0.452	0.632	4	
0.642	0.285	0.437	0.691	0.667	0.319	0.488	0.639	1	
0.739	0.286	0.438	0.688	0.666	0.321	0.449	0.636	2	
0.736	0.288	0.441	0.687	0.665	0.324	0.452	0.633	3	اسلام آباد غرب
0.733	0.289	0.442	0.686	0.664	0.327	0.453	0.631	4	
0.741	0.286	0.438	0.689	0.666	0.321	0.449	0.638	1	
0.738	0.287	0.439	0.686	0.655	0.322	0.451	0.635	2	
0.735	0.289	0.443	0.685	0.663	0.325	0.453	0.632	3	دوگنبدان
0.732	0.291	0.444	0.684	0.661	0.328	0.454	0.629	4	
0.739	0.288	0.439	0.688	0.665	0.322	0.451	0.635	1	
0.737	0.289	0.441	0.685	0.663	0.324	0.452	0.633	2	
0.735	0.292	0.444	0.683	0.661	0.327	0.454	0.631	3	خرم آباد
0.731	0.293	0.445	0.682	0.659	0.329	0.455	0.628	4	
0.738	0.289	0.441	0.686	0.663	0.324	0.452	0.634	1	
0.736	0.291	0.442	0.684	0.662	0.325	0.453	0.632	2	
0.733	0.293	0.445	0.682	0.659	0.328	0.455	0.629	3	سنندج
0.729	0.294	0.446	0.681	0.658	0.331	0.457	0.625	4	
0.737	0.291	0.442	0.685	0.661	0.325	0.453	0.633	1	
0.735	0.292	0.443	0.683	0.659	0.327	0.454	0.631	2	
0.732	0.294	0.446	0.681	0.657	0.329	0.456	0.627	3	بیجار
0.728	0.295	0.447	0.679	0.656	0.332	0.458	0.623	4	
0.736	0.293	0.443	0.684	0.658	0.327	0.454	0.631	1	
0.734	0.294	0.444	0.682	0.656	0.328	0.455	0.629	2	
0.731	0.295	0.447	0.678	0.654	0.331	0.457	0.625	3	یاسوج
0.726	0.296	0.448	0.677	0.653	0.333	0.459	0.621	4	
0.735	0.294	0.444	0.683	0.656	0.328	0.456	0.639	1	
0.733	0.295	0.445	0.681	0.655	0.329	0.457	0.627	2	
0.729	0.296	0.448	0.677	0.653	0.332	0.458	0.624	3	تبریز
0.725	0.297	0.449	0.676	0.651	0.334	0.461	0.619	4	
0.734	0.295	0.445	0.682	0.654	0.331	0.457	0.627	1	
0.733	0.296	0.447	0.679	0.653	0.332	0.458	0.625	2	
0.728	0.297	0.449	0.676	0.651	0.334	0.459	0.623	3	

داده‌های آموزشی				داده‌های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.725	0.298	0.451	0.674	0.648	0.335	0.462	0.621	4	اردبیل
0.734	0.296	0.446	0.681	0.669	0.332	0.458	0.625	1	
0.741	0.297	0.448	0.678	0.665	0.333	0.459	0.623	2	
0.738	0.298	0.451	0.675	0.664	0.335	0.461	0.621	3	
0.734	0.299	0.453	0.673	0.663	0.336	0.463	0.619	4	
0.741	0.297	0.447	0.679	0.667	0.334	0.459	0.623	1	همدان نوزه
0.739	0.298	0.449	0.677	0.663	0.335	0.461	0.622	2	
0.736	0.299	0.452	0.674	0.662	0.337	0.462	0.621	3	
0.733	0.301	0.454	0.672	0.661	0.339	0.464	0.618	4	
0.739	0.299	0.448	0.677	0.665	0.336	0.461	0.621	1	ارومیه
0.738	0.301	0.451	0.676	0.661	0.337	0.462	0.619	2	
0.735	0.302	0.453	0.673	0.661	0.339	0.463	0.617	3	
0.732	0.303	0.454	0.672	0.659	0.341	0.464	0.614	4	
0.738	0.301	0.449	0.675	0.667	0.338	0.463	0.619	1	الیگودرز
0.736	0.302	0.452	0.675	0.661	0.341	0.464	0.617	2	
0.734	0.304	0.454	0.672	0.659	0.342	0.465	0.615	3	
0.731	0.305	0.455	0.671	0.657	0.343	0.476	0.613	4	
0.736	0.302	0.451	0.673	0.663	0.339	0.464	0.617	1	اهر
0.735	0.303	0.452	0.672	0.660	0.342	0.466	0.615	2	
0.732	0.305	0.455	0.669	0.656	0.344	0.467	0.612	3	
0.729	0.306	0.456	0.668	0.655	0.345	0.469	0.611	4	
0.735	0.304	0.452	0.671	0.661	0.341	0.465	0.615	1	همدان هواپیمایی
0.734	0.305	0.453	0.669	0.659	0.343	0.467	0.613	2	
0.732	0.306	0.456	0.668	0.655	0.345	0.468	0.611	3	
0.728	0.307	0.457	0.666	0.653	0.347	0.471	0.609	4	
0.734	0.306	0.453	0.668	0.661	0.342	0.466	0.613	1	بروجن
0.733	0.307	0.454	0.667	0.658	0.344	0.469	0.612	2	
0.731	0.308	0.457	0.666	0.653	0.346	0.471	0.608	3	
0.727	0.309	0.459	0.665	0.652	0.348	0.472	0.607	4	
0.733	0.307	0.455	0.667	0.661	0.343	0.472	0.611	1	خوی
0.732	0.308	0.456	0.665	0.657	0.345	0.471	0.609	2	
0.729	0.309	0.458	0.664	0.657	0.347	0.472	0.605	3	
0.725	0.311	0.461	0.663	0.651	0.349	0.473	0.603	4	

جدول ۲- خروجی‌های فرامدل ترکیبی KNN-PSO و عوامل بهینه جهت پیش‌بینی شاخص FDSI

Table 2- The outputs of the KNN-PSO hybrid model and the optimal factors for predicting the FDSI index

داده‌های آموزشی				داده‌های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.983	0.043	0.112	0.998	0.981	0.044	0.113	0.997	1	آبادان
0.981	0.045	0.115	0.997	0.980	0.047	0.117	0.995	2	
0.980	0.049	0.116	0.995	0.978	0.051	0.118	0.994	3	
0.980	0.051	0.118	0.994	0.976	0.052	0.119	0.993	4	
0.982	0.045	0.112	0.997	0.981	0.045	0.113	0.996	1	اهواز
0.981	0.046	0.116	0.997	0.980	0.048	0.119	0.994	2	
0.980	0.049	0.117	0.994	0.976	0.051	0.119	0.993	3	
0.979	0.052	0.119	0.993	0.975	0.052	0.120	0.992	4	
0.982	0.046	0.112	0.997	0.980	0.046	0.113	0.997	1	بستان
0.981	0.048	0.117	0.997	0.980	0.048	0.118	0.994	2	
0.979	0.050	0.118	0.993	0.975	0.052	0.120	0.993	3	
0.978	0.053	0.121	0.991	0.974	0.053	0.121	0.990	4	
0.981	0.047	0.113	0.996	0.980	0.047	0.114	0.996	1	مسجد سلیمان
0.981	0.049	0.118	0.995	0.980	0.049	0.118	0.993	2	
0.979	0.051	0.119	0.993	0.975	0.052	0.120	0.993	3	
0.977	0.053	0.122	0.991	0.973	0.054	0.123	0.990	4	
0.981	0.047	0.113	0.995	0.980	0.047	0.114	0.995	1	

داده های آموزشی				داده های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.980	0.049	0.119	0.995	0.979	0.050	0.119	0.993	2	بندر ماهشهر
0.979	0.052	0.120	0.992	0.975	0.052	0.121	0.992	3	
0.976	0.054	0.123	0.991	0.972	0.055	0.124	0.990	4	
0.981	0.048	0.114	0.995	0.980	0.048	0.115	0.995	1	سرپل ذهاب
0.980	0.049	0.120	0.994	0.979	0.051	0.120	0.992	2	
0.978	0.053	0.121	0.991	0.974	0.053	0.121	0.991	3	
0.975	0.054	0.124	0.991	0.971	0.055	0.124	0.990	4	
0.980	0.048	0.114	0.994	0.979	0.048	0.115	0.994	1	صفی آباد
0.979	0.050	0.121	0.994	0.978	0.052	0.121	0.992	2	
0.977	0.054	0.122	0.990	0.974	0.054	0.122	0.990	3	
0.974	0.055	0.125	0.989	0.971	0.056	0.125	0.989	4	
0.979	0.049	0.115	0.994	0.978	0.050	0.116	0.994	1	دزفول
0.978	0.051	0.122	0.993	0.976	0.053	0.123	0.992	2	
0.977	0.055	0.123	0.989	0.973	0.056	0.124	0.989	3	
0.973	0.056	0.126	0.988	0.970	0.057	0.127	0.988	4	
0.978	0.051	0.115	0.993	0.977	0.052	0.117	0.992	1	دهلران
0.976	0.052	0.123	0.992	0.975	0.053	0.124	0.991	2	
0.976	0.056	0.124	0.989	0.973	0.057	0.125	0.988	3	
0.972	0.057	0.128	0.986	0.970	0.058	0.129	0.985	4	
0.978	0.052	0.116	0.992	0.977	0.053	0.117	0.991	1	ایلام
0.976	0.053	0.124	0.992	0.975	0.054	0.125	0.990	2	
0.975	0.057	0.125	0.988	0.972	0.058	0.126	0.987	3	
0.971	0.058	0.129	0.985	0.970	0.059	0.130	0.984	4	
0.977	0.053	0.117	0.991	0.976	0.054	0.118	0.990	1	کرمانشاه
0.976	0.054	0.125	0.991	0.975	0.055	0.126	0.989	2	
0.974	0.058	0.126	0.987	0.972	0.059	0.127	0.986	3	
0.970	0.059	0.129	0.984	0.969	0.061	0.131	0.983	4	
0.976	0.054	0.118	0.990	0.975	0.055	0.119	0.989	1	اسلام آباد غرب
0.976	0.055	0.126	0.990	0.975	0.056	0.127	0.989	2	
0.974	0.059	0.127	0.986	0.971	0.060	0.128	0.985	3	
0.969	0.060	0.131	0.984	0.968	0.062	0.132	0.982	4	
0.975	0.055	0.119	0.989	0.974	0.056	0.121	0.988	1	دوگنبدان
0.975	0.056	0.127	0.989	0.974	0.057	0.128	0.988	2	
0.973	0.061	0.129	0.985	0.971	0.062	0.129	0.984	3	
0.968	0.062	0.132	0.983	0.967	0.063	0.133	0.981	4	
0.975	0.056	0.121	0.989	0.973	0.057	0.122	0.987	1	خرم آباد
0.974	0.057	0.128	0.989	0.973	0.058	0.129	0.987	2	
0.972	0.062	0.131	0.983	0.960	0.063	0.132	0.982	3	
0.967	0.063	0.133	0.982	0.966	0.064	0.135	0.980	4	
0.974	0.057	0.122	0.988	0.972	0.058	0.123	0.987	1	سنندج
0.973	0.059	0.129	0.987	0.972	0.060	0.131	0.986	2	
0.971	0.063	0.132	0.981	0.969	0.064	0.133	0.980	3	
0.965	0.064	0.134	0.980	0.964	0.065	0.136	0.979	4	
0.973	0.058	0.123	0.987	0.971	0.059	0.124	0.986	1	بیجار
0.973	0.060	0.131	0.986	0.972	0.061	0.132	0.985	2	
0.970	0.064	0.133	0.980	0.968	0.065	0.134	0.979	3	
0.964	0.065	0.135	0.979	0.963	0.066	0.137	0.978	4	
0.972	0.059	0.124	0.986	0.970	0.060	0.125	0.985	1	یاسوج
0.972	0.061	0.132	0.984	0.970	0.062	0.133	0.983	2	
0.969	0.065	0.135	0.978	0.967	0.066	0.136	0.977	3	
0.962	0.066	0.136	0.978	0.961	0.067	0.137	0.976	4	
0.971	0.061	0.125	0.985	0.969	0.062	0.126	0.984	1	تبریز
0.970	0.062	0.133	0.983	0.969	0.063	0.134	0.982	2	
0.968	0.066	0.136	0.975	0.965	0.067	0.137	0.974	3	
0.961	0.067	0.137	0.975	0.960	0.068	0.138	0.974	4	
0.970	0.062	0.126	0.984	0.968	0.063	0.127	0.983	1	اردبیل
0.969	0.063	0.134	0.982	0.967	0.064	0.135	0.981	2	
0.967	0.067	0.137	0.974	0.964	0.068	0.138	0.973	3	
0.959	0.068	0.138	0.973	0.958	0.069	0.139	0.972	4	
0.969	0.063	0.126	0.983	0.967	0.064	0.128	0.982	1	همدان نوزه
0.968	0.063	0.135	0.981	0.966	0.064	0.136	0.980	2	

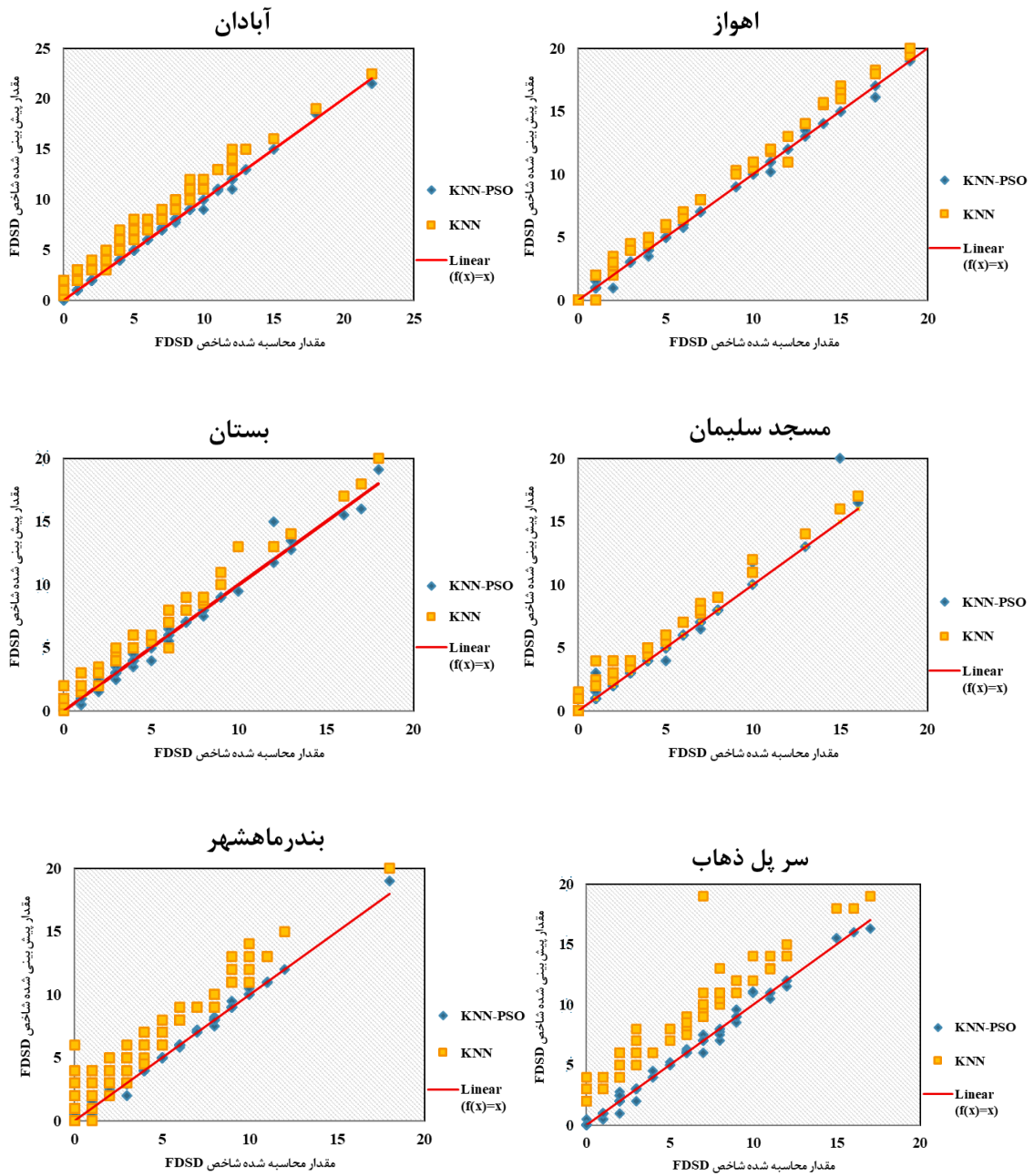
داده‌های آموزشی				داده‌های آزمایشی				مدل بهینه	ایستگاه
NS	MAE	RMSE	r	NS	MAE	RMSE	r		
0.965	0.068	0.137	0.973	0.964	0.069	0.139	0.972	3	ارومیه
0.958	0.069	0.139	0.972	0.957	0.071	0.140	0.971	4	
0.968	0.064	0.127	0.982	0.966	0.065	0.129	0.981	1	
0.966	0.065	0.136	0.981	0.965	0.066	0.137	0.980	2	
0.964	0.069	0.138	0.972	0.963	0.071	0.141	0.971	3	الیگودرز
0.957	0.071	0.140	0.971	0.955	0.072	0.142	0.970	4	
0.967	0.065	0.128	0.981	0.965	0.066	0.130	0.980	1	
0.965	0.066	0.136	0.980	0.964	0.067	0.138	0.979	2	
0.963	0.071	0.139	0.971	0.962	0.072	0.142	0.970	3	اهر
0.956	0.072	0.141	0.970	0.954	0.073	0.143	0.969	4	
0.967	0.066	0.129	0.980	0.964	0.067	0.131	0.979	1	
0.964	0.067	0.137	0.979	0.963	0.068	0.138	0.978	2	
0.962	0.072	0.141	0.970	0.960	0.073	0.143	0.970	3	همدان هواپیمایی
0.955	0.073	0.142	0.969	0.954	0.074	0.143	0.968	4	
0.966	0.067	0.130	0.979	0.964	0.068	0.131	0.978	1	
0.963	0.068	0.138	0.978	0.962	0.069	0.139	0.975	2	
0.961	0.073	0.141	0.969	0.960	0.074	0.143	0.965	3	بروجن
0.954	0.074	0.143	0.968	0.952	0.076	0.144	0.964	4	
0.966	0.068	0.131	0.979	0.964	0.069	0.132	0.977	1	
0.963	0.069	0.139	0.978	0.961	0.071	0.141	0.975	2	
0.960	0.074	0.142	0.967	0.959	0.075	0.143	0.965	3	خوی
0.953	0.075	0.144	0.967	0.951	0.077	0.145	0.963	4	
0.965	0.069	0.132	0.978	0.963	0.071	0.133	0.977	1	
0.962	0.071	0.141	0.976	0.960	0.072	0.142	0.974	2	
0.959	0.075	0.143	0.965	0.958	0.076	0.144	0.964	3	
0.951	0.076	0.145	0.965	0.950	0.078	0.146	0.962	4	

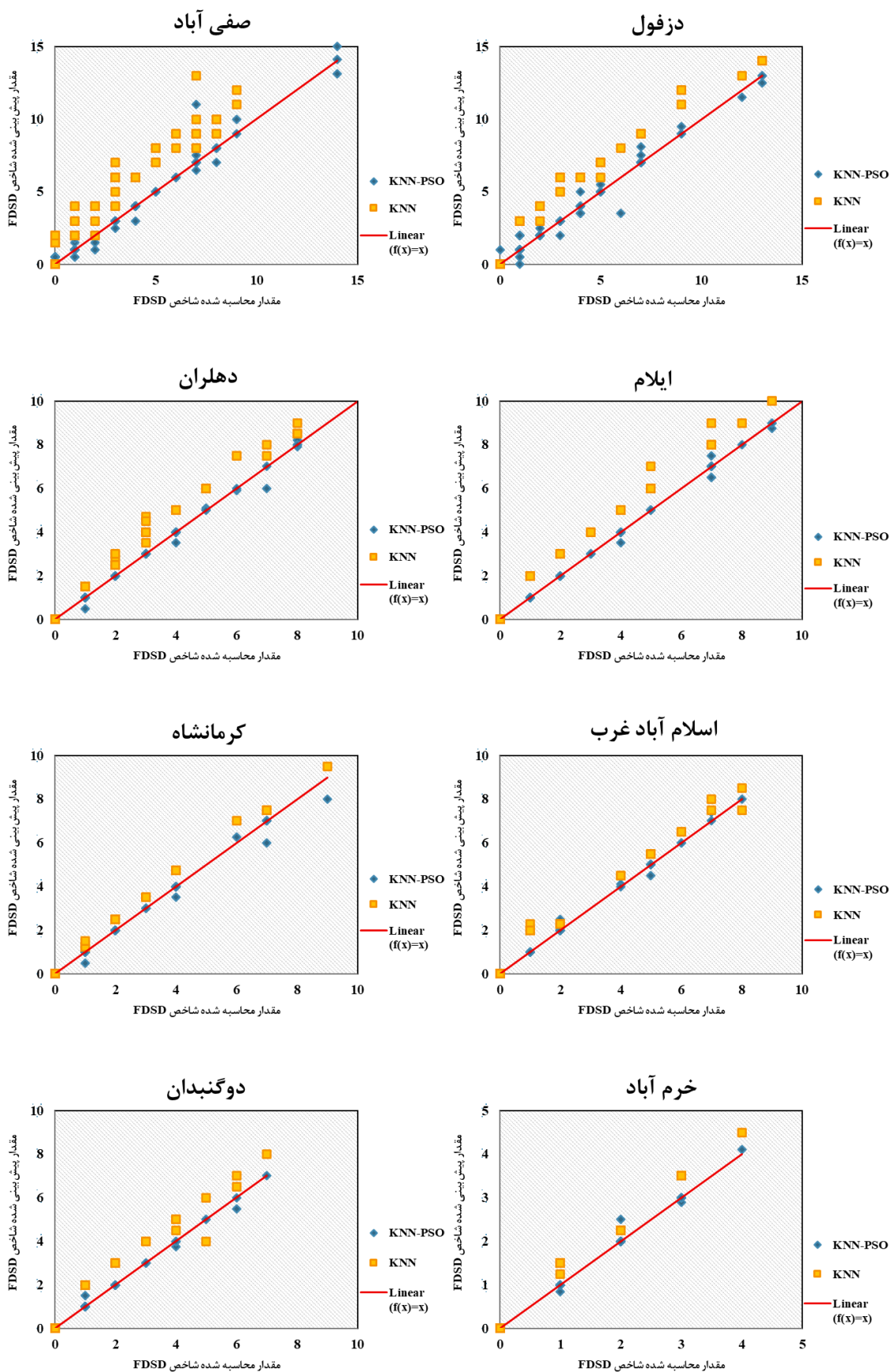
مقایسه عملکرد فرامدل‌های یادگیری ماشین

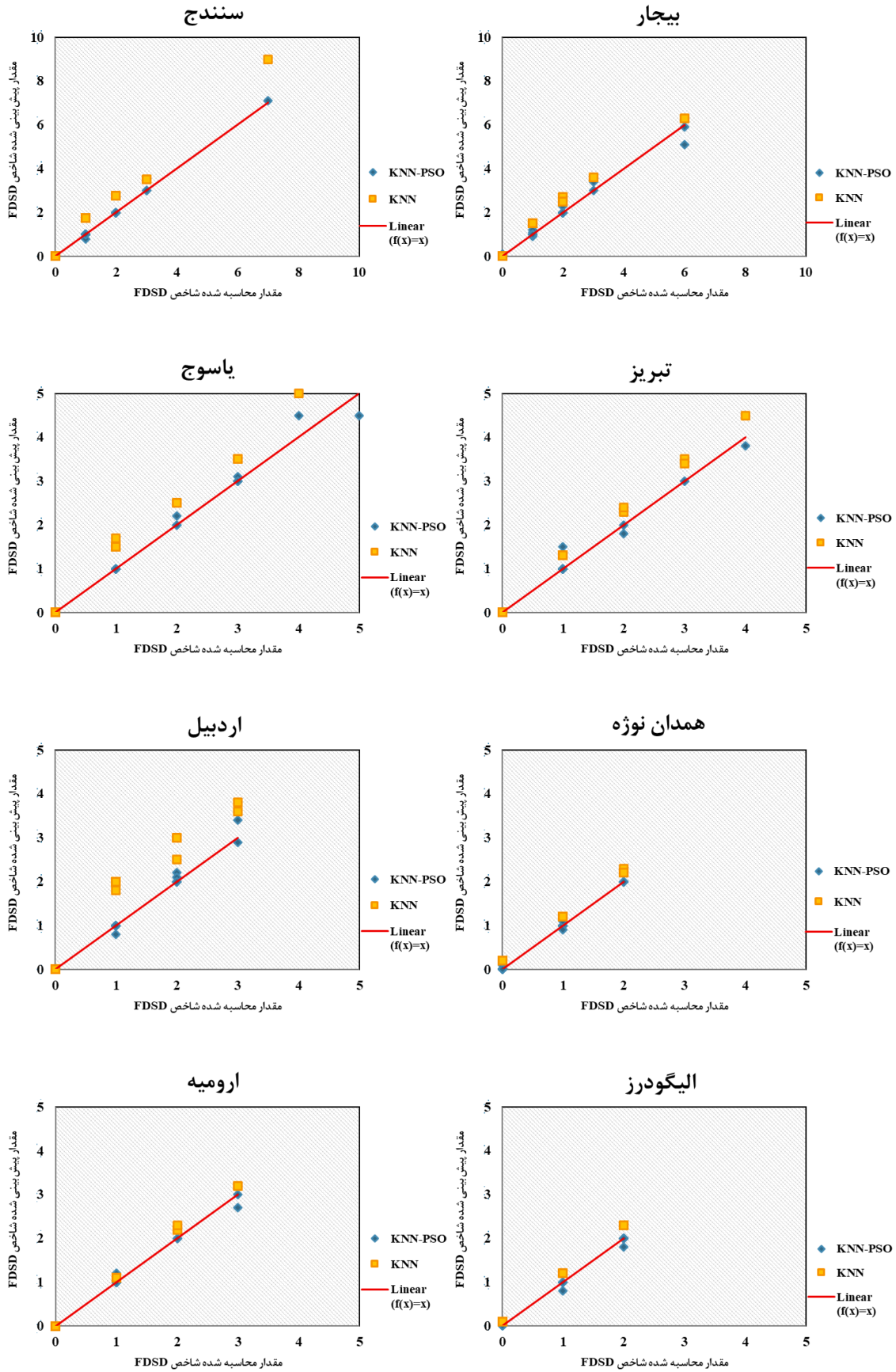
شکل (۵) مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSO را برای داده‌های آزمایش نشان می‌دهد. تمامی شکل‌ها بهبود عملکرد روش‌های مورد استفاده با افزایش فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار را به خوبی بیان می‌کنند؛ به طوری که ایستگاه آبادان به عنوان فراوان‌ترین ایستگاه موجود در منطقه مورد مطالعه، بهترین مطابقت را بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSO دارا می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص است، ارتباط بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، مسجد سلیمان، بستان، سرپل ذهاب و بندرماهشهر، با شیب تقریباً ۴۵ درجه می‌باشد و فرامدل ترکیبی KNN-PSO بیشترین مطابقت را با نیمساز ربع اول ($f(x)=x$) به خود اختصاص داده است

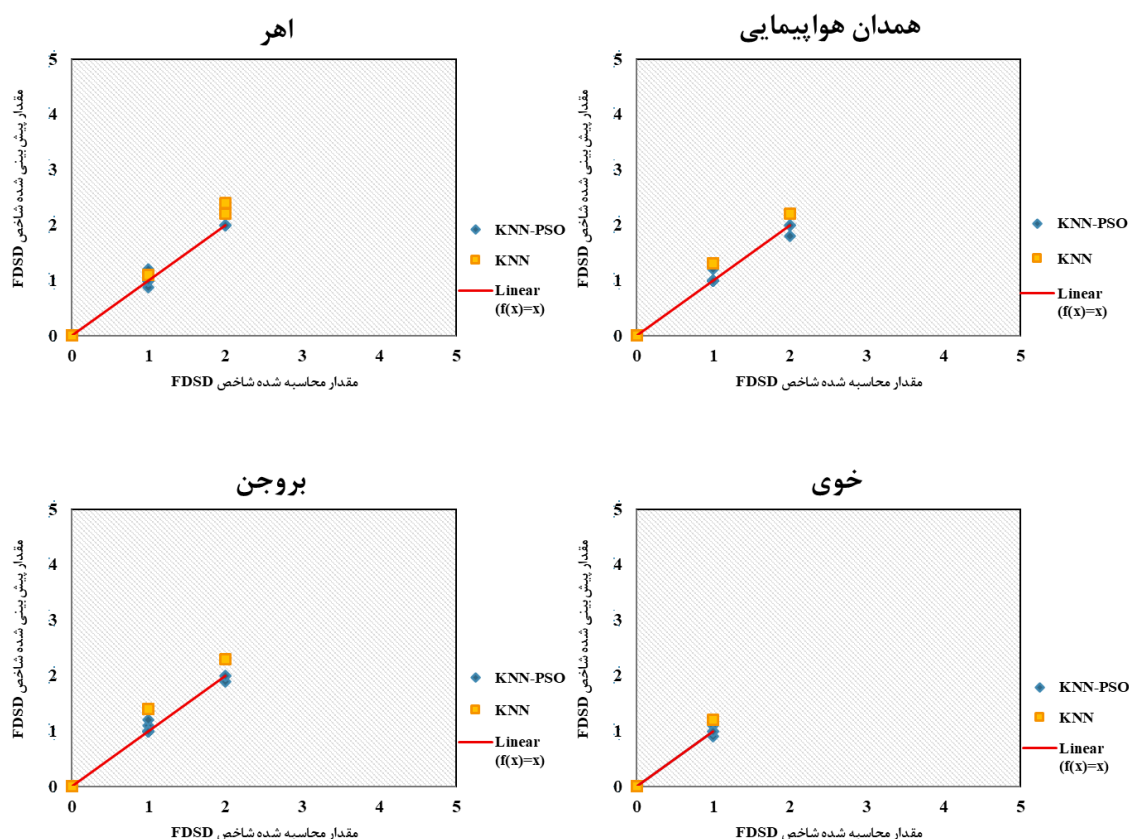
که این ویژگی می‌تواند تأکیدی بر راندمان بالا و کارایی مؤثر فرامدل ترکیبی KNN-PSO در مقایسه با مدل KNN به‌منظور پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در نیمه‌غربی کشور باشد. در شکل (۵) به خوبی ملاحظه می‌شود که با کاهش فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار میزان مطابقت مدل‌های به‌کار برده شده کاهش می‌یابد (با پیشروی از ایستگاه آبادان به سمت ایستگاه خوی). همچنین این شکل‌ها نیز بیانگر برتری فرامدل ترکیبی KNN-PSO در پیش‌بینی مقادیر FDSO می‌باشند که با وجود فراوانی کم شاخص FDSO در برخی از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه (بروجن و خوی) باز هم با نیمساز ربع اول مطابقت بیشتری دارد و کمترین پراکندگی را داراست. شایان ذکر است که به‌منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر و ارزیابی میزان انطباق مقادیر

مشاهداتی و پیش بینی شده، در تمامی شکل ها خط تابع $f(x)=x$ نیز ترسیم شده است.









شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSI در ایستگاه‌های نیمه غربی کشور

Figure 5- Comparison of observed and predicted FDSI index values at stations in the western half of the Iran

در این مطالعه با بهره‌گیری از فرامدل‌های یادگیری ماشین KNN و KNN-PSO به مدل‌سازی شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در ۲۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در ۱۱ استان در نیمه غربی کشور با جمعیت آماری بلندمدت ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که عملکرد این مدل‌ها رابطه مستقیمی با میزان فراوانی روزهای گرد و غباری در ایستگاه‌ها دارد، به طوری که در ایستگاه‌هایی با فراوانی بالاتر، دقت پیش‌بینی به طور محسوسی بیشتر بوده است.

مدل ترکیبی KNN-PSO در مقایسه با مدل انفرادی KNN توانست با بهینه‌سازی وزن همسایه‌ها، معیارهای ارزیابی را بهبود بخشد و دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. بررسی‌ها نشان داد که مدل پایه KNN در اکثر

نتیجه‌گیری کلی

در نیمه غربی ایران، به‌ویژه در مناطقی مانند استان خوزستان، طوفان‌های گرد و غبار به طور مکرر رخ می‌دهند. این پدیده‌ها عمدتاً به دلیل ترکیبی از عواملی چون شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک، نبود پوشش گیاهی مناسب، فعالیت‌های انسانی نظیر کشاورزی و دامداری و همچنین وقوع پدیده‌های طبیعی مانند خشکسالی‌های طولانی‌مدت و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهند. گرد و غبارها می‌توانند آثار منفی بسیاری بر سلامت انسان‌ها، کشاورزی، محیط‌زیست و فعالیت‌های اقتصادی داشته باشند. در این راستا، مدل‌سازی دقیق و پیش‌بینی زمان و شدت این طوفان‌ها اهمیت زیادی پیدا می‌کند تا بتوان تدابیر پیشگیرانه و مقابله‌ای مناسبی اتخاذ کرد.

به گونه ای که حتی در ایستگاه هایی با فراوانی کمتر، این مدل بیشترین تطابق با نیمساز ربع اول را داشت و کمترین پراکندگی را نشان داد.

در مجموع، یافته های این پژوهش بیانگر آن است که ترکیب الگوریتم های بهینه سازی فراکوشی نظیر PSO با مدل های پایه مانند KNN می تواند قدرت تعمیم و پایداری مدل های پیش بینی اقلیمی را در شرایط پیچیده و متغیر به طور معنی داری ارتقاء دهد؛ بنابراین، مدل ترکیبی پیشنهادی KNN-PSO به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش بینی فراوانی طوفان های گرد و غبار در سایر مناطق مستعد کشور نیز قابل پیشنهاد می باشد. همچنین با توجه به افزایش فراوانی این پدیده در سال های اخیر، استفاده از مدل های ترکیبی و بهینه سازی شده همچون KNN-PSO می تواند به طور چشمگیری در کاهش اثرات منفی آن ها بر محیط زیست و سلامت عمومی مؤثر باشد. در راستای ارتقاء دقت پیش بینی ها، پیشنهاد می شود که به کارگیری داده های فضایی و ماهواره ای، ادغام مدل های پیش بینی جوی و استفاده از رویکردهای نوین مانند مدل های عمیق تر، در دستور کار قرار گیرد. همچنین، با توجه به اهمیت پیش بینی دقیق در مقیاس های زمانی کوتاه مدت، به ویژه در مواقع بحرانی، توجه به توسعه مدل هایی برای پیش بینی های آنی می تواند به تصمیم گیری های سریع تر و کارآمدتر کمک کند.

ایستگاه ها عملکرد نسبتاً ضعیف تری دارد؛ به طوری که مقدار RMSE آن در ایستگاه های مورد مطالعه در بازه ای بین ۰/۴۳۷ تا ۰/۴۷۶ روز متغیر بوده و مقدار ضریب همبستگی نیز در محدوده ۰/۶۱ تا ۰/۶۵۴ قرار داشت. با توجه به این مقادیر، می توان نتیجه گرفت که مدل KNN به تنهایی از دقت قابل قبولی برای پیش بینی شاخص FDSO برخوردار نیست و دارای محدودیت هایی در تخمین دقیق مقدار این شاخص است.

در مقابل، مدل ترکیبی KNN-PSO توانست به طور متوسط حدود ۴۵ درصد دقت بیشتری نسبت به مدل KNN به دست آورد. این بهبود دقت در کمترین حالت حدود ۳۷ درصد و در بهترین حالت نزدیک به ۴۸ درصد گزارش شد. همچنین، ضرایب r و NS مدل ترکیبی در اکثر ایستگاه ها در حدود ۰/۹۰ برآورد شده است که نشان دهنده ارتقای چشمگیر در عملکرد مدل و توانایی بالای الگوریتم PSO در بهینه سازی ساختار مدل پایه KNN است.

علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از شاخص های تأخیری فصول گذشته تأثیر قابل ملاحظه ای در بهبود پیش بینی نداشته و مدل های ساده تر با استفاده از تنها یک گام تأخیر، عملکرد بهتری نسبت به مدل های پیچیده تر ارائه داده اند. تحلیل شکل های مربوط به تطابق مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده نیز برتری مدل ترکیبی KNN-PSO را به خوبی تأیید می کند،

References

- Akhlaq, M., Sheltami, T. R., & Mouftah, H. T. (2012). A review of techniques and technologies for sand and dust storm detection. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11, 305-322. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9282-y>
- Albugami, S., Palmer, S., Cinnamon, J., & Meersmans, J. (2019). Spatial and temporal variations in the incidence of dust storms in Saudi Arabia revealed from in situ observations. *Geosciences*, 9(4), 162. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040162>

- Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P., & Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. *International Journal of Climatology*, 36(4). <https://doi.org/10.1002/joc.4479>
- Alshammari, R. K., Alrwais, O., & Aksoy, M. S. (2022). Machine learning applications to dust storms: a meta-analysis. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(12), 220183. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220183>
- Alshammari, R. K., Alrwais, O., & Aksoy, M. S. (2024). Machine learning forecast of dust storm frequency in Saudi Arabia using

- multiple features. *Atmosphere*, 15(5), 520. <https://doi.org/10.3390/atmos15050520>
- Ansari Ghojghar, M., Bazrafshan, J., Araghinejad, S., Parsi, E. & Soltani, S. (2020). Evaluation of the performance of the support-wavelet vector machine hybrid model in predicting dust storms (Case study: Sistan and Baluchestan province), *Environmental Management Hazards*, 7(4), 331-351. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2021.314582.614> (In Persian)
- Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A., & Ghader, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT, *Journal of environmental health science and engineering*, 12, 1-9. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-9>
- Bui, X. N., Jaroonpattanapong, P., Nguyen, H., Tran, Q. H., & Long, N. Q. (2019). A novel hybrid model for predicting blast-induced ground vibration based on k-nearest neighbors and particle swarm optimization, *Scientific reports*, 9(1), 13971. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50262-5>
- Chen, M., Guo, J., Wang, C., & Wu, F. (2015). PSO-based adaptively normalized weighted kNN classifier. *Journal of Computational Information Systems*, 11, 1407-1415. <https://doi.org/10.12733/jcis13449>
- Dar, M. A., Ahmed, R., Latif, M., & Azam, M. (2022). Climatology of dust storm frequency and its association with temperature and precipitation patterns over Pakistan, *Natural Hazards*, 110(1), 655-677. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04962-9>
- Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Mirakbari, M. (2021). Evaluation of machine learning models for predicting the temporal variations of dust storm index in arid regions of Iran. *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.029>
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3). <https://doi.org/10.1029/2012RG000388>
- Goudie, A. S., & Middleton, N.J. (2006). Desert dust in the global system. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/3-540-32355-4>
- KarAmooz, M., & Araghi-Nejad, Sh. (2015). *Advanced Hydrology* (Vol. 1). Amirkabir University of Technology Press. (In Persian)
- Kadry, R., & Ismael, O. (2020). A new hybrid KNN classification approach based on particle swarm optimization. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(11). <http://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111137>
- Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2001). Saharan dust: sources and trajectories. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 26(2), 165-181. <https://doi.org/10.1111/1475-5661.00013>
- Mohammadi, G. H. (2015). Analysis of Atmospheric Mechanisms in Dust Transport from Western Iran (*Doctoral dissertation, University of Tabriz*, 142 pages). (In Persian)
- Namdari, M., Lee, C. S., & Haghghat, F. (2021). Active ozone removal technologies for a safe indoor environment: A comprehensive review. *Building and Environment*, 187, 107370. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107370>
- O'Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Tews, E. K., Strong, C. L., Leys, J. F., Shinkfield, P., & Tapper, N. J. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.10.004>
- Panicker, N. K. K., & Valarmathi, J. (2025). Time series prediction of aerosol optical depth across the northern Indian region: integrating PSO-optimized SARIMA-SVR based on MODIS data. *Acta Geophysica*, 73(2), 2097-2126. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01472-7>
- Rashki, A., Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2021). Dust storms in Iran—Distribution, causes, frequencies and impacts. *Aeolian Research*, 48, 100655. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100655>
- Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Sorooshian, A., Abuhmed, T., & Choi, S. M.

- (2024). Spatial mapping of land susceptibility to dust emissions using optimization of attentive Interpretable Tabular Learning (TabNet) model. *Journal of Environmental Management*, 358, 120682.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120682>
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. J. A. R. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103-109.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001>
- Shafiee, Sh., & Nakhaei, N. (2018). A technique aimed at improving the speed and accuracy of the KNN classification algorithm. *Nokhbeگان of Science and Engineering*, 3(5), 134-142.
<https://sid.ir/paper/519997/fa> (In Persian)
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghhighifard, N. J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., Arahami, M., Sowlat, M. H., Yarahmadi, M., Saki, H., Alimohamadi, M., Nazmara, S., Motevalian, S. A & Goudarzi, G. (2012). The evaluation of PM10, PM2. 5, and PM1 concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from april through september 2010. *Journal of arid environments*, 77, 72-83.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.09.007>
[Get rights and content](#)
- Shao, Y. (2008). *Physics and modelling of wind erosion*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 37. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7_9
- Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546), 1, 81-86.
<https://doi.org/10.1109/CEC.2001.934374>
- Xiong, J., Zhao, T., Bai, Y., Liu, Y., Han, Y., & Guo, C. (2020). Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 209, 105415.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415>
- Yakowitz, S. J. (1985). Nonparametric density estimation, prediction, and regression for Markov sequences. *Journal of the American Statistical Association*, 80(389), 215-221.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1985.10477164>

Potential assessment of karst water resources for water extraction using hydrogeological methods (Case study: Garmook karst region, Semirum County, Isfahan Province)

Ahmadreza Karimi^{1*}, Haji Karimi², Seyed Yahya Mirzaei Arjenaki³

1. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

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

Corresponding Author: ahmadrkarimi.ark@gmail.com

(Received: 17 February 2025

Revised: 11 Jun 2025

Accepted: 03 August 2025)

Extended Abstract

Introduction: Severe rainfall reduction, rising temperatures, and excessive exploitation of surface and groundwater resources—especially in arid regions of Iran—have turned water scarcity into one of the country's major challenges. Among available water sources, karst aquifers play a crucial role in meeting water demands due to their unique geological characteristics. These aquifers, with their fractures, joints, and secondary porosity, offer high storage and transmission capacities. Moreover, the limestone composition of these formations often ensures suitable water quality for drinking and agricultural uses. Approximately 11% of Iran's surface area—particularly in the Zagros highlands—is composed of karstic formations. This underscores the necessity of proper evaluation, and sustainable exploitation of karst water resources. The Semirum region in southern Isfahan Province is considered a promising area for developing karstic water sources but has faced declining water tables and drinking water resources in recent years. The present study investigates the potential of groundwater resources in the Garmook area of Semirum County and identifies suitable locations for drilling wells and exploiting karst aquifers.

Materials and Methods: In this study, the geological structure of the region was first examined using existing geological maps, satellite imagery, and field surveys. The study area mainly includes zones developed in the Asmari and Shahbazan formations. Due to their hydraulic connectivity, these two formations were analyzed as a single hydrogeological unit. Data on precipitation, air temperature, topographic slope, vegetation cover, and soil characteristics were used to assess infiltration potential. The water balance method was then used to estimate inputs and outputs for each karstic zone. Inputs included effective precipitation, subsurface recharge from adjacent areas, and surface flows, while outputs comprised spring discharge, abstraction from wells, qanats, evapotranspiration from the epikarst zone, and subsurface discharge to adjacent plains. To delineate the recharge basins of the springs, empirical relationships were applied, considering mean annual precipitation, spring discharge, and infiltration rates. Additionally, water samples were collected from the identified sources, and the quality was assessed using laboratory results and plotted on Wilcox and Scholler diagrams.

Results and Discussion: Geological investigations of the region revealed that the widespread presence of carbonate formations—particularly the Asmari Formation—in the Garmook area has created favorable conditions for karst development and the formation of high-capacity aquifers. The presence of active faults, such as the Narmeh Fault and its subsidiary branches, not only increases fracturing and jointing in the rock mass but also facilitates the infiltration of rainwater into the limestone bodies, thereby enhancing the recharge of karst aquifers. In this region, multiple water sources—including Khansar Spring, Khan-Ali Spring, Jaq-Jaq Spring, Semirum Waterfall, and several extraction wells within the Garmook area—have been identified, with a total discharge estimated at over 435 liters per second. This corresponds to approximately 13.7 million cubic meters per year, indicating the high yield potential of the area. In particular, the electrical conductivity of the regional waters is less than 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, further confirming their suitability for potable and irrigation use. On the other hand, results showed that in certain parts of the region (such as west of Narmeh), the infiltration rate decreases to about 30% due to the presence of thick soil cover and dense vegetation. However, in other parts—where karst development is more pronounced and open fractures and joints are prevalent—the infiltration rate can reach up to 50%. Water balance studies also indicated that part of the groundwater exits the area through transverse and longitudinal faults, flowing toward adjacent plains or distant springs such as Sandegan.

Conclusion: Based on the conducted analyses, the Garmook area possesses adequate capacity to supply drinking and irrigation water in the short and medium term. Considering the geological context, the positive groundwater balance, and acceptable water quality, four locations were proposed for drilling new wells. These points are situated in areas with high recharge probability, good permeability, and suitable discharge rates. Additionally, to better understand the aquifer's hydrodynamic behavior, the installation of piezometers and implementation of water-level monitoring programs are recommended. Given the significant influence of regional faults on groundwater flow directions, further studies—including dye and isotope tracing—are essential for determining the precise flow paths to improve groundwater resource management. The findings of this study can serve as a foundation for water resource management in southern Isfahan Province and other similar regions.

Keywords: Karst, Semirum, Garmook, Groundwater Balance, Well, Potential Assessment, Hydrogeology

Citation: Karimi, A., Karimi, H., & Arjenaki Mirzaei, S.Y. (2026). Potential assessment of karst water resources for water extraction using hydrogeological methods (Case study: Garmook karst region, Semirum County, Isfahan Province). *Integrated Watershed Management*, 6(1), 107-125. doi= 10.22034/iwm.2025.2053045.1207

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>).



پتانسیل یابی منابع آب کارست جهت استحصال آب با استفاده از روش‌های هیدروژئولوژی

(مطالعه موردی: پهنه کارستی گرموک شهرستان سمیرم، استان اصفهان)

احمدرضا کریمی*^۱، حاجی کریمی^۲، سید یحیی میرزایی ارجنکی^۱

۱. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

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

نویسنده مسئول: ahmadrkarimi.ark@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه: کاهش شدید بارندگی، افزایش دمای هوا، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک ایران، بحران کم‌آبی را به یکی از چالش‌های اصلی کشور تبدیل کرده است. در این میان، منابع آب سفره‌های کارستی، به‌دلیل ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی خود، نقش مهمی در تأمین نیازهای آبی ایفا می‌کنند. این سفره‌ها به دلیل وجود درز و شکاف‌ها، و تخلخل ثانویه، ظرفیت بالایی برای ذخیره‌سازی و انتقال آب دارند. از طرفی، به‌واسطه جنس آهکی این سازندها، معمولاً کیفیت آب آن‌ها مناسب و قابل‌قبول برای مصارف شرب و کشاورزی است. در ایران، حدود ۱۱ درصد از مساحت کشور خصوصاً ارتفاعات زاگرس را سازندهای کارستی تشکیل می‌دهند. این شرایط، ضرورت ارزیابی و بهره‌برداری اصولی از منابع آب کارستی را دوچندان می‌کند. منطقه سمیرم در جنوب استان اصفهان یکی از نواحی مستعد توسعه منابع آب کارستی به‌شمار می‌آید که طی سال‌های اخیر با افت سطح ایستابی و کاهش منابع آب شرب مواجه شده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در پهنه گرموک در شهرستان سمیرم و شناسایی مکان‌های مناسب جهت حفاری چاه و بهره‌برداری از سفره‌های کارستی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، ابتدا ساختار زمین‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه‌های موجود، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی بررسی شد. محدوده مورد مطالعه شامل پهنه‌هایی است که عمدتاً در سازندهای آسماری و شهبازان توسعه یافته‌اند. این دو سازند به‌دلیل پیوستگی هیدرولیکی، در قالب یک واحد هیدروژئولوژیکی مورد تحلیل قرار گرفتند. داده‌های بارندگی، دمای هوا، شیب توپوگرافی، پوشش گیاهی و خاک‌شناسی نیز در تحلیل شرایط نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفت. سپس با بهره‌گیری از روابط بیلان آب، میزان ورودی و خروجی هر پهنه کارستی برآورد شد. منابع ورودی شامل بارش مؤثر، تغذیه زیرسطحی از پهنه‌های مجاور و جریان‌های سطحی بوده و خروجی‌ها شامل دبی چشمه‌ها، چاه‌های بهره‌برداری، قنوت، تبخیر از ناحیه اپی کارست، و تخلیه زیرسطحی به دشت‌های مجاور در نظر گرفته شدند. برای تعیین وسعت حوضه‌های آبخیز چشمه‌ها، از روابط تجربی با در نظر گرفتن میانگین بارش سالانه، دبی چشمه و درصد نفوذ استفاده گردید. همچنین با نمونه‌برداری از منابع آب و بررسی نتایج آزمایش‌های کیفی، نمودارهای ویلکاکس و شولر ترسیم و کیفیت منابع آب تحلیل شد.

نتایج و بحث: بررسی زمین‌شناسی منطقه نشان داد که حضور گسترده سازندهای کربناته، به‌ویژه آسماری، در پهنه گرموک، شرایط لازم برای توسعه کارست و شکل‌گیری آبخوان‌های پرظرفیت را فراهم کرده است. وجود گسل‌های فعال مانند گسل نرمه و شاخه‌های فرعی آن، علاوه بر افزایش شکستگی‌ها و درزها در سنگ، موجب تسهیل در نفوذ آب باران به داخل توده‌های آهکی و در نتیجه تقویت تغذیه سفره‌های کارستی می‌شود. در این پهنه، منابع متعددی از جمله چشمه خوانسار، چشمه خان‌علی، چشمه جاق‌جاق، آبشار سمیرم، و چاه‌های برداشت در محدوده گرموک شناسایی شدند که جمع دبی آن‌ها بالغ بر ۴۳۵ لیتر در ثانیه برآورد شد. این میزان تخلیه معادل با حدود ۱۳/۷ میلیون مترمکعب در سال است که نشان‌دهنده توان بالای آبدی این پهنه می‌باشد. از آنجا که میزان هدایت الکتریکی آب‌های منطقه کمتر از ۴۵۰ میکروموس بر سانتیمتر می‌باشند، کیفیت آب‌ها برای مصارف شرب و کشاورزی مناسب ارزیابی گردید. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که در بخش‌هایی از پهنه (نظیر غرب نرمه)، درصد نفوذ به‌دلیل وجود خاک‌های ضخیم و پوشش گیاهی متراکم، کاهش یافته و به حدود ۳۰ درصد می‌رسد. با این حال، در سایر بخش‌ها با توسعه بیشتر کارست و وجود درز و شکاف‌های باز، درصد نفوذ تا ۵۰ درصد نیز قابل افزایش است. مطالعات بیلان نیز نشان داد که بخشی از آب‌های زیرزمینی از طریق گسل‌های عرضی و طولی از محدوده خارج شده و به سمت دشت‌های مجاور یا چشمه‌های دوردست مانند سنگان منتقل می‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته، پهنه گرموک دارای ظرفیت مناسب برای تأمین آب شرب و کشاورزی در کوتاه‌مدت و میان‌مدت است. با توجه به شرایط زمین‌شناسی، بیلان مثبت آب زیرزمینی و کیفیت قابل‌قبول منابع، چهار نقطه برای حفاری چاه‌های جدید معرفی گردید. این نقاط در مناطقی با بیشترین احتمال تغذیه، نفوذپذیری بالا و دبی مناسب قرار دارند. همچنین به‌منظور شناخت دقیق‌تر رفتار هیدرودینامیکی آبخوان، حفر پیزومتر و اجرای طرح‌های پایش سطح ایستابی توصیه می‌شود. در نهایت، با توجه به نقش مؤثر گسل‌های منطقه در جهت‌دهی به جریان‌های زیرزمینی، انجام مطالعات تکمیلی شامل ردیابی رنگی و ایزوتوپی به‌منظور تعیین مسیر دقیق جریان آب، برای مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی منطقه ضروری است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای مدیریت منابع آب کارستی در جنوب استان اصفهان و سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کارست، سمیرم، گرموک، بیلان آب زیرزمینی، چاه، پتانسیل‌یابی، هیدروژئولوژی

استناد: کریمی، ا.ر.، کریمی، ح؛ و میرزایی ارجنکی، س.ی. (۱۴۰۵). پتانسیل‌یابی منابع آب کارست جهت استحصال آب با استفاده از روش‌های هیدروژئولوژی (مطالعه موردی: پهنه کارستی گرموک شهرستان سمیرم، استان اصفهان). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱۶(۱)، ۱۰۷-۱۲۵.

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

یکی از منابع طبیعی مهم برای استفاده در مصارف خانگی، صنعت و کشاورزی، استفاده از منابع آب زیرزمینی می‌باشد (Andualem & Demeke, 2019). امروزه خشکسالی و افزایش تقاضای آب، منابع آب زیرزمینی را با چالش مواجه کرده است (Pourhaghi *et al.*, 2014).

منابع آب کارستی^۱، جزء ذخایر آب زیرزمینی است که به شکل طبیعی، عمدتاً به صورت چشمه از زمین خارج می‌شود. در اصطلاح فنی به پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربناته (عمدتاً آهک و دولومیت)، کارست گفته می‌شود که بخش مهمی از منابع آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد جمعیت دنیا به منابع آب کارستی وابسته است (Ford & Williams, 2007). حدود ۱۱ درصد مساحت ایران (Naseri, 1991) و ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس، توسط سازندهای کربناته پوشیده شده است (Afrasiabian, 1998). منابع آب کارست که معمولاً به صورت چشمه‌های کارستی در سطح زمین ظاهر می‌شوند، اغلب به دلیل پایین بودن مواد جامد محلول، برای شرب کیفیت مناسبی دارند و دمای آن‌ها تقریباً برابر دمای متوسط محل تغذیه می‌باشد. به دلیل پیچیدگی محیط‌های کارستی، اغلب مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های کارستی با بررسی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های کارستی انجام می‌شود. اهمیت این موضوع در مناطقی که منابع آب زیرزمینی آن‌ها به طور پیوسته در حال کاهش است، بیشتر احساس می‌شود (IWPRI, 2014; Ketabchi *et al.*, 2018). به دلیل حجم بالای ذخایر کارستی و همچنین کیفیت مناسب آب آن‌ها، بهره‌برداری از آن‌ها به‌ویژه برای شرب در اولویت قرار داشته و لازم است توجه جدی به مطالعه آن‌ها صورت گیرد تا بهره‌برداری

مطمئن و پایدارتری از آن‌ها صورت پذیرد (Karimi & Karimi, 2022). عوامل متعددی در پدیده کارستی‌شدن^۲ و ایجاد منابع آب در سازندهای کربناته حائز اهمیت می‌باشند که از مهمترین این عوامل می‌توان به ساختارهای تکتونیکی، سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، اقلیم، توپوگرافی و هیدرولوژی اشاره کرد (Ghobadi, 2007). با توجه به اهمیت مناطق کارستی به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب، مطالعات زیادی توسط محققین مختلف انجام گرفته است. به عنوان مثال، توسط Maqsoodi و همکاران (۲۰۰۹) تحولات چشمه کارستی پرآو-بیستون در استان کرمانشاه بر اساس عوامل هیدروژئولوژیکی در مقایسه با دیگر چشمه‌های زاگرس چین خورده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه در منطقه پرآو به دلیل سیستم کارستی پیچیده آن، دارای نوسان‌های زیادی در هیدروگراف‌ها بوده و تغذیه به صورت کانالیزه و مجرایی می‌باشد. چشمه پرآو میزان ضریب آلفا، ذخیره دینامیکی و ضریب خشکیدگی بیشتری نسبت به سایر چشمه‌ها نشان داد. در مطالعه‌ای دیگر در منطقه دشت ارژن و کازرون شیراز، به بررسی اشکال کارستی به منظور تخمین میزان ذخیره آب‌های زیرزمینی پرداخته شد (Tahouni, 1995).

کارست منطقه با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و زمین‌ریخت‌شناسی طبقه‌بندی گردید. ارتباط بین ویژگی‌های هیدرودینامیکی و شرایط جریان در آبخوان‌های کارستی نیز بررسی شده است. Kuhta و همکاران (2012) در این زمینه به این نتیجه رسیدند که شرایط جریان در آبخوان‌های کارستی پاسخ‌های متفاوتی از نظر هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی دارند. همچنین مطالعات زیادی در بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در داخل و خارج از کشور توسط روش‌های مختلفی از جمله روش فازی،

سالانه ۵۳۷/۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نسبت به ایران و استان اصفهان نشان می‌دهد.

پهنه سمیرم که در برگیرنده کوه‌های نرمه، ارتفاعات اطراف سد قره‌آقاج، کوه‌های شمال شهر سمیرم تا چشمه گرموک می‌باشد، در زون زاگرس مرتفع قرار گرفته است. در ادامه، به اختصار به این پهنه، پهنه سمیرم گفته می‌شود. شکل ۲ محدوده کلی این پهنه را نشان می‌دهد. به دلیل عبور گسل اصلی زاگرس از بخش جنوبی این پهنه و عملکرد شاخه‌های فرعی این گسل در این مجموعه، در هم ریختگی و خردشدگی‌های فراوانی در این پهنه به وقوع پیوسته است.

بیشترین گسترش سازند زمین‌شناسی آهکی که در این پهنه وجود دارد سازندهای آسماری و شهبازان می‌باشند. از نظر ترکیب لیتولوژیکی سازندهای آسماری و شهبازان مقداری با هم تفاوت دارند. توسعه کارست در سازند آسماری به دلیل آهکی بودن بیشتر است، اما این دو سازند به دلیل پیوستگی آبخوان آن‌ها و ارتباط هیدرولیکی، از نظر هیدروژئولوژیکی به عنوان یک واحد هیدروژئولوژیکی محسوب می‌شود. لذا بیان آن‌ها به صورت مشترک محاسبه و ارائه می‌گردد. به عبارت دیگر، از نظر هیدروژئولوژیکی این دو سازند با همدیگر ارتباط هیدرولیکی داشته و به طور مشترک تشکیل آبخوان داده‌اند.

در آهک‌های سازند آسماری که در زاگرس مرتفع قرار گرفته‌اند به دلیل وجود درز و شکاف‌های بیشتر، دریافت میزان بارش بیشتر و نوع بارش که به صورت برف می‌باشد، توسعه کارست بیشتری در این ناحیه صورت گرفته و دارای درصد نفوذ بالاتری می‌باشند. میزان نفوذپذیری در این پهنه، و البته پوشش خاک و پوشش گیاهی گون (*Astragalus*) در این ناحیه به گونه‌ای است که میزان رواناب کمی در سطح زمین جاری می‌گردد.

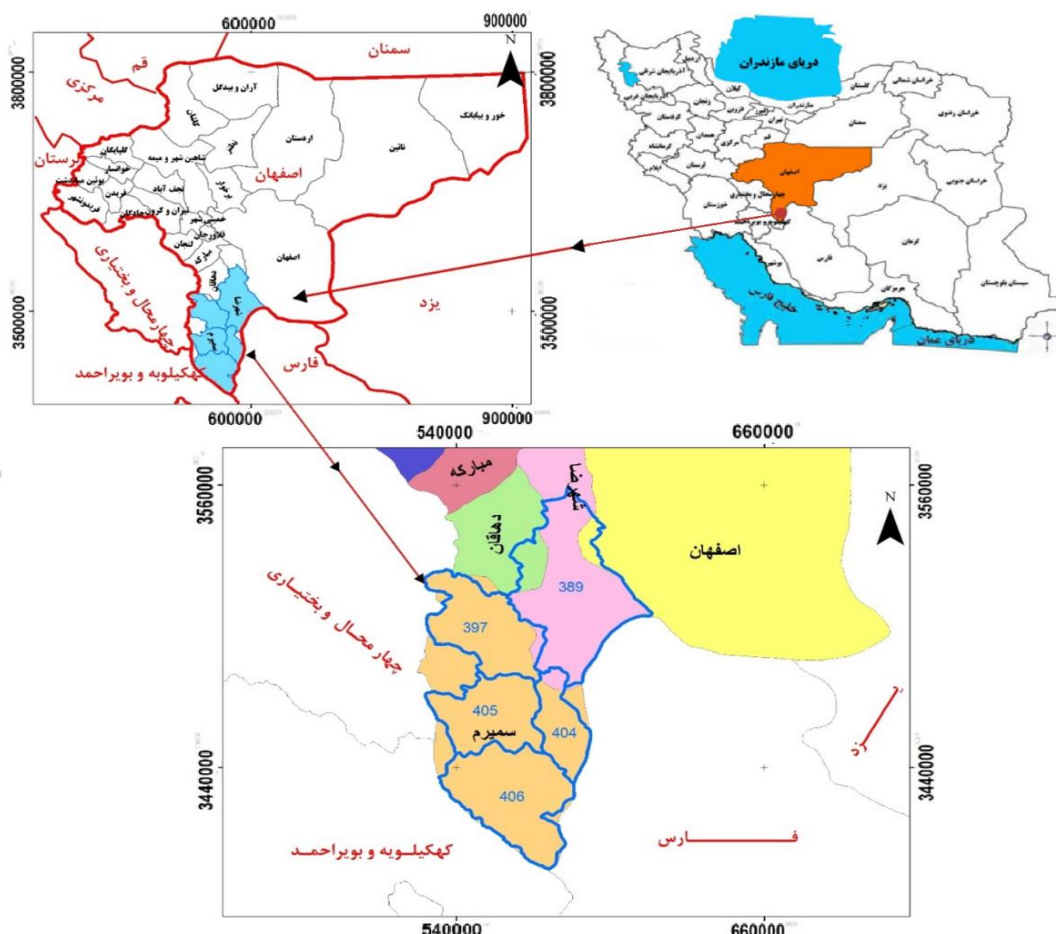
تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل‌سازی انجام شده است (Tahouni, 1995; Shaban *et al.*, 2004; Bauer *et al.*, 2005; Jukić & Denić-Jukić, 2008; Martínez-Santos & Andreu, 2010; Barmaki *et al.*, 2015; Moradi *et al.*, 2016; Mokarram & Neghaban, 2019; Rasouli *et al.*, 2020; Pour Akbari *et al.*, 2020; Sepehri Pour, 2021; Sajadi *et al.*, 2022; Nakhaei *et al.*, 2023; Jafari & Fouladi, 2024; Vaezi Hir *et al.*, 2024; Rezaei Arefi *et al.*, 2025).

مناطق مرکزی ایران که در احاطه ارتفاعات زاگرس از جنوب و غرب و ارتفاعات البرز از شمال قرار دارند، از دریافت بارش و رطوبت کمتری نسبت به دیگر نواحی کشور برخوردار بوده و با کمبود منابع آبی به‌ویژه آب شرب مواجه می‌باشد. بیشتر آب شرب شهرستان شهرضا از شهرستان سمیرم تامین می‌شود. تغییراتی که در اقلیم دنیا و کشور نیز اتفاق افتاده و یا در حال وقوع است مزید بر علت شده و باعث کاهش روزافزون منابع آب و فشار بر منابع آب موجود شده است، به طوری که آبدهی چاه‌های تنگ آهن که تامین کننده آب شرب شهرضا در شمال این پهنه می‌باشند، به کمتر از یک‌سوم کاهش یافته است. در نتیجه مطالعه روی سایر نقاط دارای پتانسیل جهت حفر چاه برای تامین آب شرب شهرستان شهرضا از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این مطالعه تعیین پتانسیل تامین آب از سازندهای کارستی موجود در پهنه سمیرم شهرستان سمیرم و تعیین نقاط بهره‌برداری جهت حفر چاه و تامین آب کوتاه‌مدت و میان‌مدت در محدوده سمیرم و شهرضا می‌باشد.

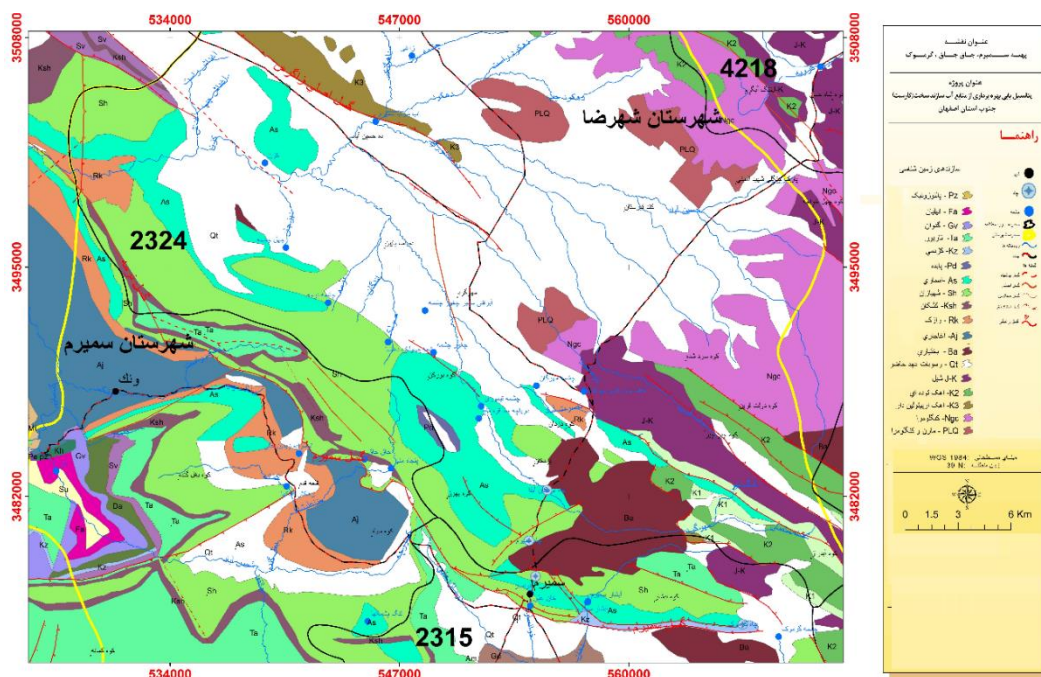
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق نواحی کارستی جنوب استان اصفهان در شهرستان سمیرم با مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 23'$ و $34^{\circ} 31'$ تا $51^{\circ} 20'$ و $51^{\circ} 48'$ شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه ۲۴۳۵ متر از سطح دریا است. بر اساس گزارش ایستگاه سینوپتیک شهرستان سمیرم، میزان متوسط بارش



شکل ۱- نمایی از محدوده مورد مطالعه در کشور و استان اصفهان
Figure 1- A view of the study area in the country and Isfahan Province



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه سمیرم
Figure 2- Geology map of the Semiron region

وجود دارد مصرف می‌شود. در بازدیدهای میدانی از بخش غربی این پهنه در مجاورت رودخانه کاسگان مشخص شد که آهک‌های این محدوده عمدتاً حالت تپه ماهوری دارند و بصورت تکه‌تکه و پراکنده می‌باشند (علی‌رغم پیوستگی و گسترشی که در نقشه زمین‌شناسی دارند)؛ بنابراین با در نظر گرفتن شرایط فوق مقدار درصد نفوذ در این پهنه آهکی حدود ۴۰ درصد بارندگی در نظر گرفته شده است. در بخش‌های غربی این پهنه حتی مقدار درصد نفوذ به ۳۰ درصد هم ممکن است برسد (Saman Abrah Consulting Engineers, 2016).

شکل ۳ نمونه‌ای از وضعیت سطح آهک‌ها و پوشش خاک و پوشش گیاهی در ارتفاعات کوه نرمه در بخش غربی این پهنه را به نمایش می‌گذارد. همانگونه که در تصاویر ملاحظه می‌شود، آثاری از فرسایش سطحی فعال و شدید در مسیر آبراهه‌های این منطقه مشاهده نمی‌شود. از طرف دیگر، وجود پوشش خاک نسبتاً ضخیم بر روی آهک‌ها و پوشش گیاهی مناسب باعث نگهداشت مقداری از بارش‌ها و رطوبت در خود شده و به درصد تبخیر آب از بارش‌ها کمک نموده است. سهم قابل ملاحظه‌ای از آب بارش‌ها نیز توسط پدیده تعرق توسط پوشش گیاهی و بوته‌ای انبوهی که در منطقه



شکل ۳- وضعیت خاک، پوشش گیاهی و فرسایش سطحی در ارتفاعات نرمه، شهرستان سمیرم

Figure 3- Soil condition, vegetation cover, and surface erosion in the Narmah highlands, Semirum County

که ذکر شد مورفولوژی نسبتاً ملایمی در ارتفاعات حاکم بوده و همین امر باعث تشکیل خاک نسبتاً مناسب و استقرار پوشش انبوه بوته‌ها و درختچه‌ها به‌ویژه بوته گون (*Shrub*) شده است. همین موضوع باعث نگهداشت بخش قابل ملاحظه‌ای از آب بارش‌ها در خاک و همچنین ناحیه اپی کارست به صورت سطحی باقی مانده و درصد نفوذ را علی‌رغم وجود تعدادی فروچاله در منطقه، کاهش می‌دهد.

در برخی قسمت‌های ارتفاعات این پهنه شرایط برای تشکیل فروچاله^۱ مهیا بوده است، دو فروچاله بزرگ در بخش غربی کوه نرمه در آهک‌های آسماری تشکیل شده‌اند که به غارهایی در عمق وصل می‌شوند. احتمال ارتباط این دو فروچاله در زیر به صورت غار وجود دارد. شکل ۴ تصاویری از فروچاله‌های نرمه را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد فروچاله‌ها از نوع انحلالی^۲ باشند. اگرچه دو فروچاله در ارتفاعات نرمه یافت شده است که پتانسیل توسعه کارست را نشان می‌دهد، اما همانگونه

2- Solution sinkhole

1- Sinkhole



شکل ۴- نمایی از دو فروچاله در ارتفاعات نرمه، شهرستان سمیرم

Figure 4- A view of two sinkholes in the Narmah highlands, Semiro County

منطقه تخلیه می‌شود. شکل ۵ نمایی از آبشار سمیرم را نمایش می‌دهد. در واقع مازاد آب این چشمه و زهکشی آهک‌هایی که در مسیر جریان آب هستند، تشکیل دهنده آب آبشار سمیرم می‌باشند و آبشار سمیرم نیز به‌عنوان بخشی از تخلیه آهک‌های این پهنه در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، چاه‌های گرموک (۴ لیتر در ثانیه)، بردکان (۱۸ لیتر در ثانیه) و چاه‌های ۱ و ۲ آب و فاضلاب (مجموع دبی ۳۰ لیتر در ثانیه) نیز بخشی از آب این پهنه را برداشت می‌نمایند. جمع آبدهی منابع آب کارستی که مستقیماً این پهنه آهکی را تخلیه می‌نمایند ۴۳۵ لیتر بر ثانیه است که تخلیه سالیانه آن‌ها معادل ۱۳/۷ میلیون مترمکعب است.

از آهک‌های این پهنه منابع آب متعددی تخلیه می‌شوند که از آن جمله می‌توان به چشمه‌های گرموک (متوسط دبی ۲۸ لیتر در ثانیه)، آبشار سمیرم (۴۵ لیتر بر ثانیه)، خوانسار (۱۷۵ لیتر در ثانیه)، خان علی (۱۶ لیتر در ثانیه)، جاق جاق (۲۶ لیتر در ثانیه)، پنجاه منی (۳۶ لیتر در ثانیه)، تیموری (۱۵ لیتر در ثانیه)، مهرگان (۷ لیتر در ثانیه)، چهل چشمه مهرگرد (۱۷ لیتر در ثانیه)، صولک دهنسا (۹ لیتر در ثانیه) و نرمه (۱۵ لیتر در ثانیه) اشاره نمود. چشمه عزیزخان که دارای دبی حدود ۲۰ لیتر در ثانیه آبدهی دارد و آب آن جهت شرب شهر سمیرم منتقل شده است، در بالادست سرچشمه آبشار سمیرم واقع شده است و از آهک‌های



شکل ۵- الف

شکل ۵- ب

شکل ۵- الف) آبشار سمیرم (سمت راست) و ب) چشمه خوانسار در ورودی شهر سمیرم (سمت چپ)

Figure 5- a) Semirom Waterfall (right) and b) Khansar Spring at the entrance of Semiro city (left)

بیان آب‌های زیرزمینی پهنه سمیرم

یکی از روش‌های تعیین پتانسیل آب‌های زیرزمینی هر منطقه، بکارگیری بیان آب‌های زیرزمینی آن ناحیه است. به منظور تسهیل بررسی بیان محدوده‌های کارستی شهرستان سمیرم، یک پهنه بندی از کارست‌های دارای پتانسیل تامین آب صورت گرفت. با توجه به پارامترهای مختلفی از قبیل موقعیت پهنه کارستی در زون‌های زمین‌شناسی کشور، گسترش و پیوستگی سازندهای کارستی، تعداد و بزرگی چشمه‌های تخلیه‌کننده محدوده موردنظر، ساختارهای زمین‌شناسی به‌ویژه گسل‌ها، مورفولوژی، ارتباط هیدروژئولوژی و غیره منطقه مورد مطالعه به پهنه‌هایی تقسیم‌بندی شد. لازم به ذکر است که پهنه سمیرم به گونه‌ای انتخاب شد که از نظر هیدروژئولوژی به‌عنوان یک واحد مستقل عمل نماید و ارتباط هیدروژئولوژیکی با دیگر پهنه‌ها نداشته باشد. در محاسبات بیان این پهنه کارستی، مجموع ورودی‌ها به سفره کارستی اعم از بارش‌ها، ورودی زیرزمینی از پهنه‌های مجاور اعم از تغذیه از منابع کارستی یا آبرفتی و ورودی سطحی از رودخانه‌هایی که پهنه کارستی را قطع می‌نمایند در نظر گرفته شده است. همچنین مجموع خروجی‌های پهنه شامل خروجی از چشمه‌ها، چاه‌ها و قنات‌ها، تخلیه به رودخانه‌های سطحی، تخلیه زیرزمینی به پهنه‌های کارستی و آبرفتی مجاور، تبخیر از منابع آب و تغییراتی که در ذخیره استاتیک و دینامیک آبخوان اتفاق می‌افتد، در محاسبات بیان لحاظ گردیده است. در این مطالعه بر اساس محدودیت‌های زمانی و مالی، تنها دو مرحله اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از منابع آب انجام شده است که برای ارائه یک بیان اجمالی کفایت می‌نماید. از دیگر محدودیت‌هایی که در بررسی بیان در این منطقه وجود دارد، کم بودن و یا فقدان گمانه در داخل پهنه‌های کارستی و یا در حد فاصل آهک‌ها و دشت‌های مجاور است که باعث محدودیت در ارائه یک بیان دقیق می‌گردد. سطح و تراز آب گمانه‌ها در

محاسبه و برآورد تخلیه و یا تغذیه آب از (یا به) سفره کارستی بسیار حائز اهمیت است. همچنین در ارزیابی تغییرات ذخیره استاتیک و حتی دینامیک نقش مهمی ایفا می‌نماید. موضوع و مسئله تبخیر در محیط‌های کارستی به واسطه قرار گرفتن سطح آب سفره در اعماق زمین (معمولاً بیشتر از ۱۰ متر)، باعث می‌گردد که تبخیر از منابع آب کارست به حداقل برسد، اما عملکرد تبخیر بیشتر در فرایند نفوذ آب در هنگام تغذیه و همچنین زمان توقف آن در ناحیه اپی کارست^۱ یا ناحیه Subcataneous zone (Sauter, 1992) در نظر گرفته می‌شود که ممکن است آب مدت طولانی (حتی ماه‌ها) در خلل و فرج و درز و شکاف‌ها باقی بماند و پدیده تبخیر بر این آب‌ها اثر نماید. در واقع در این مطالعه عملکرد تبخیر در درصد نفوذ آب از بارش‌ها به سفره کارستی در نظر گرفته شده است. از آنجا که محاسبه بیان سفره‌های کارستی و تعیین مساحت و محدوده حوزه آبخیز چشمه‌های کارستی ارتباط تنگاتنگی دارند، در ادامه ابتدا به روش محاسبه حوزه آبخیز چشمه‌های کارستی پرداخته شده و سپس بیان هر یک از پهنه‌ها و مساحت و مرز تقریبی چشمه‌های کارستی مهمی که در آن پهنه قرار گرفته‌اند، ارائه گردیده تا بتوان بر اساس این بررسی‌ها در بخش تعیین محل‌های مناسب جهت حفر چاه کارستی بهره‌برداری نمود.

روش محاسبه مساحت حوزه آبخیز چشمه‌ها

برای محاسبه مساحت حوزه آبخیز بایستی میزان آبدهی متوسط چشمه تعیین گردد. برای این کار در طی یکسال یا دوره بیان میزان حجم تخلیه چشمه محاسبه می‌شود. در چشمه‌های منطقه، آمار آبدهی در دو فصل تر و خشک سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، به‌عنوان متوسط آبدهی چشمه در دوره بیان جهت محاسبات تعیین مساحت حوزه آبخیز استفاده شده است. لازم به ذکر است که سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ یک سال کم‌باران بوده و بارش‌ها به‌خصوص به شکل برف در منطقه کم اتفاق افتاده است.

با استفاده از رابطه (۱) مساحت حوزه آبخیز چشمه محاسبه می‌گردد که محدوده این مساحت با در نظر گرفتن معیارهایی ترجیحاً از نواحی مجاور و نزدیک به چشمه تعیین می‌گردد (Karimi, 2003):

$$A=Q/PI \quad (1)$$

در این رابطه A: مساحت حوزه آبخیز چشمه (Km^2)، Q: حجم تخلیه چشمه بر حسب میلیون مترمکعب در سال (MCM)، P: بارندگی متوسط (m) و I: درصد نفوذ بارندگی در سیستم کارستی. بر اساس منحنی‌های هم‌باران به دست آمده برای منطقه مورد مطالعه در بخش هواشناسی، و بر اساس بارندگی ایستگاه‌های بارندگی در سال بیلان، میزان بارندگی در پهنه یا توده‌های تامین کننده آب چشمه‌ها برآورد شد.

درصد نفوذ تابع عوامل متعددی چون وجود یا عدم وجود آب‌فروچاله، تعداد (تراکم) درز و شکاف‌ها، میزان بازشدگی شکاف‌ها، میزان و نوع پرشدگی آن‌ها، درصد وضخامت پوشش خاک و دانه‌بندی آن، شیب لایه‌ها، نوع نزولات جوی و توزیع زمانی بارش آن‌ها، شدت بارندگی، درجه حرارت، پوشش گیاهی و غیره می‌باشد که در محاسبات نفوذ آب این پهنه کارستی در نظر گرفته شده است تا مساحت تعیین شده به واقعیت نزدیکتر باشد. چنانچه راهی برای تصمیم نهایی برای درصد نفوذ وجود نداشته باشد، درصد نفوذهای مختلف را برای محاسبه حوزه آبخیز بکار برده و با یک عدم اطمینان، حوزه آبخیز تعریف می‌شود تا در صورت نیاز با روش‌های تکمیلی مانند ردیابی، مرز دقیق‌تر حوزه آبخیز مشخص گردد. تعیین پارامتر درصد نفوذ بطور دقیق بسیار مشکل می‌باشد. بر اساس تجارب موجود در سازندهای کارستی ضریب نفوذ در سایر مناطق بین ۳۰ تا ۹۰ درصد تغییر می‌کند (Rahnamayi, 1994; Karimi, 1997; Raeisi, 1999; Dastranj & Jafari Aghdam, 2019; Ghadimi & Zanganeh Tabar, 2019).

لازم به ذکر است عوامل چینه‌شناسی یا ساختاری و ساختمانی به گونه‌ای عمل نموده‌اند که پهنه‌ها با هم ارتباط هیدروژئولوژیکی چندانی ندارند و هر پهنه بطور

مستقل از دیگر پهنه‌ها عمل می‌نمایند. بیلان‌ها بر اساس اندازه‌گیری تنها دو مرحله آبدهی در فصل تر و خشک می‌باشد. به علاوه، تنها چشمه‌های مهم و بزرگ منطقه که آبدهی بیشتر از ۵۰ لیتر در ثانیه داشته باشند، مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند و به همین خاطر که کلیه تخلیه‌های پهنه کارستی مورد اندازه‌گیری قرار نگرفته است، این بیلان‌ها بصورت حدودی و تخمینی بوده، اما از آنجا که هدف از این مطالعه تعیین پتانسیل پهنه کارستی سمیرم جهت تعیین محل حفر چاه و برداشت آب از سفره‌های کارستی می‌باشد، از این لحاظ بیلان ارائه شده جهت اهداف مطالعه کفایت می‌نماید. حجم آب ورودی به هر سازند و توده کارستی در پهنه موردنظر از حاصل ضرب مساحت توده در بارش سالانه اتفاق افتاده روی توده در درصد نفوذ در نظر گرفته شده بر اساس رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$V_{in}=A \cdot P \cdot I \quad (2)$$

که در این رابطه V_{in} : حجم آب ورودی به توده یا پهنه کارستی (میلیون مترمکعب)، A: مساحت پهنه آهکی (کیلومتر مربع)، P: متوسط بارش سالانه بر روی توده یا پهنه کارستی (متر) و I: درصد نفوذ آب ورودی به پهنه یا توده کارستی (درصد) می‌باشد. همانگونه که ذکر شد، مهمترین سازندهای زمین‌شناسی این پهنه، سازندهای آسماری و شهبازان می‌باشند. سازندهای تاربور، K2 و بختیاری نیز بطور محدود در این پهنه رخنمون پیدا کرده‌اند. با توجه به اینکه گسل اصلی راندگی زاگرس از این پهنه عبور کرده است خردشدگی و درهم‌ریختگی زمین‌شناسی زیادی در آن اتفاق افتاده است و مجاورت برخی سازندها به صورت گسلی است. بعضی از سازندها پیوستگی ندارند و به صورت تکه‌تکه در منطقه گسترش یافته‌اند؛ از این نمونه می‌توان به سازند K2 در شمال قره آقاچ اشاره نمود که همین مسئله باعث شده است چشمه مشخص و بزرگی از آن خارج نشود و آب‌ها به صورت پراکنده از چشمه‌های کوچک تخلیه گردد. مساحت، برآورد درصد نفوذ، بارش هر سازند و حجم آب ورودی هر یک از این سازندها محاسبه و در جدول بیلان ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱- بیان اجمالی پهنه کارستی سمیرم
Table 1- General water balance of the Semirrom karst region

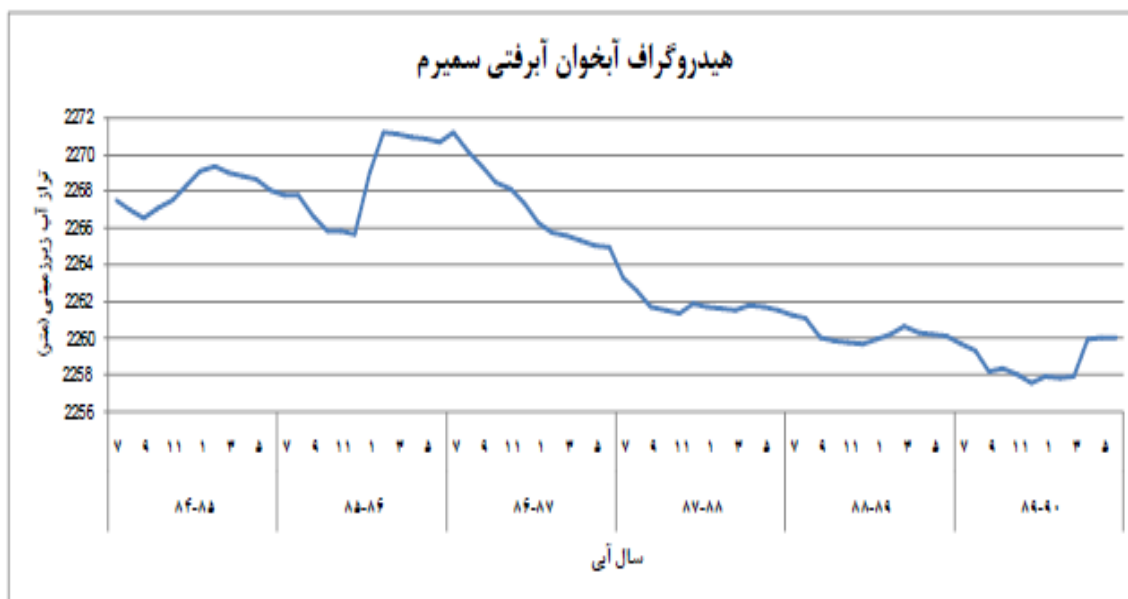
پتانسیل تخلیه به آبرفت بر اساس گزارشات (MCM)	تخلیه به آبرفت یا پهنه‌های مجاور (MCM)	تخلیه چشمه‌ها (MCM)	دبی چشمه‌ها (l/s)	حجم آب ورودی به پهنه (MCM)			بارش (mm)	مساحت (km ²)	آهک
				نفوذ %50	نفوذ %40	نفوذ %30			
				16.6			415	100.8	آسماری
				22.4			430	130.5	شهبازان
بخشی از تخلیه به دشت مهرگرد را شامل می‌شود	36	13.7	435			5.6	420	45	بختیاری
				2.4			350	17	K2
				2.7			400	17	تاربور

آبشار را آبیاری می‌کنند (شکل ۶). همچنین از آهک‌های آسماری در محل آبشار، چشمه‌های کوچکی تخلیه می‌گردد. گسل نرمه در سازندهای آسماری و شهبازان در بخش غربی این پهنه عمل نموده است و رودخانه کاسگان نیز در انتهای غربی این پهنه و در مرز استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری با این آهک‌ها در تماس می‌باشد. این گسل مهم و طولانی می‌تواند بخشی از آب این پهنه را به سمت رودخانه کاسگان و حتی خارج از پهنه به طرف گسل شمالی-جنوبی دنا هدایت کند. این گسل‌ها به همراه گسل‌های عرضی فرعی که در منطقه وجود دارند در انتقال آب‌های این پهنه به طرف پهنه‌های پایین‌تر و حتی چشمه‌های دوردست مانند سنگان هدایت نماید.

عملکرد گسل شمالی-جنوبی دنا می‌تواند در این انتقال آب‌ها نقش مهمی را بازی نماید. بیان دشت مهرگرد نشان داده است که تغذیه از آهک‌های مجاور در این دشت صورت می‌گیرد که بخشی از این تغذیه از طریق ارتفاعات جنوب دشت (پهنه سمیرم) صورت می‌گیرد. وجود قنات‌ها، چشمه‌ها و چاه‌های آبرفتی در حوالی مهرگرد و حاشیه این ارتفاعات بیانگر تخلیه زیرزمینی بخشی از این آهک‌ها به این دشت‌ها است. این پهنه

از کوه آبدراز که در شمال و شمال شرق قره آقاچ قرار دارد، چشمه‌های کوچک و قنات‌های متعددی تخلیه می‌شود که هم‌تأمین‌کننده آب رودخانه قره آقاچ است و هم باغات فراوانی که در این محدوده قرار دارد را آبیاری می‌نماید. شکل ۶ تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث از باغات و اراضی کشاورزی در محدوده قره آقاچ که آب آن‌ها از چشمه‌ها تغذیه می‌شود را به نمایش گذاشته است. اگرچه چشمه مهمی در بالادست حوضه آبریز رودخانه قره آقاچ قرار ندارد اما در بیشتر اوقات سال رودخانه قره آقاچ در محل ایستگاه پل بردکان دارای دبی پایه بوده که نشانگر مشارکت آب‌های تخلیه شده از آهک‌های شمال ناحیه قره آقاچ در تأمین این آبدهی است.

چشمه عزیزخان که در مسیر بالادست آبشار سمیرم قرار دارد، با دبی حدود ۲۰ لیتر در ثانیه آب شرب شهر سمیرم را تأمین می‌نماید. مازاد آب چشمه عزیزخان و زهکشی آهک‌های پایین‌دست آن به طرف آبشار سمیرم حرکت می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت که آبشار سمیرم نیز به‌طور تجمعی آب‌های زهکشی شده از آهک‌های بالادست خود را تخلیه می‌کند؛ ضمن اینکه این آب‌ها، اضافه بر آب‌هایی هستند که باغات بالادست



شکل ۸- هیدروگراف واحد سفره آبرفتی دشت سمیرم (Saman Abrah Consulting Engineers, 2016)
 Figure 8- Unit hydrograph of the alluvial aquifer of the Semirom plain (Saman Abrah Consulting Engineers, 2016)

شمال و شمال غرب شهر سمیرم در آهک‌های جنوب دریاچه سد قره آقاچ تا نزدیک ارتفاعات نرمه می‌باشد. محدوده تقریبی حوزه آبخیز این چشمه‌ها و چاه‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث در شکل ۹ نشان داده شده است.

بخش شرقی پهنه توسط چشمه و چاه گرموک و همچنین آبشار سمیرم اساساً تخلیه می‌شود و بخش غربی پهنه تامین کننده آبدهی چشمه‌های مهرگان، تیموری، صولک دهنسا، نرمه، چهل چشمه در بخش شمالی و چشمه‌های جاق جاق و پنجاه منی در بخش جنوبی این پهنه می‌باشد. بخشی از تخلیه آهک‌ها در بخش جنوب غربی پهنه از طریق چشمه‌های کوچک ناحیه عقدک تخلیه می‌شود و تامین کننده آب باغات این محدوده است. شکل ۱۰ تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث این ناحیه را نشان می‌دهد که پوشش سبز (باغات) این محدوده بیانگر این موضوع است.

حوزه آبخیز چشمه‌های مهم پهنه سمیرم: مهمترین چشمه کارستی که در این پهنه قرار دارد، چشمه خوانسار در محل ورودی شهر سمیرم از سمت شهرضا می‌باشد. اگرچه این چشمه از سازند جهرم تخلیه می‌شود، اما ارتباط هیدرولیکی آن با سازند آسماری برقرار است. زیرا هیچ مانع هیدروژئولوژیکی بین آن‌ها وجود ندارد. از طرف دیگر، در محدوده حوزه آبخیز چشمه خوانسار، منابع آب دیگری نیز وجود دارد که حوزه آبخیز آن‌ها با چشمه خوانسار مشترک می‌باشد. این منابع آب شامل چشمه خان‌علی، چاه بردکان و چاه‌های ۱ و ۲ سمیرم که در بالادست چشمه خوانسار قرار دارند، می‌باشند. مجموع آبدهی این منابع آب ۲۳۹ لیتر بر ثانیه است. با احتساب میانگین بارش ۴۲۰ میلی‌متر برای این محدوده و ضریب نفوذ ۴۰ درصد، مساحتی در حدود ۴۴/۶ کیلومتر مربع برای این چشمه و منابع آب داخل حوزه آبخیز آن به دست می‌آید. این مساحت در برگیرنده آهک‌های آسماری و شهبازان در



شکل ۹- محدوده حوزه آبخیز چشمه خونسار و منابع آب مجاور آن بر روی تصویر ماهواره‌ای

Figure 9- Catchment area of the Khansar Spring and its adjacent water sources on satellite image



شکل ۱۰- تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث ناحیه عقدک

Figure 10- Google earth satellite image of the Aghdak area

سمیرم، محل‌های مناسب جهت حفاری و بهره‌برداری آب به شرح جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۱۱ تصویر ماهواره‌ای محل‌های تعیین شده را نشان می‌دهد.

نتایج

با در نظر گرفتن پارامترهایی که در تعیین محل چاه مناسب هستند و همچنین با عنایت به بیان پهنه

جدول ۲- موقعیت‌های مناسب جهت حفاری در سمیرم
Table 2- Suitable locations for drilling in the Semirrom region

ردیف	نام نقطه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	سازند	عمق پیشنهادی (m)	نام محدوده	کد محدوده	تراز دهانه چاه
1	جنوب غرب نرمه	540663	3492226	شهبازان	150	کمه	2314	2610
2	چهل چشمه مهرگرد	538203	3496133	آسماری	150	کمه	2314	2385
3	گرموک ۱	556828	3475869	شهبازان	120	سمیرم	2315	2607
4	گرموک ۲	568208	3476221	آسماری	130	سمیرم	2315	2579



شکل ۱۱- تصویر ماهواره‌ای محل‌های مناسب حفر چاه در پهنه سمیرم

Figure 11- Satellite image of the suitable locations for well drilling in the Semirrom region

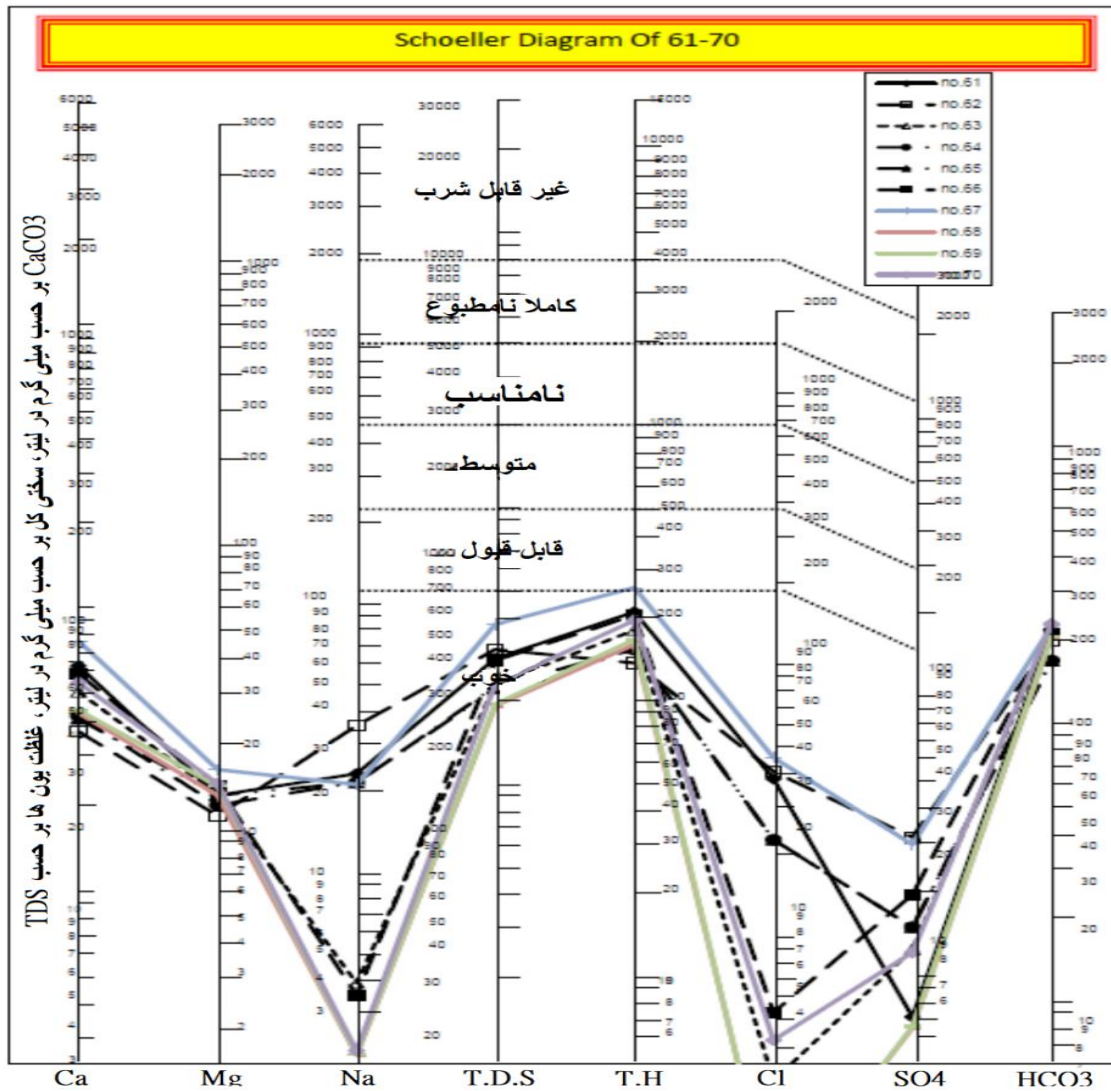
پیشنهادی جهت حفاری و پمپاژ جهت تامین بخشی از آب شرب شهرستان سمیرم و شهرضا از نظر کیفیت، مناسب شرب می‌باشد. کم بودن میزان تغییرات در این دو مرحله اندازه‌گیری احتمالاً به دلیل آن است که اندازه‌گیری‌ها در یک سال کم بارش انجام شده است. با توجه به اینکه گسل نرمه در بخش غربی این منطقه، در درون سازندهای آسماری و شهبازان فعال است و نیز رودخانه کاسگان در انتهای غربی پهنه و در مرز استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری با واحدهای آهکی تماس دارد، می‌توان نتیجه گرفت که این جریان بلند و مهم، مسیر مناسبی برای هدایت بخشی از جریان

در صورت موفق بودن چاه جنوب غرب نرمه با فواصل حدود ۵۰۰ متر، می‌توان چاه‌های دیگری در غرب این نقطه حفاری نمود. زیرا آب‌های این بخش به طرف رودخانه کاسگان منتقل و به بیرون از شهرستان (به طرف چشمه‌های مالخلیه و سندگان) زهکشی می‌گردد. حفر چاه‌های گرموک باعث تاثیر بر کاهش آبدهی چشمه گرموک می‌شوند. از جهت دیگر، نمودار شولر (شکل ۱۲) بیانگر آن است که املاح چشمه‌های منطقه همگی در حد پایینی بوده، عاملی که باعث کاهش کیفیت آب چشمه‌ها گردد، در منطقه وجود ندارد و در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نقطه

پیزومترهایی که بر اساس نتایج این مطالعه پیشنهاد گردیده‌اند در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۱۲ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری پیشنهادی را در منطقه مطالعه نشان می‌دهد. موقعیت این پیزومترها بر روی نقشه جغرافیایی منطقه به صورت یک لایه اطلاعاتی افزوده شده است.

همچنین برای بهره‌برداری از آب‌های کارستی منطقه، علاوه بر کمیت، بایستی کیفیت آن نیز بررسی شود. جهت تعیین قابل شرب بودن آب‌های منطقه، پارامترهای هیدروشیمی آب‌ها بررسی گردید و نتایج آن به صورت نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است.

آب این منطقه به‌سوی رودخانه کاسگان و حتی فراتر از آن، به سمت گسل دنا با امتداد شمالی-جنوبی فراهم می‌آورد. همچنین، این گسل به همراه گسل‌های فرعی با امتداد عرضی موجود در منطقه، نقش مؤثری در انتقال آب به نواحی پایین‌دست و حتی چشمه‌هایی در فاصله‌های دورتر نظیر سنگان ایفا می‌کند. به منظور شناخت لایه‌های مختلف سفره‌های کارستی، پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی در داخل آن‌ها، ارزیابی اثر بهره‌برداری و پمپاژ از سفره کارستی نو بررسی ارتباط هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی آن‌ها با سفره‌های آبرفتی مجاور، نیاز به حفر پیزومترهایی در داخل سفره‌های کارستی است که موقعیت برخی از



شکل ۱۱- دیاگرام شولر منابع آب منطقه مورد مطالعه

Figure 11- Schuler diagram of the water resources in the study area

بحث و نتیجه گیری

نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان می‌دهد که پهنه سمیرم دارای چندین نقطه مناسب برای حفاری چاه‌های آب شرب است که بر اساس پارامترهای ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و بیلان منطقه انتخاب شده‌اند. محل‌های پیشنهادی نشان‌دهنده توزیع متعادل چاه‌ها در مناطق آسماری و شهبازان است که می‌تواند تنوع شرایط هیدروژئولوژیکی را پوشش دهد. این نقاط توزیعی متعادل در بین دو سازند اصلی منطقه، یعنی آسماری و شهبازان، دارند که امکان بهره‌برداری متنوع از شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف را فراهم می‌سازد. در پژوهش‌های پیشین از روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی منابع آب زیرزمینی همچون روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فازی، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر مقایسات زوجی، استفاده شده است (Shaban et al., 2004; Bauer et al., 2005; Martínez-Santos & Andreu, 2010; Jukić & Denić-Jukić, 2008; Barmaki et al., 2015; Moradi et al., 2016; Vaezi Heir et al., 2018; Zia et al., 2019; Mokarram & Neghaban, 2019; Rasouli et al., 2020; Pour Akbari et al., 2020; Sepehri Pour, 2021; Rezaei Arefi et al., 2025). هرچند این روش در برخی مطالعات موفق بوده است، اما وابستگی شدید آن به نظر کارشناسان و تأثیرگذاری وزن‌دهی‌های ذهنی بر نتایج، دقت آن را کاهش می‌دهد. در مقابل، روش این تحقیق بر داده‌های بیلان واقعی آب و داده‌های زمین‌شناسی تکیه دارد و از محدودیت‌های ذهنی روش AHP فاصله می‌گیرد. روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای روش دیگری است که برخی محققان از آن برای اولویت‌بندی مکان‌های مناسب جهت حفر چاه استفاده کرده‌اند (Jukić & Denić-Jukić, 2008). این روش نسبت به AHP برتری دارد زیرا وابستگی بین معیارها را در نظر می‌گیرد، اما همچنان به دلیل وابستگی به ورودی‌های کارشناسی دارای محدودیت‌هایی است. مطالعه حاضر از مدل بیلان آبخوان استفاده کرده است که بدون نیاز به مقایسه‌های ذهنی، مستقیماً از داده‌های منطقه‌ای استفاده می‌کند که دقت نتایج در این روش بالاتر و قابل اعتمادتر است.

مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های مبتنی بر GIS از دیگر روش‌هاست که برخی مطالعات از این مدل‌ها برای تحلیل آبخوان‌های کارستی استفاده کرده‌اند (Martínez-Santos & Andreu, 2010; Vaezi Heir et al., 2018). مزیت این روش‌ها در توانایی پیش‌بینی رفتار آبخوان است، اما پیچیدگی و نیاز به داده‌های گسترده، اجرای آن را دشوار می‌سازد. در مقابل، روش مورد استفاده در این پژوهش با تحلیل بیلان آب و بررسی دقیق سازندهای زمین‌شناسی، راهکاری عملی و سریع برای مدیریت منابع آب ارائه می‌دهد. در مقایسه با مطالعات پیشین، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش تحلیل بیلان آب زیرزمینی و ارزیابی دقیق زمین‌شناسی منطقه خصوصاً مناطق کارستی، اطلاعات ارزشمندی از کیفیت و کمیت آب زیرزمینی برای مکان‌یابی چاه‌های بهره‌برداری ارائه می‌دهد. بررسی کیفیت آب و پایداری آن در طول دو مرحله اندازه‌گیری در این پهنه نیز حاکی از وجود شرایط مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی است. همانگونه که Ford و Williams (۲۰۰۷) بیان کردند آب‌های مناطق کارستی کیفیت بالایی داشته و برای شرب مناسب‌اند. یکی از نکات قابل توجه، نقش کلیدی گسل‌های نرمه و دنا در هدایت و تخلیه آب‌های زیرزمینی منطقه است. وجود این گسل‌ها، که در تماس مستقیم با رودخانه کاسگان و پهنه‌های همجوار هستند، می‌تواند در انتقال و تخلیه آب نقش مؤثری داشته باشد. همانگونه که مطالعه (Maqsoudi et al., 2009) نشان داد گسل‌ها و شکستگی‌های متعدد در منطقه بیستون در انتقال آب پهنه‌های کارستی نقش اصلی را بازی می‌کنند. البته که روش کنونی نسبت به بررسی ذخیره دینامیک آبخوان که در مطالعه بر روی کارست بیستون انجام گرفته است روشی دقیق‌تر و جامع‌تر است. این مسئله توسط (Tahouni, 1995) نیز در منطقه دشت ارژن بررسی شده است، در جایی که گسل‌ها نقش اصلی انتقال آب را به این دشت دارند؛ بنابراین، اهمیت پایش و مطالعه دقیق‌تر رفتار این گسل‌ها به‌ویژه در شرایط بارشی مختلف مورد تأکید

هیدروژئولوژیکی همخوانی دارد. مقایسه این یافته‌ها با مطالعات پیشین نشان داد که روش مورد استفاده در این پژوهش به دلیل تمرکز بر داده‌های واقعی منطقه‌ای و کاهش وابستگی به ورودی‌های کارشناسی، دقت بالاتری در مکان‌یابی چاه‌ها دارد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود از روش‌های ترکیبی شامل تحلیل بیلان آبخوان و مدل‌سازی عددی استفاده شود تا به بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق کارستی و افزایش پایداری تأمین آب کمک کند. همچنین مطالعات ردیابی رنگی و ایزوتوپی برای بررسی مسیرهای جریان آب زیرزمینی می‌تواند الهام بخش باشد. پایش بلندمدت کیفیت و کمیت آب‌های کارستی نیز جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری منابع می‌تواند انجام گیرد. ضمناً این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی مناسب برای ارزیابی سریع و کاربردی منابع آب کارستی در سایر مناطق مشابه کشور مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که توصیه می‌گردد عمق حداقل پیزومترها به گونه‌ای باشد که یا تا سنگ بستر (سازند نفوذناپذیر زیرین) و یا تا حدود ۵۰ متر زیر تراز آب سفره کارستی تداوم یابد.

انجام آزمایش‌های ردیابی رنگی و ایزوتوپی می‌تواند اطلاعات بیشتری در خصوص منابع اصلی آب‌های زیرزمینی منطقه و مسیرهای دقیق حرکت آن‌ها فراهم نماید. یکی از مزایای اصلی روش این مطالعه، استفاده از داده‌های بیلان آب زیرزمینی و بررسی مستقیم پارامترهای هیدروژئولوژیکی منطقه است که باعث کاهش وابستگی به قضاوت‌های کارشناسی می‌شود. همچنین، بررسی کیفیت آب در دو مرحله نمونه‌برداری، اطلاعات دقیقی درباره پایداری منابع آبی ارائه داده است. با این حال، محدودیت‌هایی نیز در این روش وجود دارد از جمله این که روش تحلیل بیلان نیازمند داده‌های دقیق و طولانی‌مدت از میزان ورودی و خروجی آب به آبخوان است که در برخی موارد با چالش‌هایی همراه است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، مدل‌سازی عددی به‌عنوان یک روش مکمل به کار گرفته شود تا ارزیابی جامع‌تری از پتانسیل آبخوان‌ها انجام شود. نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه کارستی سمیرم دارای پتانسیل بالایی برای تأمین آب شرب و کشاورزی است و مکان‌های پیشنهادی برای حفر چاه با داده‌های

References

- Afrasiabian, A. (1998). *The Importance of Karst Water Resources Studies and Research in Iran*. In Proceedings of the Second World Conference on Water in Karst Formations, Kermanshah. <http://doi.org/10.1007/s00254-006-0502-z>
- Andualem, T.G., & Demeke, G.G. (2019). Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24, 100610. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>
- Bahrami, S., Sarouei, H., & Souri, S. (2018). Identification of Karst Water Resources Potential Using Fuzzy Hierarchical Method (Case Study: Sefidkuh Anticline, Lorestan Province). *Scientific Quarterly of Water Resources Engineering*, 11(39), 35–44. (In Persian)
- Bauer, S., Liedl, R., Sauter, M., (2005). Modeling the influence of epikarst evolution on karst aquifer genesis: A time-variant recharge boundary condition for joint karst-epikarst development, *Water Resources Research*, 9, 41. <http://doi.org/10.1029/2004WR003321>
- Dashti Barmaki, M., Rezaei, M., & Ashjari, J. (2015). Potential Assessment of Karst Water Resources in Dovan and Shapur Mountains Based on Multi-Criteria Decision Making. *Iranian Water Research*, 9(1), 89–100. (In Persian).
- Dastaranj, A., & Jafari Aghdam, M. (2019). Modeling Groundwater Recharge in Dalahoo Karst Aquifer Using KARSTLOP Model. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Information*, 28(112), 231–249. (In Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38618>
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester, UK: Wiley. <http://doi.org/10.1002/9781118684986>

- Ghadimi, M., & Zangeneh Tabar, S. (2019). Evaluation of Suitable Areas for Karst Aquifer Recharge in Parav-Bisotoun Using KARSTLOP Model. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(1), 1–15. (In Persian)
- Ghobadi, M. (2007). Engineering Geology. First Edition. *Hamedan: Bu-Ali Sina University Press*. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87603.1402> (In Persian)
- Jafari, G., & Fouladi, N. (2024). The potential of water outflow from the Zagros folds into the Persian Gulf drainage basin. *Geography and Environmental Planning*, 35(2), 1–22. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.137318.1577> (In Persian)
- Janža, M. (2010). *Hydrological modeling in the karst area, Rižana spring catchment, Slovenia. Environmental Earth Sciences*, 61(5), 909-920. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0406-9>
- Jukić, D., Denić-Jukić, V. (2008). Estimating parameters of groundwater recharge model in frequency domain: Karst springs Jadro and Žrnovnica. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(22), <https://doi.org/10.1002/hyp.7057>
- Karimi, A.R (2024). Comparison of The Exploitation Methods of Zamkan Dam Water Leakage from an Economic Point of View. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (2), 149-160. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7435.1070> (In Persian)
- Karimi, H. (1997). *Hydrogeological and Hydrochemical Study of Springs and Piezometers in Poodeno Anticline, Firouzabad*. Master's Thesis, Shiraz University, Department of Geology. (In Persian)
- Karimi, H. (2003). Hydrogeological Behavior of Alvand basin karst aquifers, Kermanshah, *Unpublished Ph.D. Thesis, Shiraz University*. (In Persian)
- Karimi, H., & Karimi, A. (2022). *Potential Assessment of Water Resources in Hard Formations (Karst) in South of Isfahan Province*. Isfahan Regional Water Company. Research Project, University of Ilam. (In Persian)
- Kuhta, M., Brkić, Ž., & Stroj, A., (2012). Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia, *Geologia Croatica*, 1, 65, 41-52. <http://doi.org/104154/gc.2012.03>
- Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), 25-43. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90230-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90230-0)
- Maqsoodi, M., Haji Karimi, A., Safari, F., & Chahar Sarahi, Z. (2009). Study of Karst Development in Parav-Bisotoun Massif Using Recession Coefficient, Spring Hydrograph Analysis, and Isotopic and Chemical Results. *Journal of Physical Geography Research*, 78(13), 12–28. (In Persian)
- Martínez-Santos, P., & Andreu, J. M. (2010). Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 388 (3–4), 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.018>
- Martínez-Santos, P., & Andreu, J.M., (2010). Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers. *Journal of hydrology*, 3-4, 388, 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.018>
- Mokarram, M., & Neghaban, S. (2019). Investigation and Identification of Areas with Potential for Karstification Using Fuzzy Method and Hierarchical Analysis Model. *Geography and Environmental Planning*, 30(2), 121–134. <https://doi.org/10.22108/gep.2019.118017.1171> (In Persian)
- Moradi, S., Kalantari, N., & Charchi, A., (2016). Karstification Potential Mapping in Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Fuzzy Logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques, *Geopersia*, 2(6), 265-282. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2016.58671>
- Nakhaei, A., Zangeneh Asadi, M. A., Behniafar, A., & Goli Mokhtari, L. (2023). Zoning of karst development in the Baghamch-Kashafrud watershed using the fuzzy logic ANP model. *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 230–255. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.346563.1362> (In Persian)

- Naseri, H. (1991). *Engineering Geology of Carbonate Formations in Iran*. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian)
- Pourakbari, S., Kalantari, N., Aghdaki, Y., & Mosleh, A. (2020). Potential Assessment of Karst Water Resources Using RS, GIS, and AHP (Case Study: Lili and Keyno Anticlines in Northeast Khuzestan). *Scientific Quarterly of Water Resources Engineering*, 13(45), 99–112. <https://doi.org/10.22034/hydro.2022.48953.1254> (In Persian)
- Pourhaghi, A., Akhondali, A.M., Radmanesh, F., & Mirzaee, S.Y. (2014). Manage the groundwater sources exploration of the nourabad plain in the drought conditions with modflow modeling. *Irrigation sciences and engineering (jise) (Scientific Journal of Agriculture)*, 37(2), 71-82. (In Persian)
- Radulovic, M., Stevanovic, Z., & Radulovic, M. (2012). A new approach in assessing-recharge of highly karstified terrains—Montenegro case studies. *Environmental Earth Sciences*, 65(8), 2221-2230. <http://doi.org/10.1007/s12665-011-1378-0>
- Rahnamayi, M. (1994). *Study of Infiltration and Runoff Phenomena in Karstic Carbonate Rocks*. Master's Thesis, Shiraz University, Department of Geology. (In Persian)
- Rasouli, A., Emami, K., Babakhani, Z., & Golshanizad, S. (2020). Karst development zoning to identify karst water resources using Fuzzy logic model and AHP (Takab Basin). *Geography and Human Relationships*, 2(4), 240-253. (In Persian)
- Reisi, A. (1999). *Method of Calculating the Water Balance of Karst Waters in the Simple Folded Zones of Zagros*. In First Regional Conference on Water Balance, Ahvaz, 39–49. (In Persian)
- Rezaeiarefi, M., Motamedirad, M., Taghavimoghadam, I., & Sadeghi, M. (2024). Finding the potential of karst water resources in Birjand city using hierarchical analysis model and geographic information system. *Journal of Physical Geography*, 17(64), 17–38. (In Persian)
- Sajadi, Z., Kalantari, N., Cherchi, A., & Mousavi, S. S. (2022). Investigating the hydraulic connection of karst structures using hydrogeochemical and isotopic methods in the water resources of Izeh region, northern Khuzestan Province. *Hydrogeology*, 7(2), 121–142. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.117001.1406>
- Saman Abrah Consulting Engineers. (2016). *Studies on Preparing Water Balance of Study Areas in the Karun Great Basin (Up to the Water Year 2010-2011)*, Volume Five: Water Resources Assessment Report. Appendix 15: Water Balance of Semirom Study Area (2315), Code: 39-105-SR. (In Persian)
- Sauter, M. (1992) Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (*Gallusquelle, Malm, SW. Germany. Report, Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten* (TGA), TGA, C13, 1992.
- Sepehri Pour, A., & Vaezi Heir, A. (2021). Exploration and Investigation of Strategic Water Resources in Hard and Karst Formations to Supply Drinking Water in Miyaneh County under Critical Conditions. *Advanced Applied Geology*, 11(2), 332–348. <https://doi.org/10.22055/aag.2020.33531.21> (In Persian)
- Shaban, A., BouKheir, R., Froidefond, J., Khawlie, M., & Girard, M-C. (2004). Characterization of morphometric factors of drainage system interrelated to rock infiltration: the case of the Occidental Lebanon. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 48(1), 79-94. <http://doi.org/10.1127/zfg/48/2004/79>
- Tahouni, P. (1995). Study and Recognition of Karst Forms in the Dasht-e Arjan and Kazeroon Area to Estimate the Volume of Groundwater. *Master's Thesis, University of Tehran, Faculty of Literature and Humanities*. (In Persian)
- Vaezi Hir, A., Khalkhali, M., & Tabarmaie, M. (2024). Groundwater potential assessment in hard and karstic formation units of West Azerbaijan Province. *Water and Soil*, 38(3), 337–350. (In Persian)
- Zia, H., Karami, G., & Taheri, A. (2019). Estimation of Groundwater Recharge Potential in Karst Areas of Arid Regions (Case Study: Shotori Mountain Range, Central Iran). *Geosciences*, 29(114), 85–96. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.117001.1406>

Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province

Iman Davoodi¹, Mostafa Moradi^{1*}, Reza Basiri¹, Pejman Tahmasebi Kohyani²

1. Department of Forestry and Cellulose Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2. Department of Rangeland management, Faculty of Natural Resources and Earth Science, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

* Corresponding author: moradi4@gmail.com

(Received: 14 March 2025

Revised: 17 July 2025

Accepted: 03 August 2025)

Extended Abstract

Introduction: In recent decades, concerns about climate change and unprecedented greenhouse gas emissions have highlighted the importance of carbon sequestration as a key tool for mitigating the negative effects of this phenomenon. Ecosystems, especially forests, capture atmospheric carbon through photosynthesis and store it in their tissues and soil. This process helps reduce atmospheric carbon levels and mitigate greenhouse gas emissions. However, the potential of ecosystems for carbon sequestration varies and is directly influenced by their functional diversity. Different species in more diverse forest ecosystems, perform different roles, such as nitrogen fixation, enhancing soil organic matter, and protecting the soil. Therefore, such ecosystems likely have a greater capacity to capture and conserve carbon. Understanding ecosystem services requires an understanding of functional diversity, which governs ecosystem processes through various components. Different plant species have different performance traits, resulting in varying abilities to absorb, store, and emit carbon. Thus, the relationship between functional diversity and carbon storage is important. This study aimed to evaluate the functional diversity and carbon storage of the *Quercus brantii* Lindl. forest in Dehdz city, Khuzestan Province.

Materials and methods: To study the correlation between different components of functional diversity and carbon storage, 16 plots were selected in a representative *Quercus brantii* forest in Dehdz, Khuzestan Province. The following parameters were measured to calculate community-weighted mean (CWM), functional divergence (FDvar), and functional dispersion (FDis) as indices of functional diversity: six plant traits (leaf nitrogen content, leaf phosphorus content, specific leaf area, plant height, wood specific gravity, and leaf dry matter content), total ecosystem carbon (TEC), aboveground biomass carbon (AGBC), aboveground litter carbon (ALC), and soil organic carbon (SOC). Principal component analysis (PCA) was used to identify the most important independent variables, which were then used in stepwise multiple linear regression analysis to determine which components best explain the variability in carbon storage.

Results and Discussion: The mean organic carbon amounts in TEC, AGBC, ALC, and SOC were 89.5, 11, 3, and 74.4 tons per hectare, respectively. The first PCA axis, explaining 41.9% of the variance, was characterized by the CWM of height, while the second axis, explaining 34.3% of the variance, was characterized by the CWM of specific leaf area. Results showed that litter carbon was predicted by functional divergence, while soil carbon was predicted by CWM. Both were related to the specific leaf area index, which had a negative association. In the study area, the CWM of leaf nitrogen and specific leaf area, as well as the FDvar related to specific leaf area, were identified as the most important factors for predicting carbon storage. The final model for biomass indicated that an increase in nitrogen content leads to an increase in carbon storage. Overall, significant effects of functional diversity on some plant traits such as leaf nitrogen content and specific leaf area were observed.

Conclusion: This study found that indices based on a single trait, such as CWM and FDvar, were more important for estimating carbon storage than the FDis index, which considers multiple traits. Additionally, the most important plant traits for carbon estimation were specific leaf area and leaf nitrogen content.

Keywords: Functional diversity, functional dispersion, organic carbon, biomass, community-weighted mean.

Citation: Davoodi, I., Moradi, M., Basiri, R., & Tahmasebi Kohyani, P. (2026). Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 126-146. doi= 10.22034/iwm.2025.2057984.1221

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 ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان

ایمان داوودی^۱، مصطفی مرادی^{۱*}، رضا بصیری^۱، پژمان طهماسبی کهیانی^۲

۱. گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۲. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*نویسنده مسئول: moradi4@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده مبسوط

مقدمه: در دهه‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد تغییرات اقلیمی و انتشار بی‌سابقه گازهای گلخانه‌ای، اهمیت ذخیره‌سازی کربن به عنوان یکی از راه‌های اصلی کاهش تأثیرات منفی این پدیده بیش از پیش آشکار شده است. اکوسیستم‌ها به‌ویژه جنگل‌ها از طریق فتوسنتز، کربن را جذب کرده و در بافت‌های گیاهی و خاک ذخیره می‌کنند. این فرآیند به کاهش سطح کربن در اتمسفر و تعدیل اثرات گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. با این حال توانایی اکوسیستم‌ها در ذخیره‌سازی کربن متفاوت بوده و به‌طور مستقیم تحت تأثیر تنوع عملکردی آنها است. اکوسیستم‌هایی که تنوع عملکردی بالایی دارند مانند جنگل‌ها که از گونه‌های مختلف گیاهی تشکیل شده و هر یک وظیفه خاصی مثل تثبیت نیتروژن، افزایش ماده آلی خاک و حفاظت از خاک را بر عهده دارند، ظرفیت بیشتری برای حفظ و افزایش ذخیره کربن دارند. بررسی تنوع عملکردی نقش مهمی در شناخت خدمات اکوسیستم دارد زیرا هر اکوسیستم دارای فرآیندی است که به‌وسیله مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی اداره می‌گردند. از آنجایی که گونه‌های گیاهی مختلف دارای ویژگی‌های عملکردی متفاوتی هستند، در نتیجه در توانایی جذب، ذخیره و انتشار کربن عملکرد دارند. بنابراین بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی و ذخیره کربن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مطالعه با هدف شناخت عملکردی و ذخیره کربن منطقه جنگلی دهدز بلوط بلند با گونه غالب بلوط ایرانی در شهرستان دهدز استان خوزستان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: برای ارتباط بین مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن از ۱۶ قطعه نمونه در منطقه جنگلی معرف بلوط ایرانی در شهرستان دهدز استان خوزستان استفاده شد. شش ویژگی گیاهی شامل نیتروژن برگ، فسفر برگ، شاخص سطح ویژه برگ، ارتفاع گیاه، وزن مخصوص چوب و محتوای وزن خشک برگ و نیز ذخیره کربن کل، زیتوده، لاشبرگ و خاک در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شد تا شاخص میانگین وزنی، شاخص واگرایی عملکردی و شاخص پراکندگی عملکردی به عنوان شاخص‌های تنوع عملکردی محاسبه شوند. با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مهمترین متغیرهای مستقل جهت ورود به تحلیل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. در این مطالعه از رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام استفاده شد تا مشخص شود که کدام مؤلفه تنوع عملکردی، ذخیره کربن را به بهترین وجه تبیین می‌کند.

نتایج و بحث: میانگین مقدار کربن آلی کل اکوسیستم، زیتوده، لاشبرگ و خاک به ترتیب ۸۹/۵، ۱۱، ۳ و ۷۴/۴ تن در هکتار به‌دست آمد. مهمترین ویژگی گیاهی بر روی محور اول PCA با واریانس ۴۱/۹ درصد، شاخص میانگین وزنی ارتفاع و بر روی محور دوم PCA با واریانس ۳۴/۳ درصد، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ بود. نتایج نشان داد که بهترین متغیر برای پیش‌بینی کربن لاشبرگ، شاخص واگرایی سطح ویژه برگ می‌باشد. همچنین بهترین متغیر برای پیش‌بینی کربن خاک نیز شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ می‌باشد. شاخص میانگین وزنی نیتروژن برگ و شاخص سطح ویژه برگ و همچنین شاخص واگرایی مربوط به شاخص سطح ویژه برگ از مهمترین مؤلفه‌ها در برآورد ذخیره کربن در منطقه مورد مطالعه بودند. مدل پیش‌بینی شده نهایی برای زیتوده نشان داد که با افزایش میزان نیتروژن برگ، میزان ذخیره کربن در بخش زیتوده آن بیشتر می‌شود. بطورکلی اثرات معنی‌دار قوی شاخص‌های تنوع عملکردی روی برخی از ویژگی‌های گیاهی مثل میزان نیتروژن برگ و شاخص سطح ویژه برگ یافت شد.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه نقش شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی مثل میانگین وزنی و شاخص واگرایی عملکردی در برآورد ذخیره کربن مهم‌تر تشخیص داده شد. همچنین شاخص پراکندگی مبتنی بر چند ویژگی که پراکنش ویژگی‌های گیاهی را در چند بعد نشان می‌دهد معنی‌دار نشد. از طرفی، شاخص ویژه سطح برگ و میزان نیتروژن برگ به عنوان مهمترین ویژگی‌های گیاهی مؤثر در برآورد کربن تعیین شدند.

واژه‌های کلیدی: تنوع عملکردی، شاخص پراکندگی، کربن آلی، زیتوده، شاخص میانگین وزنی.

استناد: داوودی، الف.، مرادی، م.، بصیری، ر.؛ و طهماسبی کهیانی، پ. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱۶(۱)، ۱۴۶-۱۲۶.

حق چاپ:



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

مقدمه

در دهه‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد تغییرات اقلیمی و انتشار بی‌سابقه گازهای گلخانه‌ای، اهمیت ذخیره‌سازی کربن به عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای کاهش تأثیرات منفی این پدیده بیش از پیش آشکار شده است (Makarieva et al., 2023). اکوسیستم‌های زمینی به‌ویژه جنگل‌ها از طریق فرآیند فتوسنتز، کربن را جذب کرده و در بافت‌های گیاهی و خاک ذخیره می‌کنند. این فرآیند به کاهش سطح کربن در اتمسفر و تعدیل اثرات گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند (Jagadesh et al., 2024). با این حال توانایی اکوسیستم‌ها در ذخیره‌سازی کربن متفاوت بوده (Mirzaei et al., 2016; Forogh Nasab et al., 2020) و به‌طور مستقیم تحت تأثیر تنوع عملکردی، تنوع ساختاری (Alinejadi et al., 2016)، جهت جغرافیایی (Karamian & Hosseini, 2015) و حتی فعالیت انسانی است (Parhizkar et al., 2025). در اکوسیستم‌هایی که دارای یک گونه غالب هستند (مثل جنگل‌های زاگرس که گونه غالب آن بلوط ایرانی است)، ترسیب و ذخیره کربن به عواملی مثل قطر و سن درخت (Alinejadi et al., 2016)، ارتفاع از سطح دریا (Sarvazad et al., 2023) و دانه‌زاد یا شاخه‌زاد بودن درخت بستگی دارد (Mahdavi et al., 2020). در اکوسیستم‌هایی که تنوع عملکرد بالاست، گیاهان با ویژگی متفاوت ممکن است بطور کارآمدتری از منابع استفاده کنند که این موضوع منجر به افزایش جذب کربن و پایداری بیشتر ذخیره کربن در برابر تغییرات اقلیمی می‌شود (Junttila et al., 2023). بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی و ذخیره کربن در چند بعد اهمیت دارد. این بررسی‌ها به بکارگیری استراتژی‌های مؤثرتر برای حفاظت از اکوسیستم‌های غنی از کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کرده (Morecroft et al., 2019) و موجب بهبود مدیریت منابع طبیعی و

حفظ تنوع زیستی شده و در نهایت می‌تواند منجر به افزایش جذب و ذخیره کربن شود (Imani et al., 2016; Moradi & Moradi, 2024). سیاست‌گذاران می‌توانند با توجه به نتایج چنین تحقیقاتی، برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی را تدوین کنند که هدف آنها حفظ یا افزایش تنوع عملکردی اکوسیستم‌ها به منظور افزایش ظرفیت ذخیره کربن و مقابله با تغییرات اقلیمی باشد (Chen et al., 2023).

ویژگی‌های گیاهی نقش مهمی در ذخیره کربن ایفا می‌کنند. برخی از ویژگی‌های گیاهی مؤثر در ذخیره کربن شامل شاخص ویژه سطح برگ^۱ (SLA) با سرعت رشد و جذب کربن رابطه مستقیمی دارد، درحالی که گیاهان با شاخص ویژه سطح برگ پایین، کربن را در ساختارهای مقاوم‌تر مانند برگ‌های ضخیم‌تر ذخیره می‌کنند (Díaz et al., 2007). میزان نیتروژن برگ^۲ (LNC) نیز یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین استراتژی‌های عملکردی گیاهان به شمار می‌رود، چرا که بر کارایی فتوسنتز تأثیرگذار است. گونه‌هایی با LNC بالا معمولاً دارای نرخ فتوسنتز بالاتر، رشد سریع‌تر، و چرخه زندگی کوتاه‌تری هستند، که با استراتژی مصرف‌گر منابع^۳ هم‌خوانی دارد. این گیاهان قادرند کربن بیشتری را از هوا جذب کرده و آن را با سرعت بیشتری به زیئوده تبدیل کنند (Mokany et al., 2004; Wright et al., 2008). در مقابل، گونه‌هایی با LNC پایین‌تر اغلب دارای رشد آهسته‌تر و صفات محافظه‌کارانه‌تری بوده که آن‌ها را در برابر محدودیت منابع مقاوم‌تر می‌سازد.

میزان نیتروژن برگ نیز بر کارایی فتوسنتز تأثیر می‌گذارد، بطوری‌که گیاهانی با نیتروژن بالاتر، کربن بیشتری را از هوا جذب می‌کنند و به سرعت به زیئوده تبدیل می‌کنند (Mokany et al., 2008). میزان فسفر برگ^۴ (LPC) به توانایی گیاهان برای حفظ و استفاده بهینه از فسفر اشاره دارد. این شاخص می‌تواند نقش

3- resource-acquisitive

4- Leaf Phosphorus Content

1- Specific Leaf Area

2- Leaf Nitrogen Content

در حالی که تنوع گونه‌ای تنها به شمار گونه‌های موجود در یک زیستگاه اشاره دارد، تنوع عملکردی^۳ به تفاوت در ویژگی‌های عملکردی گونه‌ها می‌پردازد؛ ویژگی‌هایی که مستقیماً بر عملکردهای اکوسیستم مانند بهره‌وری، چرخه مواد غذایی، و ذخیره کربن اثر می‌گذارند. مفهوم تنوع عملکردی، ریشه در تلاش برای پیوند بین ویژگی‌های گیاهی و فرآیندهای بوم‌شناختی دارد (Diaz & Cabido, 2001) این مفهوم با دو فرضیه کلیدی همراه است: فرضیه تأثیر گونه‌های غالب^۴ تأکید دارد که گونه‌های غالب با ویژگی‌های خاص خود، بیشترین تأثیر را بر عملکرد اکوسیستم دارند. فرضیه مکملی^۵ بیان می‌کند که وجود طیف متنوعی از صفات عملکردی، بهره‌برداری کارآمدتری از منابع فراهم می‌کند (Diaz & Cabido, 2001).

برای سنجش تنوع عملکردی، شاخص‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی شاخص‌های تک‌بعدی و شاخص‌های یکنواختی تقسیم کرد. شاخص‌های تک‌بعدی مثل میانگین وزنی جامعه^۶ (CWM) و واگرایی عملکردی^۷ (FDiv) و شاخص‌های مربوط به گستره و یکنواختی صفات مثل پراکندگی عملکردی^۸ (FDis)، غنای عملکردی، یکنواختی عملکردی و شاخص Rao می‌باشد. در این مطالعه، تمرکز بر شاخص‌های CWM، FDiv و FDis بوده است. دلیل انتخاب این شاخص‌ها، تمرکز پژوهش بر نقش گونه‌های غالب از طریق CWM، پراکندگی کلی صفات (FDis)، و واگرایی ویژگی‌ها به سمت صفات خاص (FDiv) بوده است. شاخص‌های تنوع عملکردی، از ابزارهای ضروری برای درک نقش ویژگی‌های گیاهی در عملکرد و خدمات اکوسیستم هستند. این شاخص‌ها نه تنها تنوع گونه‌ها را در یک جامعه منعکس می‌کنند بلکه نشان می‌دهند که ویژگی‌های آنها چگونه به فرآیندهایی

مهمی در افزایش بهره‌وری فتوسنتزی داشته باشد که این موضوع منجر به افزایش جذب دی‌اکسید کربن و ذخیره کربن در زیتوده خواهد شد. گیاهانی که فسفر را بهتر تثبیت کنند توانایی بیشتری در تولید زیتوده دارند و در نتیجه کربن بیشتری را از طریق فتوسنتز ذخیره می‌کنند (Kvakić *et al.*, 2020). محتوای ماده خشک برگ^۱ (LDMC) بیان‌گر نسبت وزن خشک به وزن تازه برگ است و نقش مهمی در فرآیندهای بوم-شناختی و ذخیره کربن ایفا می‌کند. گیاهانی که محتوای ماده خشک برگ آنها بالا می‌باشد معمولاً برگ‌های مقاوم‌تر و بادوام‌تری دارند و سرعت تجزیه آنها کمتر است. این موضوع باعث می‌شود که کربن ذخیره شده در برگ‌ها برای مدت طولانی‌تری در زیتوده باقی بماند و به این ترتیب به افزایش ذخیره کربن در اکوسیستم کمک می‌کند (Pakeman *et al.*, 2011). همچنین گیاهانی با ارتفاع بیشتر توانایی بالاتری در جذب نور و تولید زیتوده دارند که این امر منجر به افزایش ظرفیت ذخیره کربن می‌کند (Freschet *et al.*, 2015). یکی دیگر از ویژگی‌های گیاهی وزن مخصوص چوب^۲ (WSG) می‌باشد که بطور مستقیم با توانایی ذخیره کربن مرتبط است. درختانی با وزن مخصوص چوب بالاتر معمولاً چگالی یا تراکم چوب بیشتری داشته و ذخیره کربن آنها در واحد حجم چوب بالاتر می‌باشد (Keerthika & Parthiban, 2022). این نوع درختان به دلیل داشتن چوب متراکم‌تر، مدت طولانی‌تری کربن را در ساختار خود نگه می‌دارند و مقاومت بیشتری در برابر تجزیه و پوسیدگی دارند که این موضوع باعث حفظ کربن در اکوسیستم به مدت طولانی‌تری می‌شود (Pati *et al.*, 2023).

درک ساختار و عملکرد جوامع گیاهی، نیازمند بررسی تنوع آن‌ها از منظرهای مختلف است. تنوع زیستی به‌طور کلی شامل تنوع گونه‌ای و عملکردی است.

5- Niche Complementarity
6- Community-Weighted Mean
7- Functional Divergence
8- Functional Dispersion

1- Leaf Dry Matter Content
2- Wood Specific Gravity
3- Functional diversity
4- Mass Ratio Hypothesis

کرد. Karami و همکاران (۲۰۲۲) در اکوسیستم جنگلی بلوط غرب به دنبال بررسی برتری شاخص‌های تنوع ساختاری بر شاخص‌های تنوع عملکردی در امتداد گرادیان خشکیدگی بلوط بودند. میزان ذخیره کربن در خاک با شاخص واگرایی عملکردی محتوای ماده خشک برگ و ارتفاع رابطه مثبت معنی‌داری نشان داد. Jafarian و همکاران (۲۰۱۸) نیز با مطالعه اثرات شدت چرای دام بر تغییرات شاخص‌های تنوع گونه‌ای و تنوع کارکردی گونه‌های گیاهی به این نتیجه رسیدند که شاخص چندوجهی محدب نسبت به افزایش شدت چرا تغییرات زیادی پیدا می‌کند در حالیکه شاخص غنای گونه‌ای تغییر کمی دارد. در مطالعه دیگری توسط Mansoori و همکاران (۲۰۱۳) به این نتایج رسیدند که تنوع عملکردی در مناطق خشک با چرای حیوانات افزایش داشته است. در خارج از کشور مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. در پژوهشی در یک اکوسیستم جنگلی معتدله هیمالیا در هند، ویژگی‌هایی مانند میانگین وزنی ارتفاع، SLA، میزان فسفر و نیتروژن برگ، شاخص واگرایی ارتفاع، و محتوای ماده خشک برگ به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده ذخیره کربن کل اکوسیستم معرفی شدند؛ این ذخیره شامل کربن زیتوده هوایی، لایه لاشبرگ و خاک بوده است (Rawat et al., 2019). در مطالعه‌ای در جنگل‌های شمال تایلند میانگین وزنی شاخص ویژه سطح برگ با میزان ذخیره کربن خاک و کربن کل اکوسیستم همبستگی مثبت معنی‌داری نشان داد (Asanok et al., 2021). Moles و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که دو ویژگی گیاهی مهم از تنه درخت به عنوان محل ذخیره کربن وزن مخصوص چوب و ارتفاع گیاه است. رابطه بین ذخیره کربن و تنوع عملکردی در اکوسیستم‌های جنگلی نیمه‌خشک آرژانتین مورد مطالعه قرار گرفت. میانگین وزنی و شاخص کمی واگرایی ارتفاع و وزن مخصوص چوب به عنوان

مانند ذخیره کربن کمک می‌کنند (Petchey & Gaston, 2006). سه شاخص رایج شامل شاخص میانگین وزنی جامعه (CWM)، معیاری از میانگین ویژگی‌های یک جامعه است که با توجه به فراوانی هر گونه وزن‌دهی می‌شود. این شاخص، نشان‌گر تأثیر گونه‌های غالب بر فرآیندهای کلی اکوسیستم مثل ذخیره کربن می‌باشد. شاخص واگرایی عملکردی (FDvar) نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی یا برجسته شدن ویژگی‌های خاص در بین گونه‌ها است. این شاخص می‌تواند بر اساس یک ویژگی^۱ یا ترکیب چند ویژگی^۲ محاسبه شود، که هر کدام فرضیات متفاوتی را درباره توزیع صفات در جامعه دنبال می‌کنند (Mason et al., 2005). شاخص پراکندگی عملکردی (FDIs) متوسط فاصله گونه‌ها از مرکز ویژگی‌های جامعه و بیانگر گسترش صفات در جامعه است. این شاخص تنوع ویژگی‌ها و تأثیرات آن بر عملکرد بوم‌شناختی را مورد تأکید قرار می‌دهد (Laliberté & Legendre, 2010).

اطلاعات اندکی در خصوص نقش شاخص‌های تنوع عملکردی روی ذخیره کربن در اکوسیستم جنگلی در ایران (کربن درخت، لاشبرگ و خاک) وجود دارد. Tahmasebi و همکاران (۲۰۱۷) رابطه تنوع عملکردی و کربن ذخیره شده در کل اکوسیستم، خاک، لاشبرگ و زیتوده در چهار اکوسیستم شامل یک ناحیه در استان خوزستان و سه ناحیه دیگر در چهارمحال و بختیاری بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها مشخص کرد که در اقلیم نیمه‌خشک منطقه‌ای از استان چهارمحال و بختیاری، شاخص واگرایی عملکردی شاخص سطح ویژه برگ (SLA) با میزان ذخیره کربن زیتوده و لاشبرگ، رابطه‌ی معکوس معنی‌داری نشان داد. در مقابل، در اقلیم گرم‌تر منطقه خوزستان، شاخص میانگین وزنی وزن مخصوص چوب (WSG) با میزان ذخیره کربن خاک رابطه مستقیم و معنی‌داری برقرار

شمال‌شرق استان خوزستان موسوم به بلوط‌بلند در شهرستان دهدز است. این منطقه بین طول‌های $۵۰^{\circ}۱۸'$ و $۵۰^{\circ}۲۸'$ شرقی و عرض‌های $۳۱^{\circ}۳۶'$ و $۳۱^{\circ}۴۴'$ شمالی و دامنه ارتفاعی حدود ۷۰۰ تا ۱۹۰۰ متر از سطح دریا با جهت غالب جنوب‌غربی قرار گرفته است (شکل ۱). خاک منطقه عمدتاً سیلتی رسی و دارای عمق کم و عمدتاً فاقد سنگریزه می‌باشد. اقلیم منطقه مدیترانه‌ای با بارندگی ۵۹۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۲۱ درجه سانتی‌گراد است (Tahmasebi et al., 2017) (شکل ۱). پوشش درختی غالب اشکوب بالای جنگل بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) با فرم دانه‌زاد است و گونه بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) به صورت پراکنده است. پوشش علفی و درختچه‌ای زیراشکوب شامل علف بام (*Bromus tectorum* L.)، گون شوشی (*Astragalus susianus* Boiss.)، دافنه (*Daphne mucronata* Royle.)، چمن پیازک‌دار (*Poa bulbosa* L.) و شبدر تماشایی (*Trifolium grandiflorum* Schreb.) می‌باشد.

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

تعداد ۱۶ قطعه نمونه ۳۰ در ۳۰ متر برای مدل‌سازی کربن آلی کل اکوسیستم^۱ (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی^۲ (AGBC)، کربن لاشبرگ^۳ (ALC) و ذخیره کربن آلی خاک^۴ (SOC) در نظر گرفته شدند. روش نمونه‌برداری به صورت انتخابی و نحوه انتخاب قطعات نمونه بر اساس جنگل‌گردشی و بررسی‌های میدانی صورت گرفت. بطوری‌که این نمونه‌ها مبین شرایط متنوع پوشش گیاهی منطقه باشند. زیتوده پوشش گیاهی علفی در اوایل فصل رویش، اوایل اردیبهشت ماه، در ۵ میکروقطعه نمونه چهار مترمربعی که در چهار گوشه و مرکز هر قطعه نمونه قرار داشتند (Tahmasebi et al., 2017) برداشت شد.

متغیرهای پیش‌بینی کننده ذخیره کربن زیتوده، لاشبرگ و کل اکوسیستم در ۱۶ رویشگاه از جنگل‌های نیمه‌خشک آرژانتین در مدل رگرسیون خطی چندگانه قرار گرفتند (Conti & Díaz, 2013). در مطالعه دیگری Yang و همکاران (۲۰۱۹) نقش تنوع عملکردی در ذخیره کربن پوشش گیاهی در در چین را مورد مطالعه قرار دادند. رابطه مثبت معنی‌داری بین شاخص میانگین وزنی ارتفاع و میزان ذخیره کربن کل، خاک، لاشبرگ و زیتوده به دست آمد. Zuo و همکاران (۲۰۱۶) همبستگی تنوع عملکردی و میزان ذخیره کربن در مراتع شنی مغولستان را مطالعه کردند. در این تحقیق، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ به عنوان بهترین متغیر پیش‌بینی کننده کربن خاک معرفی شد. با توجه به اینکه گیاهان مختلف، ظرفیت متفاوتی در ذخیره و انتشار کربن دارند، بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی مبتنی بر ویژگی گیاهان و ذخیره کربن در بخش‌های مختلف یک اکوسیستم مثل زیتوده، لاشبرگ و خاک دارای اهمیت است. از طرفی در مناطق جنگلی ایران این نوع مطالعه بسیار کم صورت گرفته است. بر این اساس هدف این تحقیق بررسی ارتباط بین شاخص‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن در سطوح مختلف در منطقه جنگلی دهدز واقع در شمال‌شرق استان خوزستان می‌باشد. همچنین این مطالعه به دنبال پاسخ به این سوال است که کدام ویژگی(های) گیاهی در پیش‌بینی ذخیره کربن این منطقه جنگلی مهم می‌باشد؟

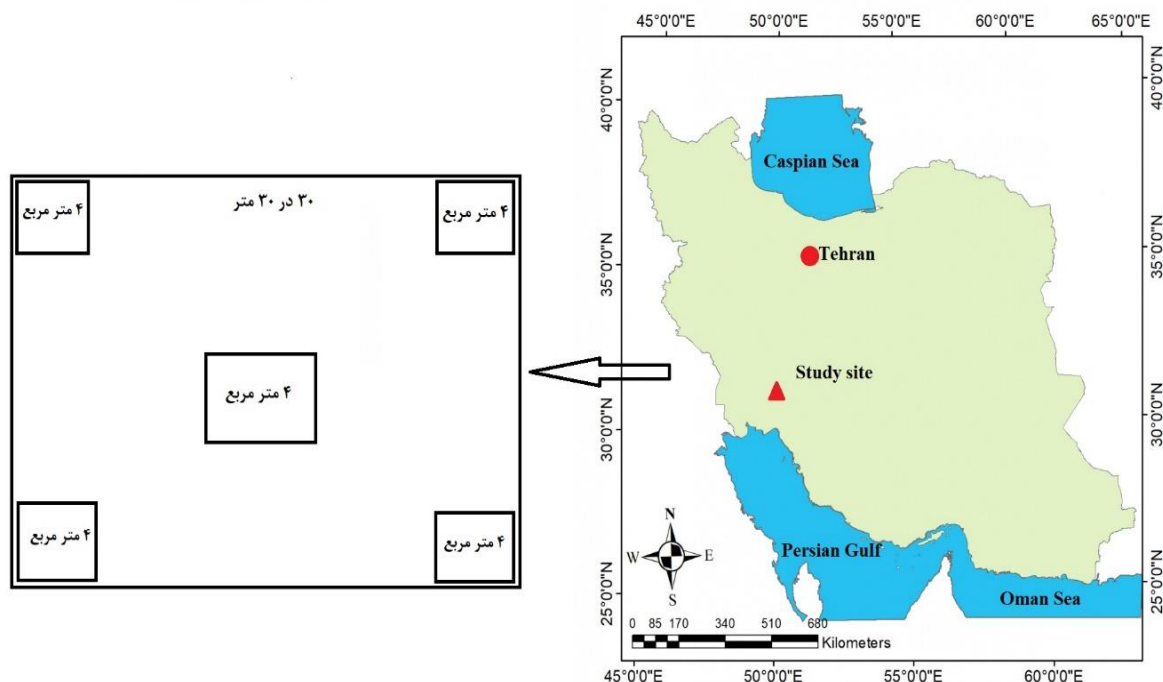
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با نام بلوط بلند از توابع شهر دهدز در استان خوزستان می‌باشد که بین دو سد کارون سه و چهار است. منطقه مورد مطالعه، کوهستانی بوده و شامل حدود ۵۰۰ هکتار از مناطق جنگلی واقع در

3- Aboveground Litter Carbon
4- Soil Organic Carbon

1- Total Ecosystem Carbon
2- Aboveground Biomass Carbon



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه جنگلی دهدز در استان خوزستان

Figure 1- Geographical location of Dehdz forest area in Khuzestan province

$$ABG = 0.2326x_Q^{2.079} \quad r^2 = 0.986 \quad (1)$$

$$ABG = 0.638x_p^{2.786} \quad r^2 = 0.93 \quad (2)$$

که در آن AGB: زیتوده خشک روی زمینی به کیلوگرم و XQ: قطر برابر سینه به سانتی‌متر و Xp: قطر تاج به متر است. درصد پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای در میکروقطعه نمونه‌های چهار مترمربعی تخمین زده شد. درصد پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای به صورت جداگانه در میکروقطعه‌های نمونه با مساحت چهار مترمربع تخمین زده شد. سپس برای هر نمونه، درصد پوشش کل با تجمع مقادیر جداگانه پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای محاسبه گردید. این تجمع بر اساس جمع ساده درصدها صورت گرفت/یا میانگین‌گیری وزنی (در صورت وجود). بدین ترتیب، داده‌های پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای به منظور تحلیل‌های بعدی در قالب پوشش کل گیاهی در نظر گرفته شدند. درصد پوشش گونه‌های درختی از طریق اندازه‌گیری دو قطر تاج عمود بر هم و محاسبه سطح تاج برای تک‌تک درختان و در سطح قطعات نمونه ۹۰۰ مترمربعی طبق رابطه (۳) انجام شد:

لاشبرگ‌ها (ریزچوب‌ها، شاخه‌های کوچک و برگ‌های افتاده) در پایان فصل رشد و اواخر مهرماه در همان میکروقطعات نمونه جمع‌آوری گردید (Palosuo *et al.*, 2005). وزن خشک پوشش گیاهی علفی از طریق برداشت کامل بخش علفی در سطح قطعات نمونه کوچک صورت گرفت. برای اندازه‌گیری زیتوده درختچه‌ها از روابط الومتریکی استفاده شد (Andrew *et al.*, 1979). در این روش، زیتوده بر اساس پارامترهای قابل اندازه‌گیری مانند قطر شاخه‌ها و ارتفاع برآورد می‌شود. این روابط به صورت مدل‌های ریاضی تعریف شده‌اند که به کمک آن‌ها وزن خشک درختچه برآورد می‌شود. در بخش درختی با توجه به اینکه تنها درختان بلوط و بنه در پلات‌های مورد بررسی وجود داشتند، از معادلات الومتریکی مربوط به این دو گونه استفاده شد. درختان بلوط ایرانی به فرم دانه‌زاد (حدود ۹۵ درصد) و تعداد کمی درختان بنه (حدود ۵ درصد) بودند. برای به‌دست آوردن زیتوده درختان بلوط ایرانی و بنه به ترتیب از روابط رگرسیونی آلومتریکی (۱) و (۲) استفاده شد (Sohrabi & Shirvani, 2012; Tahmasebi *et al.*, 2017):

$$Cover\% = \left(\frac{d_1-d_2}{2}\right)^2 \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

d_1 و d_2 : دو قطر عمود بر هم تاج درخت و Cover: پوشش می‌باشد. برای تعیین درصد رطوبت اجزاء مختلف پوشش گیاهی و لاشبرگ، ابتدا نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و سپس با ترازو (دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شد. اجزای علفی، درختچه‌ای، شاخه و برگ در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت (Tahmasebi et al., 2017) و دیسک‌های چوبی گرفته شده از تنه درختان (سه دیسک از ۱۲ پایه درختی) در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شد تا کاملاً خشک شود و به وزن پایدار برسد، سپس وزن خشک کل برای تمام اجزای موردنظر به‌دست آمد (Sohrabi & Shirvani, 2012). برای اندازه‌گیری درصد کربن آلی نمونه‌ها نیز از روش احتراق در کوره الکتریکی استفاده شد. نمونه‌های خشک شده پس از توزین، به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از خاکستر شدن کامل، دوباره توزین شدند. با تعیین وزن خاکستر و با در دست داشتن وزن اولیه و نسبت کربن آلی به مواد آلی (۵۴ درصد)، مقدار کربن آلی در اندام‌های مختلف درختان محاسبه و در نهایت ضریب تبدیل وزن خشک به کربن آلی این اندام‌ها محاسبه شدند (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). برای تعیین وزن مخصوص چوب، ابتدا با داشتن قطر یقه و قطر تنه در محل شروع تاج و با استفاده از فرمول Huber (۱۹۲۸) حجم تر تنه محاسبه شد. سپس از یک نمونه از چوب تنه (یک قطعه نمونه ۲ سانتی‌مترمکعبی از محل برش بدنه درخت) چگالی چوب اندازه‌گیری شد. از نسبت چگالی چوب به چگالی آب (۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب) وزن مخصوص چوب به‌دست آمد. وزن خشک نمونه چوب از طریق قرار دادن در کوره با دمای ۱۰۱ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا زمانی که به وزن پایدار برسد، به‌دست آمد (Williamson & Wiemann, 2010).

نمونه‌برداری خاک در میکروقطعات نمونه چهار مترمربعی با استفاده از آگر با قطر ۱۰ سانتی‌متر انجام شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و عمق کم خاک، عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Tahmasebi et al., 2017). نمونه‌های خاک آورده شده به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد، جرم مخصوص ظاهری از طریق وزن خشک خاک در یک سیلندر فلزی به قطر ۴/۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برحسب گرم بر سانتی‌مترمکعب و خشک کردن آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آزمایشگاه اندازه‌گیری و محاسبه شد. کل کربن آلی برحسب گرم بر کیلوگرم به روش والکی بلاک به‌دست آمد. ذخیره کربن بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد،

$$SOC_s = SOC_c \times BD \times D/10 \quad (4)$$

در این معادله SOC_s مقدار ذخیره کربن آلی بر حسب تن بر هکتار، SOC_c میزان کربن آلی بر حسب گرم بر کیلوگرم، BD میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب و D عمق نمونه‌برداری خاک بر حسب سانتی‌متر است (Deng et al., 2014). در نهایت مقدار کربن در چهار سطح به‌دست آمد:

$$TEC = AGBC + ALC + SOC_s \quad (5)$$

ویژگی‌های گیاهی

ویژگی‌های گیاهی مهم و کلیدی که با ذخیره کربن مرتبط هستند و برای کمی‌سازی شاخص‌های تنوع عملکردی در اکثر منابع استفاده شده‌اند انتخاب و مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Asanok et al., 2021; Díaz et al., 2007). این ویژگی‌های گیاهی شامل میزان نیتروژن برگ (LNC) و فسفر برگ (LPC) (میلی‌گرم بر گرم)، شاخص سطح ویژه برگ (SLA) (میلی‌متر مربع بر میلی‌گرم)، ارتفاع گیاه (H) (سانتی‌متر)، وزن مخصوص چوب (WSG) و محتوای ماده خشک برگ (LDMC) (میلی‌گرم) می‌باشد. ویژگی‌های گیاهی با روش Cornelissen و همکاران (۲۰۰۳) و Pérez-Harguindeguy و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گیری

میزان فسفر برگ (LPC)، ارتفاع گیاه (H)، وزن خشک برگ (LDMC) و وزن مخصوص چوب (WSG) برآورد شدند. این ویژگی‌ها برای ۷۶ گونه گیاهی، از پایه‌های زنده موجود در هر پلات، با سه تکرار (ده پایه به‌ازای هر گونه در هر منطقه) و مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد Cornelissen و همکاران (۲۰۰۳) و همچنین Pérez-Harguindeguy و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گیری شدند.

پیش از محاسبه ماتریس فاصله عملکردی، کلیه ویژگی‌های عددی استاندارد شدند (میانگین صفر و انحراف معیار یک) تا اثر مقیاس متغیرها خنثی شود. مقادیر گم‌شده نیز در صورت وجود، با میانگین هر ویژگی جایگزین شدند. برای محاسبه فاصله بین گونه‌ها، از فاصله اقلیدسی^۱ استفاده شد، زیرا تمامی ویژگی‌های عملکردی مورد استفاده کمی و پیوسته بودند. شاخص واگرایی عملکردی (FDis) بر اساس ماتریس چندویژگی و به‌صورت ترکیبی محاسبه شد، نه برای هر ویژگی به‌صورت جداگانه. این روش به این دلیل انتخاب شد که استفاده از چند ویژگی عملکردی به‌صورت هم‌زمان، نمای دقیق‌تری از ساختار عملکردی اجتماعات گیاهی ارائه می‌دهد (Laliberté & Legendre, 2010).

علاوه بر شاخص‌های فوق، شاخص پراکندگی عملکردی (FDis) که نشان‌گر پراکنش گونه‌ها بر اساس فاصله در یک فضای چندبعدی است و ابعاد بیانگر ویژگی‌های مختلف گیاهی هستند، نیز محاسبه گردید (جدول ۱). این شاخص‌ها که از معروف‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های تنوع عملکردی بوده و در اکثر منابع استفاده شده است در ۱۶ قطعه نمونه محاسبه شدند (Asanok et al., 2021; Srouf et al., 2024).

شدند. اندازه‌گیری ویژگی‌های عملکردی برای ۷۶ گونه گیاهی انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها در پلات‌های مشخص‌شده در منطقه مورد مطالعه و بر اساس روش‌های استاندارد مرجع صورت گرفته‌اند. در هر گونه، حداقل یک پایه بالغ با ویژگی نماینده انتخاب شد. در صورت امکان، تکرارهای بیشتری نیز برای گونه‌های غالب انجام گرفت.

اندازه‌گیری شاخص‌های تنوع عملکردی

برای بررسی وابستگی بین مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن از روش Díaz و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد که در این روش، غالبیت و واگرایی ویژگی‌های کمی گیاهی مورد تأکید قرار دارد. غالبیت ویژگی عددی گیاهی از طریق شاخص میانگین وزنی جامعه (CMW) محاسبه شد (جدول ۱). واگرایی ویژگی کمی گیاهی با استفاده از شاخص واگرایی عملکردی (FDvar) بیان می‌شود (جدول ۱).

شاخص واگرایی عملکردی به دلیل تفسیر ساده‌تر (محدوده عددی شاخص بین ۰ تا ۱ می‌باشد) و بیان نابرابری عملکرد مختلف گیاهان انتخاب شد که در مجموع عملکرد بهتری را نسبت به دیگر شاخص‌ها نشان می‌دهد (Conti & Díaz, 2013). این شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار FDiversity نسخه ۲۰۱۱ محاسبه شدند. برای محاسبه شاخص‌های تنوع عملکردی، از بسته آماری FDiversity در محیط نرم‌افزار R استفاده شد (Laliberté & Legendre, 2010). سه شاخص رایج شامل غنای عملکردی (FRic)، یکنواختی عملکردی (FEve) و واگرایی عملکردی (FDis) محاسبه شدند. این شاخص‌ها بر اساس شش ویژگی عملکردی کلیدی شامل شاخص سطح ویژه برگ (SLA)، میزان نیتروژن برگ (LNC)،

1- Euclidean distance

جدول ۱- شاخص‌های تنوع عملکردی مورد استفاده

Table 1- Used functional diversity indices

شاخص	رابطه	توضیحات	منبع
شاخص میانگین وزنی جامعه (CWM)	$CWM_X = \sum_{i=1}^s p_i \cdot x_i$	مبتنی بر یک ویژگی Based on single trait	Yang et al., (2019)
شاخص واگرایی عملکردی (FDvar)	$FD_{Var} = 2/\pi \cdot \text{Arctan}(5V)$ $V = p_i \cdot (\ln x_i - (\sum_{i=1}^s p_i \cdot \ln x_i))^2$	مبتنی بر یک ویژگی Based on single trait	Mason et al., (2005)
شاخص پراکندگی عملکردی (FDIs)	$FDIs = \sum_{i=1}^s W_i Z_i$	مبتنی بر چند ویژگی Based on multiple traits	(Zuo et al., 2016)

p_i : پوشش نسبی گونه i ام، x_i : مقدار ویژگی X برای گونه i ام، W_i : درصد پوشش گونه i و Z_i : فاصله گونه i از مرکز هر بردار ویژگی

روش‌های آماری بکار گرفته شده

در این مطالعه شاخص‌های تنوع عملکردی (به عنوان متغیرهای مستقل) به تفکیک قطعات نمونه محاسبه شدند و سپس ارتباط آن‌ها با میزان کربن به دست آمده در کل اکوسیستم، کربن زیتوده روی زمینی، کربن لاشبرگ و ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s) (به عنوان متغیرهای وابسته)، از طریق روش رگرسیون خطی چندگانه انجام گردید. نوع ارتباط خطی یا غیرخطی از طریق مشاهده اولیه پراکنش داده‌ها از طریق نمودار ابر نقاط مشخص شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro Wilk بررسی شد. سپس با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) مهمترین متغیرهای مستقل جهت ورود به تحلیل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. پیش از انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی، همه متغیرهای مستقل استاندارد شدند (میانگین صفر و انحراف معیار یک) تا اثر تفاوت مقیاس بین متغیرها حذف گردد. همچنین، نرمال بودن توزیع داده‌ها و عدم وجود داده پرت بررسی شد. تحلیل PCA با استفاده از نرم‌افزار R و بسته آماری FactoMineR انجام گرفت. بر اساس نتایج این تحلیل، متغیرهایی که دارای بار عاملی بالا در مؤلفه‌های اول بودند و بیشترین واریانس را تبیین می‌کردند، به عنوان مهم‌ترین متغیرهای

مستقل جهت ورود به مدل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. معنی‌داری مؤلفه‌های PCA از طریق آماره عسای شکسته تعیین شد. هم‌خطی متغیرهای مستقل از طریق مقدار تورم واریانس^۲ (VIF) مورد بررسی قرار گرفت و متغیرهای دارای VIF کمتر از ۳ (Srouf et al., 2024) انتخاب شدند. تحلیل باقی‌مانده‌ها شامل ثبات واریانس بین خطاهای رگرسیون و متغیر وابسته، توزیع نرمال خطاهای رگرسیون و پراکنش تصادفی خطاهای رگرسیون و معیار Durbin-Watson جهت بررسی عدم خودهمبستگی بین خطاهای رگرسیون یا اصطلاحاً استقلال خطاهای رگرسیون مورد تحلیل اولیه قرار گرفتند. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۹ و نرم‌افزار R نسخه ۴,۱,۱ انجام گردید.

نتایج

ویژگی‌های توصیفی و فرم رویشی گونه درختی غالب منطقه (بلوط ایرانی)

گونه بلوط ایرانی با فرم رویشی دانه‌زاد ۹۵ درصد پوشش درختی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. اطلاعات کلی توصیفی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- آمار توصیفی گونه غالب منطقه (بلوط ایرانی)

Table 2- Descriptive statistics of dominant species in study area (*Quercus brantii*)

ارتفاع (m)		قطر برابر سینه (cm)		گونه
اشتباه معیار (m)	میانگین (m)	اشتباه معیار (cm)	میانگین (cm)	
0.8	6.5	3.7	22.6	بلوط ایرانی (<i>Quercus brantii</i>)
0.9	4.7	2.4	16.5	بنه (<i>Pistacia atlantica</i>)

لاشبرگ و ذخیره کربن آلی خاک در جدول ۳ آمده است. میانگین کربن آلی خاک ۱/۶۸ درصد و وزن مخصوص خاک ۱/۴۸ گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد.

وضعیت کربن ذخیره در بخش‌های مختلف

نتایج گرفته شده از آمار توصیفی برای متغیرهای کربن آلی کل اکوسیستم، کربن زیتوده روی زمینی، کربن

جدول ۳- آمار توصیفی برای متغیرهای کربن آلی کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (LLC) و ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)

Table 3- Descriptive statistics for total ecosystem organic carbon (TEC), terrestrial organic carbon (AGBC), litter carbon (LLC) and soil organic carbon (SOC_c) variables

مؤلفه‌های کربن	حداقل (تن در هکتار)	حداکثر (تن در هکتار)	میانگین (تن در هکتار)	خطای معیار (تن در هکتار)
کربن آلی کل اکوسیستم (TEC)	71.7	111.9	88.4	15.1
کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)	9.6	15.9	11.0	5.8
کربن لاشبرگ (ALC)	0.8	6.8	3.0	2.1
ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)	61.3	89.2	74.4	7.2

ارتفاع گیاه (H) (سانتی‌متر) و وزن مخصوص چوب (WSG) مشاهده شد.

جدول ۴- مقادیر همبستگی بین مقدار بار مؤلفه‌های اول و دوم PCA و ویژگی‌های گیاهی

Table 4- Correlation between the first and second principal components of PCA and traits

ویژگی گیاهی	محور اول (مقدار ویژه: 6.4)	محور دوم (مقدار ویژه: 5.0)
FDis H	0.756*	0.519
CWM H	-0.839*	-0.314
FDis LNC	0.810*	0.440
CWM LNC	0.817*	-0.033
FDis	0.818*	-0.467
CWM SLA	-0.334	0.913**
CWM WSG	0.140	-0.889**
FDvar SLA	-0.628	0.736*

مقادیر معنی‌دار در سطح خطای ۵٪ با علامت * و مقادیر در سطح

خطای ۱٪ با علامت ** نشان داده شده است

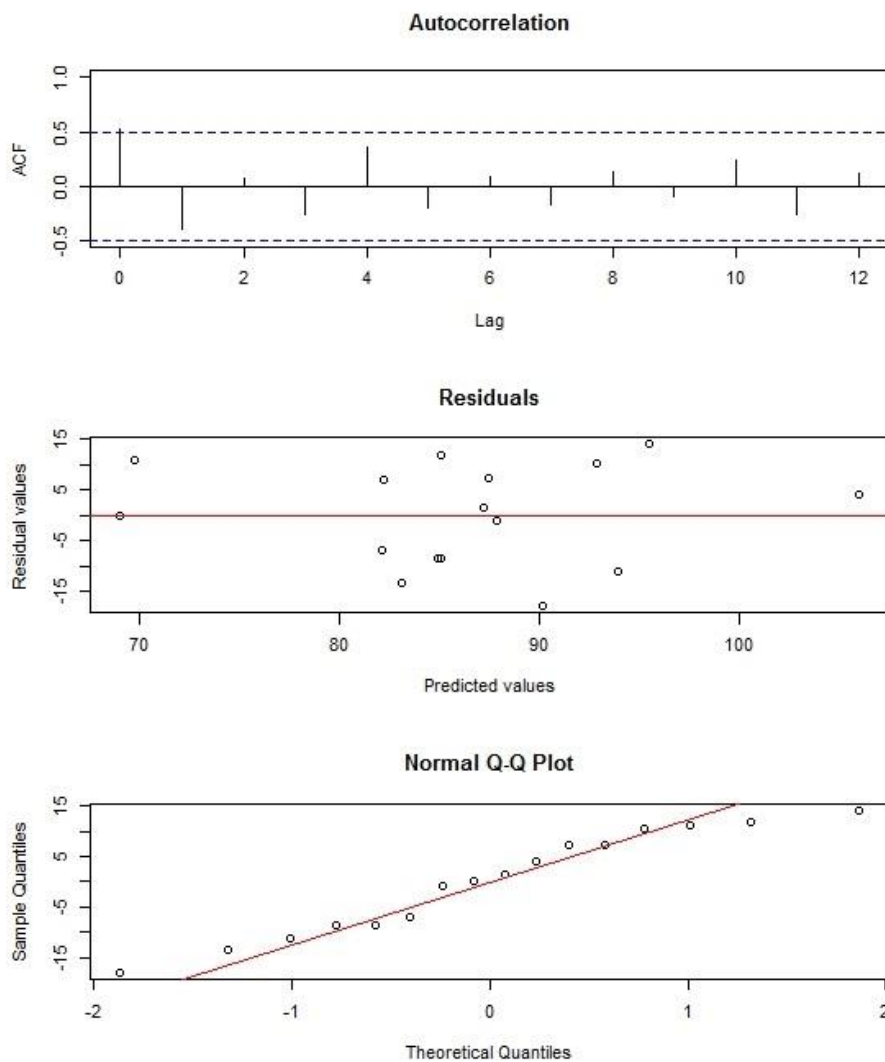
بر اساس جدول ۳ بیشترین و کمترین تغییرپذیری به ترتیب مربوط به متغیر کربن آلی کل و کربن لاشبرگ اکوسیستم بود.

ارتباط بین شاخص‌های تنوع عملکرد و کربن ذخیره

در ابتدا مهمترین ویژگی‌های گیاهی از طریق تحلیل PCA مورد بررسی گرفت. نتایج PCA نشان داد که مؤلفه‌های اول و دوم دارای بیشترین واریانس بوده (۴۱/۹ و ۳۴/۳ درصد) و با توجه به آماره عسای شکسته محاسبه شده تنها این دو مؤلفه معنی‌دار هستند ($P < 0.05$). در جدول ۴ همبستگی در سطوح خطای ۱ و ۵ درصد بین میزان نیتروژن برگ (LNC)، شاخص سطح ویژه برگ (SLA) (میلی‌متر مربع بر میلی‌گرم)،

چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. خطی بودن رابطه بین ویژگی‌های گیاهی و متغیرهای کربن از طریق رسم نمودار باقی‌مانده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده تأیید شد. نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، ثبات واریانس و استقلال باقی‌مانده‌ها مورد بررسی و تأیید قرار گرفت (شکل ۲).

ویژگی‌های گیاهی و مقدار بار مولفه‌های اول و دوم PCA ارائه شده است. به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های گیاهی مهم و میزان کربن به‌دست آمده در کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (ALC) و ذخیره کربن آلی خاک (SOCs) پیش‌فرض‌های تحلیل رگرسیون خطی



شکل ۲- نمودار تحلیل باقی‌مانده برای مدل کربن به‌دست آمده در کل اکوسیستم (TEC)

Figure 2 - Residual analysis plots for Total Ecosystem Carbon Model (TEC)

رگرسیون خطی چندگانه بر پایه روش گام به گام انجام گرفت (جدول ۵). کربن ذخیره شده در بخش زیتوده روی زمینی (AGBC) به بهترین وجه توسط ویژگی گیاهی میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ (CWM) (LNC) پیش‌بینی گردید. کربن ذخیره شده در لاشبرگ

تحلیل هم‌خطی برای ویژگی‌های با اهمیت گیاهی تشخیص داده شده در تحلیل PCA انجام شد. متغیرهای مستقل وارد شده به مدل بعد از تحلیل هم‌خطی در جدول ۴ نشان داده شده است.

منفی پیش‌بینی شد. در نهایت کربن آلی کل اکوسیستم توسط شاخص واگرایی مربوط به ویژگی گیاهی شاخص سطح ویژه برگ (FDvar SLA) با وابستگی منفی پیش‌بینی شد (شکل‌های ۳ و ۴).

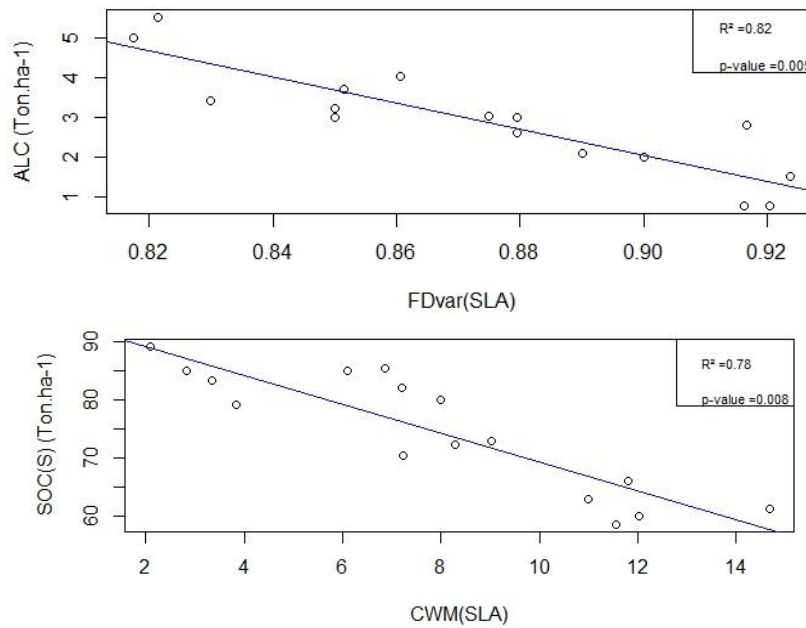
روی زمینی (ALC) از طریق شاخص واگرایی مربوط به ویژگی گیاهی سطح ویژه برگ (FDvar SLA) با وابستگی منفی پیش‌بینی شد. ذخیره کربن آلی خاک نیز از طریق شاخص میانگین وزنی مربوط به ویژگی گیاهی سطح ویژه برگ (CWM SLA) با وابستگی

جدول ۵- نتایج رگرسیون خطی چندگانه برای ارتباط بین ذخیره کربن کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (ALC)، ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s) و شاخص‌های مختلف تنوع عملکرد در اکوسیستم جنگلی دهدز

Table 5- Multiple linear regression results for the relationship between total ecosystem carbon storage (TEC), above-ground carbon (AGBC), above-ground litter carbon (ALC), soil organic carbon (SOC_s)

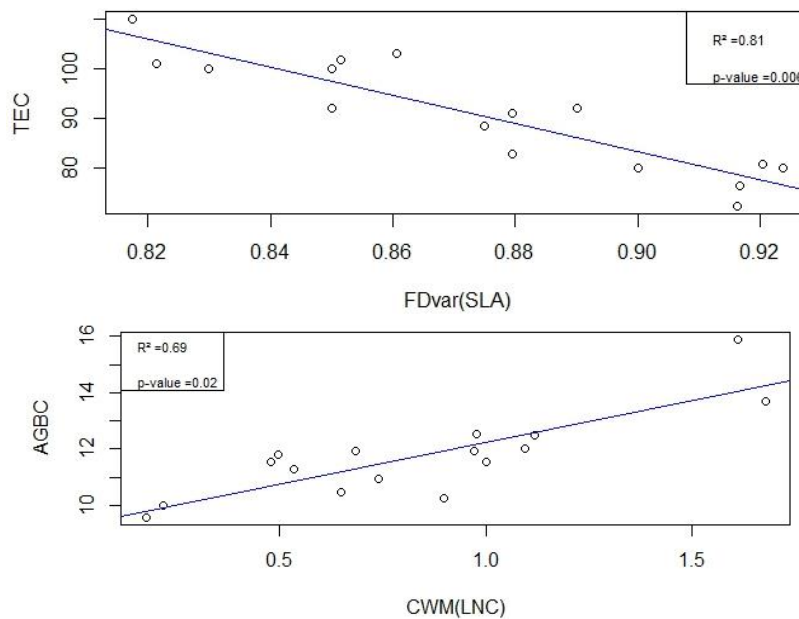
and various functional diversity indices in Dehdz forest ecosystem

متغیرهای پاسخ	متغیرهای آماره	مدل نهایی	متغیرهای پیش‌بینی کننده و نوع وابستگی	ضریب تعیین مقدار P
متغیر پاسخ	وارد شده به مدل	دوربین واتسون	پیش‌بینی کننده و نوع وابستگی	
کربن آلی اکوسیستم (TEC)	CWM (LNC) FDvar (SLA) CWM (H)	2.3	مدل $TEC = 341.7 - 288.1FD \text{ var}(SLA)$	0.006
کربن بیوماس روی زمینی (AGBC)	CWM (LNC) FDvar (SLA) FDis	2.2	مدل $AGBC = 8.7 + 3.8CWM (LNC)$	0.02
کربن لاشبرگ (ALC)	FDvar (SLA) CWM (H) FDis	1.9	مدل $ALC = 41.9 - 44.1FD \text{ var}(SLA)$	0.005
ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)	FDvar (SLA) CWM (SLA) CWM (H)	1.9	مدل $SOC_s = 92.2 - 2.3CWM (SLA)$	0.008



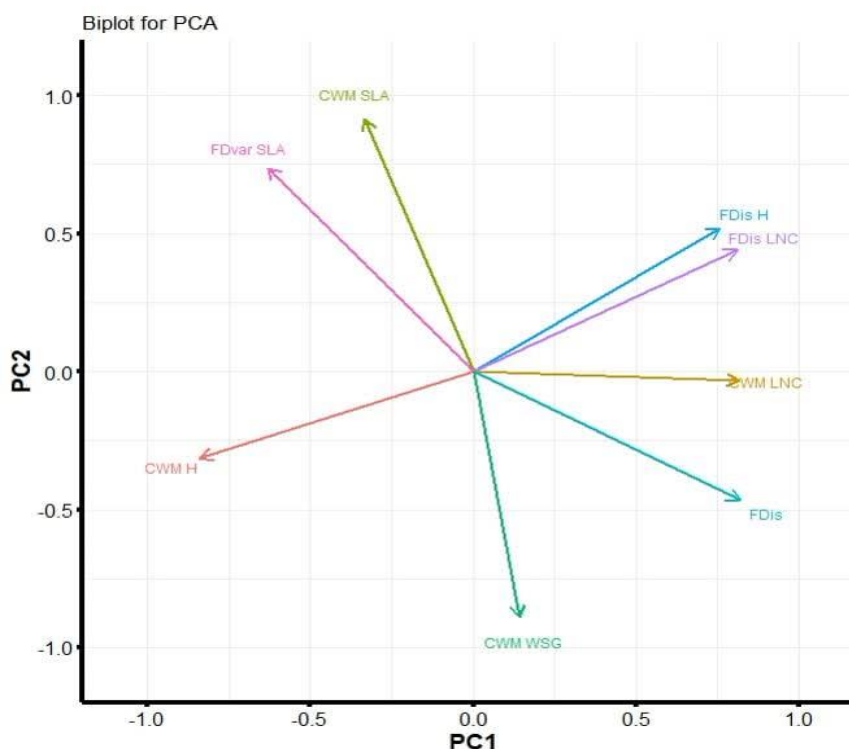
شکل ۴- تحلیل رگرسیون خطی ساده بین ذخیره کربن در لاشبرگ (ALC) و خاک (SOC_S) و شاخص‌های تنوع عملکردی. در اینجا فقط متغیرهایی که در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه وارد شده‌اند نشان داده شدند.

Figure 3- Simple linear regression analysis between aboveground litter carbon storage (ALC) and soil organic carbon stock (SOC_S) and functional diversity indices. Only the variables included in the multiple linear regression analysis were shown.



شکل ۳- تحلیل رگرسیون خطی ساده بین ذخیره کربن در کل اکوسیستم (TEC) و زیتوده روی زمینی (AGBC) و شاخص‌های تنوع عملکردی. تنها متغیرهایی که در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه وارد شده‌اند نشان داده شدند.

Figure 3- Simple linear regression analysis between total ecosystem carbon storage (TEC) and aboveground biomass carbon (AGBC) and functional diversity indices. Only the variables included in the multiple linear regression analysis were shown.



شکل ۵- نمودار دو پلاتی مربوط به همبستگی بین مقدار بار مولفه‌های اول و دوم PCA و ویژگی‌های گیاهی
Figure 5- Biplot for PCA correlation between the first and second principal components and plants traits

بحث

میانگین ذخیره کربن کل، خاک و لاشبرگ در مطالعه حاضر ۸۹/۵، ۷۴/۴ و ۳ تن در هکتار به دست آمد. میانگین ذخیره کربن کل، خاک و لاشبرگ در مناطق مختلف جنگلی یاسوج با گونه غالب بلوط ایرانی ۱۵۹/۳، ۱۳۵/۶ و ۵/۸ تن در هکتار برآورد شده است (Askari *et al.*, 2021) که بیشتر از مطالعه حاضر می‌باشد. این موضوع به دلیل تراکم زیادتر درختان بلوط ایرانی در یاسوج و همچنین در نظر گرفتن هر دو فرم دانه‌زاد و شاخه‌زاد در مناطق مختلف یاسوج می‌باشد که منطقی می‌باشد. در برخی مطالعات دیگر در جنگل‌های خشک هند (Srinivas & Sundarapandian, 2019)، در جنگل‌های خشک اتیوپی (Abere *et al.*, 2017) و در جنگل‌های خشک کنیا (Leley *et al.*, 2022) میزان ذخیره کربن برآوردی‌شان کمتر از منطقه حاضر به دست آمد که نشان‌گر تأثیر مهم و موثر اکوسیستم جنگلی مناطق

اقلیمی مختلف در میزان ذخیره کربن و پایداری درازمدت اکوسیستم می‌باشد.

امروزه علاوه بر محاسبه ذخیره کربن در یک اکوسیستم، تعیین تنوع عملکرد از شاخصه‌های بسیار مهم و ضروری در مطالعات ذخیره کربن در اکوسیستم‌های مختلف می‌باشد (Srour *et al.*, 2024; Mokany & Roxburgh, 2008). در مطالعه حاضر وجود ارتباط خطی معنی‌دار بین شاخص‌های مختلف تنوع عملکرد و میزان ذخیره کربن در بخش‌های مختلف جامعه گیاهی یافت شد. وجود ارتباط خطی بین جنبه‌های مختلف تنوع عملکرد و ذخیره کربن در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است (Srour *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2019; Rawat *et al.*, 2019; Conti & Díaz, 2013).

نتایج این مطالعه نشان داد که مهمترین متغیر برای پیش‌بینی ذخیره کربن کل اکوسیستم، لاشبرگ روی زمینی و خاک یک ویژگی گیاهی و آن هم مرتبط با برگ یعنی شاخص سطح ویژه برگ می‌باشد. البته شاخص واگرایی سطح ویژه برگ برای پیش‌بینی ذخیره

کربن کل اکوسیستم و کربن لاشبرگ با وابستگی منفی، مهم تشخیص داده شد. هر چقدر شاخص واگرایی سطح ویژه برگ کمتر باشد به معنی آن است که تفاوت زیادی بین سطح ویژه برگ گونه‌های گیاهی اکوسیستم وجود ندارد. بدین معنی که نسبت مساحت برگ به وزن خشک آن در بین گونه‌های گیاهی موجود در اکوسیستم مشابه است و اکوسیستم بطور مشابهی از منابع استفاده کرده و همین موضوع باعث تولید مقدار زیاد مواد آلی مشابه و قابل تجزیه در لاشبرگ و کل اکوسیستم شده و در نتیجه منجر به افزایش عملکرد کلی اکوسیستم در ذخیره کربن شده است. در جوامع گیاهی خشک چین مقدار کربن ذخیره شده در زیتوده (ALC) و کل اکوسیستم (TEC) با میزان شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ، وابستگی منفی نشان داد که با نتایج این مطالعه کاملاً همسو می‌باشد (Yu *et al.*, 2024). همچنین در پژوهشی در مناطق جنگلی دارای اقلیم مرطوب، مقدار کربن ذخیره شده در زیتوده (ALC) و کل اکوسیستم (TEC) با میزان شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ وابستگی مثبت نشان داد که با نتایج مطالعه حاضر انطباق ندارد و دلیل احتمالی آن اقلیم مرطوب و بارندگی کافی است که مقدار سطح ویژه برگ را زیاد کرده و باعث افزایش کربن در لاشبرگ و کل اکوسیستم در کوتاه‌مدت شده است (Rawat *et al.*, 2019). از دلایل احتمالی دیگر این تفاوت مربوط به تنوع گونه‌ای و تنوع ساختار جنگل است. مطالعات مشخص کرده است که تنوع گونه‌ای یک عامل بسیار مهم در مطالعات مربوط به تنوع عملکرد و ذخیره کربن می‌باشد (Zaman *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; Forogh Nasab *et al.*, 2021). همچنین وجود ساختار متنوع در جنگل نشان دهنده تنوع بیشتر گونه‌ای و ارتفاع متغیر درختان می‌باشد (Ouyang *et al.*, 2023) که چنین مسئله‌ای در جنگلهای بلوط زاگرس وجود ندارد. زیرا این جنگل‌ها عمدتاً خالص و یا تک‌اشکوبه هستند.

ذخیره کربن در کل اکوسیستم و لاشبرگ روی زمینی با شاخص واگرایی سطح ویژه برگ ارتباط منفی

معنی‌داری را نشان داد. این موضوع برخلاف انتظار ما بود. Mason و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که هرچه شاخص واگرایی بیشتر باشد اختلافات آشیان اکولوژیک بیشتر بوده و رقابت در چنین شرایطی کم شده و بیشترین استفاده از منابع غذایی اکوسیستم صورت می‌گیرد. دلیل اصلی وابستگی منفی شاخص واگرایی عملکردی به توزیع مقادیر عددی شاخص سطح ویژه برگ در قطعه نمونه‌های مورد بررسی مرتبط است که باعث واگرایی پایین در شاخص سطح ویژه برگ شده است. برخی مطالعات اثر منفی شاخص واگرایی روی ویژگی‌های مختلف یا ترکیبی از آنها را نشان داده است (Mokany *et al.*, 2008). برخی مطالعات نیز اثر مثبت شاخص واگرایی را نشان داده‌اند (Díaz *et al.*, 2007). این نتایج متضاد ممکن است ناشی از تحلیل‌های مختلف آماری باشد که بعضاً اهمیت استانداردسازی روش‌های آماری موردنیاز برای مطالعه عملکرد اکوسیستم در محیط‌های طبیعی و نیمه‌طبیعی مورد تأکید قرار گرفته است (Garnier & Navas, 2012). شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ بر میزان ذخیره کربن آلی خاک اثر منفی معنی‌داری ایجاد کرد. برخی از مطالعات اثر مثبت شاخص میانگین وزنی روی ویژگی‌های مختلف را نشان داده‌اند (Rawat *et al.*, 2013; Conti & Díaz, 2019; Zuo و همکاران ۲۰۱۶) ارتباط مثبتی بین شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ و میزان ذخیره کربن آلی خاک در علفزارهای ساحلی چین یافتند. یکی از دلایل تفاوت نتایج گرفته شده با مطالعه ما در نوع و ساختار پوشش گیاهی می‌باشد. در مناطق با پوشش علفی غالب، برگها مواد درون خود را سریع‌تر به خاک منتقل می‌کنند و باعث افزایش آبی کربن ذخیره در خاک می‌شوند درحالی که برگهای پوشش درختی غالب مناطق جنگلی به دلیل کم بودن فعالیت میکروبی دیرتر مواد را در خاک آزاد کرده و کربن ذخیره را به تدریج افزایش می‌دهند (Zuo *et al.*, 2016). نتایج مشابهی در مطالعه Rawat و همکاران (۲۰۱۹) به‌دست آمده است.

با دقت بهتری نسبت به شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی انجام دهند اما شاخص مبتنی بر چند ویژگی در هیچکدام از مدل‌های نهایی قرار نگرفت و شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی توانستند بهتر میزان تغییرات کربن ذخیره در بخش‌های مختلف اکوسیستم را توجیه کنند. هرچند که در برخی مطالعات به این موضوع اشاره شده است که برای توصیف ذخیره کربن هیچ محدودیتی در تعداد و ترکیب ویژگی‌های گیاهی وجود ندارد (Cornelissen *et al.*, 2003; Tahmasebi *et al.*, 2017). لذا پاسخ برخی سوالات هنوز به‌طور واضح روشن نیست.

نتیجه‌گیری کلی

ارتباط بین شاخص‌های تنوع عملکرد و شش ویژگی گیاهی در منطقه جنگلی بلوط‌بلند دهدز استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نقش شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی مثل میانگین وزنی و شاخص واگرایی عملکردی در برآورد ذخیره کربن مهم‌تر تشخیص داده شد. همچنین شاخص پراکندگی مبتنی بر چند ویژگی که پراکنش ویژگی‌های گیاهی را در چند بعد نشان می‌دهد معنی‌دار نشد. از طرفی مهمترین ویژگی‌های گیاهی موثر در برآورد کربن، شاخص ویژه سطح برگ و میزان نیتروژن برگ بودند. با آگاهی از چنین ویژگی‌هایی می‌توان نسبت به بهبود افزایش توان ترسیب و ذخیره کربن در اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس اقدام کرد. به عبارت دیگر کارهای مدیریتی در جنگل‌های زاگرس مثل غنی‌سازی و یا قرق با هدف افزایش سطح ویژه برگ و همچنین افزایش مقدار ازت برگ، می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل ترسیب کربن این جنگل‌ها نیز شود.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده است و بدین ترتیب از حامیان مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

یکی از شاخص‌های مهم و تاثیرگذار بر پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ می‌باشد (Rawat *et al.*, 2019; Sheng *et al.*, 2022). در مطالعه حاضر این شاخص بر میزان ذخیره کربن آلی خاک اثر منفی معنی‌داری ایجاد کرد. بالا بودن شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ باعث افزایش کمک به جذب کربن اتمسفری توسط برگ می‌شود. لذا هرچه تنوع گونه‌ای بیشتر باشد، جذب کربن نیز بیشتر صورت می‌گیرد؛ بنابراین تنوع گونه‌ای یکی از شاخص‌های مهم در افزایش کربن اتمسفر می‌باشد (Sheng *et al.*, 2022). اما وجود رابطه منفی معنی‌دار بین شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ و ذخیره کربن آلی خاک در این مطالعه را شاید بتوان به خالص بودن جنگل و نبود تنوع گونه‌ای زیاد در لایه درختی نسبت داد.

بدون شک یکی از عوامل مهم و موثر در میزان ذخیره کربن، نیتروژن می‌باشد (Moradi *et al.*, 2017; Moradi & Ghasemi, 2021). شاخص میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ برای پیش‌بینی کربن ذخیره شده در زیتوده روی زمینی اثر مثبت معنی‌داری را نشان داد. Mokany و همکاران (۲۰۰۸) نتایج مشابهی را گرفتند. Garnier و Navas (۲۰۰۴) ارتباط منفی وضعی بین شاخص میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ و کربن ذخیره شده در زیتوده روی زمینی به‌دست آوردند. در زیتوده روی زمینی، یک ویژگی گیاهی مبتنی بر برگ روی ذخیره کربن تأثیر مثبت داشته است. برخی مطالعات اثر معنی‌دار و منفی شاخص تثبیت نیتروژن را در بخش زیتوده نشان داده‌اند (Zuo *et al.*, 2016). این موضوع ناشی از غالب بودن برخی از گونه‌های گیاهی در منطقه جنگلی مورد مطالعه مثل انواعی از گونه‌های گراس یکساله و چندساله می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که هرچه تغییرات ویژگی‌های گیاهی جوامع بیشتر باشد میزان ذخیره کربن در بخش زیتوده روی زمینی آن بیشتر می‌شود. در مطالعه حاضر، انتظار بود تا شاخص‌های تنوع عملکرد مبتنی بر چند ویژگی پیش‌بینی ذخیره کربن را

References

- Abere, F., Belete, Y., Kefalew, A., & Soromessa, T. (2017). Carbon stock of Banja forest in Banja district, Amhara region, Ethiopia: An implication for climate change mitigation. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(6), 604–622. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1332646>
- Alinejadi, S., Basiri, R., Tahmasebi kohyani, P., Askari, Y., & Moradi, M. (2016). Estimation of biomass and carbon sequestration in various forms of *Quercus brantii* Lindl. stands in Balout Boland, Dehdez. *Iranian Journal of Forest*, 8(2), 129-139. (In Persian)
- Andrew, M., Noble, I., & Lange, R. (1979). A non-destructive method for estimating the weight of forage on shrubs. *The Rangeland Journal*, 1(3), 225. <https://doi.org/10.1071/RJ9790225>
- Asanok, L., Taweasuk, R., & Kamyao, T. (2021). Plant Functional Diversity Is Linked to Carbon Storage in Deciduous Dipterocarp Forest Edges in Northern Thailand. *Sustainability*, 13(20), 11416. <https://doi.org/10.3390/su132011416>
- Askari, Y., Iranmanesh, Y., & Pourhashemi, M. (2021). The economic value and comparison of carbon storage in different forest areas in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Iranian journal of forest*, 13(2), 169-182. <https://doi.org/10.22034/ijf.2021.276293.1767> (In Persian)
- Chen, X., Taylor, A. R., Reich, P. B., Hisano, M., Chen, H. Y. H., & Chang, S. X. (2023). Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. *Nature*, 618(7963), 94–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05941-9>
- Conti, G., & Díaz, S. (2013). Plant functional diversity and carbon storage – an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 101(1), 18–28. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12012>
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Steege, H. T., Morgan, H. D., Heijden, M. G. A. V. D., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Deng, L., Liu, G.B., & Shangguan, Z.P. (2014). Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global change biology*, 20, 3544–3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- Díaz, S., Lavorel, S., De Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T.M. (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 20684–20689. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- Forogh Nasab, M., Moradi, M., Moradi, Gh., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2021). Erratum to: Topsoil Carbon Stock and Soil Physicochemical Properties in Riparian Forests and Agricultural Lands of Southwestern Iran. *Eurasian Soil Science*, 54(3), 459–459. <https://doi.org/10.1134/S106422932130013>
- Freschet, G. T., Swart, E. M., & Cornelissen, J. H. C. (2015). Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and below-ground resources: Key roles of specific leaf area and root mass fraction. *New Phytologist*, 206(4), 1247–1260. <https://doi.org/10.1111/nph.13352>
- Garnier, E., & Navas, M.-L. (2011). A trait-based approach to comparative functional plant ecology: Concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 365–399. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
- Huber, F. (1928). *Forstliche Biometrie*. Jena: Gustav Fischer.
- Imani, F., Moradi, M., & Basiri, R. (2016). The Effect of *Prosopis juliflora* Afforestation on Soil Physicochemical Properties in Sand Dunes (Case study: Magran Shush. *Journal of Water and Soil Science*, 20(77), 173–184. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.173>
- Jafarian, Z., Ahmadi, F., & Kargar, M. (2018). Effects of grazing intensities on functional diversity and species diversity indices in the Bolban Abad rangeland, Kurdistan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 768–777.

- <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114888>
8
- Jagadesh, M., Dash, M., Singh, S. K., Kumari, A., Garg, V. K., & Jaiswal, A. (2024). Carbon Sequestration Potential of Forests and Forest Soils and Their Role in Climate Change Mitigation. In H. Singh (Ed.), *Forests and Climate Change* (pp. 315–326). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3905-9_16
- Junttila, V., Minunno, F., Peltoniemi, M., Forsius, M., Akujärvi, A., Ojanen, P., & Mäkelä, A. (2023). Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio*, 52(11), 1716–1733. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>
- Karami, M., Sheykholeslami, A., Heydari, M., Nimvari, M. E., Omidipour, R., & Prevosto, B. (2022). Taxonomic and structural diversity indices predict soil carbon storage better than functional diversity indices along a dieback intensity gradient in semi-arid oak forests. *Trees*, 36(2), 537–551. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02227-3>
- Karamian, M. & Hosseini, V. (2015). Effect of Position and Slope Aspect on Organic Carbon, Total Nitrogen and Available Phosphorus in Forest Soils (Case Study: The Forest of Ilam Province, Dalab). *Journal of Water and Soil Science*, 19 (71), 109–117. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.109>
- Keerthika, A., Parthiban, & K. T. (2022). Wood-specific gravity and carbon proportion of multifunctional agroforestry trees in foothills of Nilgiris, Western Ghats, India. *Agroforest Syst* 96, 811–815. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00742-x>
- Kvakić, M., Tzagkarakis, G., Pellerin, S., Ciais, P., Goll, D., Mollier, A., & Ringeval, B. (2020). Carbon and Phosphorus Allocation in Annual Plants: An Optimal Functioning Approach. *Frontiers in Plant Science*, 11, 149. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00149>
- Labiberté, E., & Legendre, P. (2010). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299–305. <https://doi.org/10.1890/08-2244.1>
- Leley, N. C., Langat, D. K., Kisiwa, A. K., Maina, G. M., & Muga, M. O. (2022). Total Carbon Stock and Potential Carbon Sequestration Economic Value of Mukogodo Forest-Landscape Ecosystem in Drylands of Northern Kenya. *Open Journal of Forestry*, 12(01), 19–40. <https://doi.org/10.4236/ojf.2022.121002>
- Mahdavi, A., Saidi, S., Iranmanesh, Y., & Naderi, M. (2020). Biomass and carbon stocks in three types of Persian oak (*Quercus brantii* var. *persica*) of Zagros forests in a semi-arid area, Iran. *J. Arid Land* 12, 766–774 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0027-4>
- Makariev, A. M., Nefiodov, A. V., Rammig, A., & Nobre, A. D. (2023). Re-appraisal of the global climatic role of natural forests for improved climate projections and policies. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1150191. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1150191>
- Mansoori, Z., Tahmasebi, P., Saeedfar, M., & Shirmardi, H.A. (2013). Answer diversity of plant communities to grazing during the tilt-shift function is to protect the steppe and semi-steppe zones. *Journal of plant ecosystem conservation*, 1(3), 91–104. (In Persian)
- Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x>
- Mirzaei, J., Moradi, M., & Seyedi, F. (2016). Carbon Sequestration in the Leaf, Litter and Soil of *Eucalyptus camaldulensis*, *Prosopis juliflora* and *Ziziphus spina-christi* Species. *Ecopersia*, 4(3), 1481–1491. <https://doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.3.1481>
- Mokany, K., Ash, J., & Roxburgh, S. (2008). Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem

- processes in a temperate native grassland. *Journal of Ecology*, 96(5), Article 5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01395.x>
- Moles, A. T., Warton, D. I., Warman, L., Swenson, N. G., Laffan, S. W., Zanne, A. E., Pitman, A., Hemmings, F. A., & Leishman, M. R. (2009). Global patterns in plant height. *Journal of Ecology*, 97(5), 923–932. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01526.x>
- Moradi, M., Imani, F., Naji, H. R., Behbahani, S. M., Ahmadi, M. T. (2017). Variation in soil carbon stock and nutrient content in sand dunes after afforestation by *Prosopis juliflora* in the Khuzestan province (Iran). *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(3), 585–589. <https://doi.org/10.3832/for2137-010>
- Moradi, M., & Ghasemi, A. (2021). Carbon Stock Estimation of *Avicennia Marina* (Forssk.) Forest Soil in Bushehr Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 183-193. <https://doi.org/10.30495/jest.2019.17972.2679>
- Moradi, M., & Moradi, G. (2024). Carbon Sequestration of Mediterranean Tree Species in the Zagros Forest of Iran. *ECOPERSIA*, 12(4), 351-361. <http://doi.org/10.22034/ECOPERSIA.12.4.351>
- Morecroft, M. D., Duffield, S., Harley, M., Pearce-Higgins, J. W., Stevens, N., Watts, O., & Whitaker, J. (2019). Measuring the success of climate change adaptation and mitigation in terrestrial ecosystems. *Science*, 366(6471), eaaw9256. <https://doi.org/10.1126/science.aaw925>
- Ouyang, S., Gou, M., Lei, P., Liu, Y., Chen, L., Deng, X., Zhao, Z., Zeng, Y., Hu, Y., Peng, C., & Xiang, W. (2023). Plant functional trait diversity and structural diversity co-underpin ecosystem multifunctionality in subtropical forests. *Forest Ecosystems*, 10, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100093>
- Pakeman, R. J., Eastwood, A., & Scobie, A. (2011). Leaf dry matter content as a predictor of grassland litter decomposition: A test of the 'mass ratio hypothesis.' *Plant and Soil*, 342(1–2), 49–57. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0664-z>
- Palosuo, T., Liski, J., Trofymow, J. A., & Titus, B. D. (2005). Litter decomposition affected by climate and litter quality—Testing the Yasso model with litterbag data from the Canadian intersite decomposition experiment. *Ecological Modelling*, 189(1–2), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.006>
- Pati, P. K., Kaushik, P., Khan, M. L., & Khare, P. K. (2023). Effect of habitat specific wood specific gravity on biomass and carbon stock of trees in tropical dry deciduous forest of central India. *Tropical Ecology*, 64(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00279-1>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: Back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9(6), 741–758. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x>
- Rawat, M., Arunachalam, K., Arunachalam, A., Alatalo, J., & Pandey, R. (2019). Associations of plant functional diversity with carbon accumulation in a temperate forest ecosystem in the Indian Himalayas. *Ecological Indicators*, 98, 861–868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.005>
- Sarvazad, A., Fallah, A., & Vadedi, A. A. (2023). Investigation the Effect of Dead Trees on the Trend of Changes in Soil Carbon Storage Across an Altitudinal Gradient of Western Quercus Forests (Case study: Qalajeh Forest). *Ecology of Iranian Forest*, 11(22), 142-150. <http://doi.org/10.61186/ifej.11.22.130>
- Sheng, Z., Du, J., Sun, B., Mao, J., Zhang, Y., Zhang, J., & Diao, Z. (2022). The Role of

- Plant Functional Diversity in Regulating Soil Organic Carbon Stocks under Different Grazing Intensities in Temperate Grassland, China. *Sustainability*, 14(8), 4376. <https://doi.org/10.3390/su14084376>
- Sohrabi, H., & Shirvani, A. (2012). Allometric equations for estimating standing biomass of Atlantic Pistache (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in Khojir National Park. *Iranian Journal of Forest*, 4(1), 55-64. (In Persian)
- Srinivas, K., & Sundarapandian, S. (2019). Biomass and carbon stocks of trees in tropical dry forest of East Godavari region, Andhra Pradesh, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(2), 114-122. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1522837>
- Strour, N., Thiffault, E., & Boucher, J.-F. (2024). Quantifying carbon stocks and functional diversity of roadside ecosystems – A case study in Quebec, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128163. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128163>
- Parhizkar, Z., Moradi M., Abarifazli, R. (2025). Effects of Recreational Activities on Carbon Stocks in the Arid Riparian Forest. *Eurasian Soil Science*, 58, 133. <https://doi.org/10.1134/S1064229325601441>
- Tahmasebi, P. (2015). The ecology of plant communities. Shahrekord University Press, 274p. (In Persian)
- Tahmasebi, P., Moradi, M., & Omidipour, R. (2017). Plant functional identity as the predictor of carbon storage in semi-arid ecosystems. *Plant Ecology & Diversity*, 10(2-3), Article 2-3. <https://doi.org/10.1080/17550874.2017.1355414>
- Wang, H., Ding, Y., Zhang, Y., Wang, J., Freedman, Z. B., Liu, P., Cong, W., Wang, J., Zang, R., & Liu, S. (2023). Evenness of soil organic carbon chemical components changes with tree species richness, composition and functional diversity across forests in China. *Global Change Biology*, 29(10), 2852-2864. <https://doi.org/10.1111/gcb.16653>
- Williamson, G. B., & Wiemann, M. C. (2010). Measuring wood specific gravity...Correctly. *American Journal of Botany*, 97(3), 519-524. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900243>
- Wright, I. J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackely D.D., et al. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821-827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Yang, Y., Dou, Y., Cheng, H., & An, S. (2019). Plant functional diversity drives carbon storage following vegetation restoration in Loess Plateau, China. *Journal of Environmental Management*, 246, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.054>
- Yu, G., Lv, Z., & Liu, B. (2024). Functional diversity and carbon storage of plant community elevation patterns and carbon accumulation mechanisms in desert shrubland of Yanqi Hola Mountain, China. *Ecological Indicators*, 158, 111379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111379>
- Zaman, Md. R., Rahman, Md. S., Ahmed, S., & Zuidema, P. A. (2023). What drives carbon stocks in a mangrove forest? The role of stand structure, species diversity and functional traits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 295, 108556. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108556>
- Zuo, X., Zhou, X., Lv, P., Zhao, X., Zhang, J., Wang, S., & Yue, X. (2016). Testing Associations of Plant Functional Diversity with Carbon and Nitrogen Storage along a Restoration Gradient of Sandy Grassland. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00189>

Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model

Mohammad Rahmati¹, Siamak Dokhani^{1*}, Reza Ghazavi¹, Alireza Daneshi², Hamid Nouri³

1. Department of Watershed Management Science and Engineering, Kashan University, Kashan, Iran

2. Department of Watershed Management Science and Engineering, Gorgan University, Gorgan, Iran

3. Department of Watershed Management Science and Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

*Corresponding author: siamakdokhani@gmail.com

(Received: 02 July 2025

Revised: 25 August 2025

Accepted: 10 September 2025)

Extended Abstract

Introduction: Ecosystem services, the direct and indirect benefits provided by natural systems, play an essential role in maintaining ecological balance, environmental sustainability, and effective natural resource management. Among these services, sediment retention is considered a crucial regulating function. It helps reduce soil loss, sustain agricultural productivity, protect water quality, extend the operational lifespan of reservoirs, and mitigate flood risks. However, land use change, driven by human activities such as urbanization, agricultural expansion, industrial development, and deforestation, has increasingly disrupted this service. In recent decades, factors like population growth, climate variability, and increasing demand for land and water have caused significant transformations in land cover, particularly in mountainous and erosion-prone watersheds. These changes have altered sediment production and transport processes, often resulting in increased erosion and downstream sedimentation. To assess and address these impacts, spatially explicit and process-based models have become essential tools. One such tool is the InVEST model, which allows for spatially distributed estimation of ecosystem services under different land use scenarios. This study aims to evaluate the effects of land use change on sediment retention in the Bazoft watershed, located in the upstream area of the Karun-4 Dam in southwestern Iran, using the sediment delivery ratio (SDR) module of the InVEST model. The results can offer useful insights into sediment dynamics and inform integrated watershed management and sustainable land use strategies.

Materials and Methods: The study was conducted in the Bazoft watershed, which is located in the upper part of the Northern Karun Basin and drains into the Karun-4 Dam. The area is mountainous, with steep slopes averaging around 45%, a cold and semi-humid climate, and annual precipitation of about 766 mm. The average annual discharge is approximately 57.8 m³/s. The natural land cover consists mainly of forests and rangelands, while cultivated and residential areas represent the dominant human-induced land uses. In this study, land use and land cover (LULC) maps were generated for the years 2001 and 2021 using Landsat satellite imagery (ETM+ and OLI sensors, respectively), classified using the Maximum Likelihood algorithm in ENVI and ArcGIS software. Future land use for the year 2041 was simulated using the Scenario Generator tool, incorporating land suitability analysis and expert knowledge. The InVEST SDR model was used to estimate soil loss, sediment export, and sediment retention capacity based on inputs including LULC maps, a 30-meter resolution DEM, rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover factor (C), and support practice factor (P). Additional ecological inputs such as NDVI and hydrological connectivity parameters were included.

Results and Discussion: The results of this study indicated that human land uses such as rainfed agriculture, irrigated agriculture, and residential areas have shown an increasing trend, while natural covers like dense forests and dense rangelands have declined. The greatest increases during the 2001–2021 period were observed in rainfed agriculture (25.9%) and residential areas (63.07%). These trends are projected to continue, with increases of 21.7% and 20.91% respectively for the 2021–2041 period. The most significant decreases were related to dense forests and dense rangelands, by –7.53% and –9.07%, respectively, in the 2001–2021 period. According to the results of the SDR (Sediment Delivery Ratio) model in the InVEST software, the potential soil loss, sediment export, and sediment deposition are expected to increase by 0.56%, 1.01%, and 0.16%, respectively, compared to the current conditions of the watershed due to land use changes. These findings suggest that the continued expansion of human land uses could lead to a long-term decline in the ecosystem's capacity to control erosion and sedimentation. The results are consistent with similar studies and highlight the importance of sustainable land use management.

Conclusion: This study demonstrates that land use changes significantly reduce the sediment retention service in the Bazoft watershed. Continued expansion of agriculture at the expense of natural vegetation exacerbates soil erosion and sediment delivery, undermining watershed sustainability. The findings reinforce the necessity of conserving forests and rangelands, and support the use of scenario-based tools like InVEST for guiding land use planning and environmental policy in fragile mountainous ecosystems.

Keywords: Ecosystem Services, InVEST Model, Scenario Modeling, Soil Erosion

Citation: Rahmati, M., Dokhani, S., Ghazavi, R., Daneshi, A., & Nouri, H. (2026). Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 147-163. doi= 10.22034/iwm.2025.2064577.1235

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 اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST

محمد رحمتی^۱، سیامک دخانی^{۱*}، رضا قضاوی^۱، علیرضا دانشی^۲ و حمید نوری^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گرگان، ایران

۳. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ایران

* نویسنده مسئول: siamakdokhani@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

چکیده مبسوط

مقدمه: خدمات بوم‌سازگان به عنوان منافع مستقیم و غیرمستقیم حاصل از طبیعت، نقش بسیار مهمی در پایداری محیط‌زیست و مدیریت منابع طبیعی ایفا می‌کنند. یکی از این خدمات حیاتی، نگهداشت رسوب است که در فرآیند کاهش فرسایش خاک، حفظ حاصلخیزی، افزایش عمر مفید سدها و کنترل سیلاب‌ها اهمیت بالایی دارد. تغییر کاربری اراضی، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر بوم‌سازگان‌ها، می‌تواند تأثیرات چشم‌گیری بر این خدمت بگذارد. در دهه‌های اخیر، به دلیل عواملی نظیر رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضا برای غذا و انرژی، گسترش شهرنشینی و توسعه کشاورزی و صنعت، تغییرات قابل توجهی در الگوی کاربری اراضی در بسیاری از مناطق رخ داده است. این تغییرات منجر به برهم خوردن تعادل عملکردهای بوم‌سازگان و تشدید فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز شده‌اند. در این راستا، استفاده از مدل‌های مکانی و فرآیندمحور مانند مدل InVEST، با توانایی شبیه‌سازی ساده، اما مؤثر خدمات بوم‌سازگان و طراحی سناریوهای مختلف مدیریتی، رویکردی کاربردی به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر خدمات بوم‌سازگان نگهداشت رسوب، برای نخستین بار در حوزه آبخیز بازفت، واقع در بالادست سد کارون ۴، و با بهره‌گیری از ماژول نسبت تحویل رسوب (SDR) مدل InVEST انجام شد.

مواد و روش‌ها: محدوده مورد مطالعه، حوزه آبخیز بازفت واقع در بخش بالادست حوزه کارون شمالی است که با ویژگی‌هایی نظیر اقلیم کوهستانی، شیب متوسط ۴۵ درصد و بارندگی سالانه حدود ۷۶۶ میلی‌متر شناخته می‌شود. برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی، تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال و نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS طبقه‌بندی شدند. برای پیش‌بینی تغییرات آبی در افق ۱۴۲۰، از ابزار Scenario Generator بهره‌گیری شد که بر پایه تحلیل تناسب اراضی و با مشارکت کارشناسان محلی، سناریوهای تغییر کاربری را مدل‌سازی می‌کند. در ادامه، مدل SDR برای برآورد نسبت تحویل رسوب پیاده‌سازی گردید. ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های کاربری اراضی، ارتفاع، فاکتورهای R، K، LS، C و P و همچنین پارامترهای مربوط به واسنجی مدل بودند. برای محاسبه فاکتورهای اکولوژیکی از روش‌هایی نظیر شاخص NDVI و ماتریس‌های AHP استفاده شد. نتایج مدل‌سازی شامل نقشه‌های هدررفت خاک، انتقال رسوب، توان نگهداشت خاک و تحلیل فضایی خدمات بوم‌سازگانی بود که به‌صورت مکانی در سطح پیکسل در کل حوزه تهیه شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که کاربری‌های انسانی مانند کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی روند افزایشی داشته‌اند، در حالی که پوشش‌های طبیعی نظیر جنگل‌های متراکم و مراتع متراکم کاهش یافته‌اند. بیشترین افزایش مربوط به کشاورزی دیم و مناطق مسکونی به مقدار ۲۵/۹ و ۶۳/۰۷ درصد در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ و در ادامه به مقدار ۲۱،۷ و ۲۰،۹۱ درصد برای دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ پیش‌بینی گردید. بیشترین کاهش مربوط به جنگل‌های متراکم و مراتع متراکم به ترتیب ۷/۵۳- و ۹/۰۷- درصد در سال ۱۳۸۰-۱۴۰۰ بوده است. نتایج مدل SDR نشان داد مقادیر پتانسیل هدررفت خاک، صادرات رسوب و رسوب ته‌نشین شده تحت اثر تغییر کاربری اراضی به ترتیب ۰،۵۶، ۱،۰۱ و ۰،۱۶ درصد نسبت به شرایط فعلی حوزه افزایش خواهد یافت. این نتایج حاکی از آن است که ادامه روند گسترش کاربری‌های انسانی می‌تواند در بلندمدت منجر به کاهش توان بوم‌سازگان در کنترل فرسایش و رسوب شود. یافته‌های مطالعه با نتایج پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد و اهمیت مدیریت پایدار کاربری اراضی را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش پوشش‌های گیاهی، به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع، عملکرد خدمات بوم‌سازگانی در تنظیم فرسایش و رسوب را تضعیف می‌کند. تحلیل مبتنی بر مدل SDR در چارچوب InVEST بیانگر آن است که تغییرات کاربری زمین نقشی تعیین‌کننده در افزایش یا کاهش کارایی تنظیمی بوم‌سازگان دارند؛ بنابراین، اتخاذ سیاست‌های مبتنی بر حفاظت از پوشش‌های طبیعی و بهره‌گیری از ابزارهای مدل‌سازی فضایی برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع طبیعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

واژه‌های کلیدی: خدمات بوم‌سازگانی، مدل InVEST، سناریوسازی و فرسایش خاک

استناد: رحمتی، م.، دخانی، س.، قضاوی، ر.، دانشی، ع. و نوری، ح. (۱۴۰۵). ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۱)، ۱۶۳-۱۴۷.

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 قابل دسترس است.

مقدمه

خدماتی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم از محیط طبیعی به ساکنان زیست‌بوم ارائه می‌گردد، خدمات بوم‌سازگان گفته می‌شود. به طور کلی این خدمات در چهار گروه تنظیمی، فراهم‌سازی، فرهنگی و حمایتی دسته‌بندی می‌شوند (Fu et al., 2017). برخی از این خدمات ملموس و برخی نیز ناملموس و غیرقابل اندازه‌گیری می‌باشند. لذا کمی‌سازی و تعیین خدمات ملموس و قابل اندازه‌گیری بوم‌سازگان از فاکتورهای مهم و کلیدی در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود. نگهداشت رسوب یکی از خدمات کلیدی بوم‌سازگان است که عوامل متعددی مانند تغییر کاربری اراضی بر آن اثر می‌گذارند. کاربری اراضی نحوه استفاده از زمین توسط انسان است که جهت تولید محصولات و سودآوری استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت، تامین امنیت غذایی و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، رشد و توسعه شهرنشینی اراضی در نقاط مختلف دستخوش تغییرات شده است (Lang et al., 2017) که باعث تغییر در مؤلفه‌ها و اجزای بوم‌سازگان در حوزه‌های آبخیز گردیده است. از این تغییرات می‌توان به تغییر در میزان فرسایش و رسوب حوزه اشاره کرد. با توجه به موارد گفته شده بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر خدمات بوم‌سازگان جهت مشخص شدن اثرات دخل و تصرف‌های انسان در بوم‌سازگان و نیز مدیریت صحیح منابع طبیعی حوزه‌های آبخیز جهت برقراری توسعه پایدار این منابع حائز اهمیت است. تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه خدمات بوم‌سازگان توسعه داده شده است، اما با توجه به پیچیدگی روابط بین اجزا بوم‌سازگان‌های طبیعی، استفاده از مدل‌های ساده در شبیه‌سازی فرایندهای طبیعی با داده‌های کم و قابل دسترس متداول‌تر است (Vigerstol & Aukema, 2011). مدل InVEST^۱

یکی از این مدل‌ها است که پرکاربردترین مدل در بحث ارزیابی خدمات بوم‌سازگان می‌باشد (Ochoa & Cardona, 2017) که به منظور فهم بیشتر ارزش اجزاء طبیعت و خدمات تولید شده در بوم‌سازگان، جهت ارزش‌گذاری و کمی‌سازی کالاها و خدمات بوم‌سازگان با میزان دقت بالایی طراحی شده است. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به تعداد بالای مدل‌ها برای برآورد و کمی‌سازی خدمات بوم‌سازگان، خروجی واضح مدل به صورت مکانی و فضایی، امکان ارزیابی کمی و کیفی با توجه به خروجی مدل، توانایی ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات بوم‌سازگان به صورت مستقیم، در دسترس قرار دادن آنلاین برخی داده‌ها، امکان طراحی سناریو و قابلیت استفاده از GIS در تهیه ورودی‌های مدل و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها اشاره کرد (Vogl et al., 2016) که به دلیل اهمیت موضوع در این زمینه تحقیقاتی انجام شده است.

Barzali و همکاران (۲۰۲۲) خدمات زیست‌بوم مرتعی حوزه آبخیز اترک را از لحاظ قابلیت نگهداشت رسوب با استفاده از نرم‌افزار InVEST مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد در بین کاربری‌های مورد مطالعه پوشش جنگلی با مقدار ۱۴۱۸ تن بر کیلومتر مربع و مراتع خوب با مقدار ۱۲۱۷ تن بر کیلومتر مربع بیشترین قابلیت را در نگهداشت رسوب دارا هستند. Zabihi و همکاران (۲۰۲۱) اولویت‌بندی زیرحوزه‌های حوزه آبخیز تالار از لحاظ هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب را با مدل InVEST مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که از جنوب به شمال، تغییرات نگهداشت بیشتر است. در تحقیقی دیگر، Asadolahi و Norozi (۲۰۲۰) کنترل فرسایش خاک تحت اثر تغییر اقلیم در حوزه آبخیز گرگانرود را با استفاده از مدل SWAT^۲ کمی‌سازی کردند. مقادیر آماره نش-ساتکلیف ۰/۷ و ۰/۶۴ به ترتیب در واسنجی جریان و رسوب ماهانه حاکی از عملکرد مناسب مدل در

بوم‌سازگان و افزایش خدمات عملکرد آب در ارتباط با توسعه فضای شهری بود. Bogdan و همکاران (۲۰۱۶) طی مطالعه خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب برای حوزه‌ای در رومانی با کاربرد مدل InVEST نشان دادند، بیشترین کاهش و افزایش در نگهداشت رسوب مربوط به سناریوهای توسعه و حفاظت بوده است. Kusi و همکاران (۲۰۲۳) اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی را با استفاده از مدل های InVEST و SWAT بر خدمت بوم‌سازگانی تولید آب را در مراکش مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که اثر تغییر اقلیم بر تولید آب بیشتر بوده است. Shalaby و Tateish (۲۰۱۷) در تحقیقی قابلیت تصاویر TM سنجنده لندست را به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ در منطقه‌ای در شمال غربی مصر را مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال، به ترتیب صحت کلی ۹۱ درصد و ۹۲/۳ برای کاربری اراضی به دست آوردند. Singh و Khandur (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های سنجنده از دور و GIS به آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی در پنجاب هند بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۶ پرداختند. ایشان از داده‌های سنجنده TM و ETM+ از ماهواره لندست و IRS استفاده نمودند. بعد از انجام طبقه‌بندی آشکارسازی تغییرات انجام گرفت. سپس مساحت کاربری‌های موردنظر را محاسبه کرده و با یکدیگر مقایسه کردند. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون مطالعه‌ای با موضوع خدمات بوم‌سازگان تحت اثر تغییر کاربری اراضی برای حوزه بازفت صورت نگرفته است. بنابراین مطالعه وضعیت خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب تحت اثر تغییر کاربری اراضی با توجه به اهمیت حوزه آبخیز بازفت از نظر موقعیت جغرافیایی و قرارگرفتن در بالادست سد کارون ۴ از لحاظ توزیع مکانی و تولید و نگهداشت رسوب برای اولین بار توسط مدل نسبت تحویل رسوب موجود در نرم‌افزار InVEST در دوره ۱۳۸۰-۱۴۲۰ در دستور کار این پژوهش قرار

شبهه‌سازی جریان و رسوب حوزه بوده است. همچنین نتایج بیانگر این است که خدمت بوم‌سازگان به شدت تحت تاثیر تغییر اقلیم بوده و با تغییرات بارش دچار تغییرات بیشتر می‌گردد. در تحقیقی دیگر، Mohammadyari (۲۰۲۳) در تحقیقی با عنوان ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمات بوم‌سازگان با مدل InVEST ارزیابی کمی ظرفیت ذخیره کربن و کیفیت زیستگاه آن را برای استان چهارمحال و بختیاری در دستور کار قرار دادند. نتایج این تحقیق موید آن بود که بیشترین مقدار ذخیره کربن در مناطق جنگلی با بالاترین کیفیت زیستگاه بوده و مکان‌هایی که انسان در آن دخل و تصرف داشته از کیفیت زیستگاه آن کاهش یافته است. Haghddadi و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی خدمات بوم‌سازگان تولید آب با استفاده از مدل InVEST برای حوزه آبخیز دلیچای پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار تولید رواناب مربوط به کاربری بایر با مقدار ۲۹۲۳/۹۹ مترمکعب در هکتار و کمترین مقدار مربوط به ذخیره‌گاه ارس با مقدار ۴۵۹/۰۴ مترمکعب در هکتار بوده است. Zarandian و همکاران (۲۰۲۳) به مقایسه عملکرد مدل‌های LCM و InVEST در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش حوزه کرج پرداختند. نتایج کاهش پوشش طبیعی و چمنزارها را به مقدار ۷ درصد نشان داد. همچنین مشخص شد کارایی مدل InVEST به دلیل لحاظ دیدگاه ذی‌نفعان و سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای بهتر بوده است. در تحقیقی دیگر، Bai و همکاران (۲۰۱۹) اثر تغییر اقلیم و کاربری اراضی را بر نگهداشت رسوب در منطقه کنتوک ایالات متحده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از اثر بیشتر تغییرات کاربری اراضی بر خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب می‌باشد. Wang و همکاران (۲۰۲۲) پویایی خدمات بوم‌سازگان را در مقیاس مکانی و زمانی در پاسخ به گسترش شهرنشینی و توسعه شهری با استفاده از مدل InVEST بررسی کردند. نتایج حاکی از کاهش تعادل

تهیه نقشه‌های کاربری اراضی

به‌منظور پایش تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی گذشته تا حال و پیش‌بینی روندهای آتی در بازه زمانی سال‌های ۱۴۲۰-۱۳۸۰، از تصاویر ماهواره‌ای لندست بهره گرفته شد. تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ مربوط به ماه می ۲۰۰۱ و تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به ماه می ۲۰۲۱، به‌عنوان منابع داده مورد استفاده قرار گرفتند. پردازش تصاویر و استخراج نقشه‌های کاربری با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI 5.3 و ArcGIS 10.3 صورت گرفت (Sahle et al., 2019).

پیش از اعمال روش‌های طبقه‌بندی، تصاویر خام تحت تصحیحات هندسی و اتمسفری قرار گرفتند. تصحیح هندسی بر پایه مدل چندجمله‌ای ناپارامتری و با حذف نقاط نامناسب، با استفاده از ۵۰ نقطه کنترل زمینی انجام شد و خطای RMSE به ۰/۲۸ پیکسل کاهش یافت. نمونه‌گیری مجدد پیکسل‌ها به روش نزدیک‌ترین همسایه انجام شد (Al-Ahmadi & Hames, 2009). در راستای طبقه‌بندی تصاویر، از الگوریتم حداکثر احتمال به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده گردید. این الگوریتم با محاسبه احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های آموزشی تعریف شده، آن را به کلاسی با بیشترین احتمال اختصاص می‌دهد. در مواردی که این احتمال از آستانه تعیین‌شده کمتر باشد، پیکسل در گروه طبقه‌بندی‌نشده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر کاربری‌های کشاورزی دیم، جنگل متراکم، جنگل کم تراکم، کشاورزی آبی، مرتع متراکم، مرتع کم تراکم، مناطق مسکونی و سد انتخاب و سپس نمونه‌های آموزشی با بهره‌گیری از مشاهدات میدانی و ثبت نقاط با GPS، همچنین تحلیل تصاویر در Google Earth گردآوری شدند. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی، از شاخص‌های دقت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ استفاده شد.

دارد. بنابراین تحقیق حاضر در پی یافتن پاسخ برای سوالات ذیل است. طی دوره ۱۳۸۰-۱۴۲۰، تغییرات کاربری اراضی در حوزه بازفت در کدام دهه بیشتر بوده است؟ تغییرات کاربری اراضی منجر به چه مقدار تغییرات در عرضه خدمات بوم‌سازگانی مرتبط با رسوب شده است؟

مواد و روش‌ها

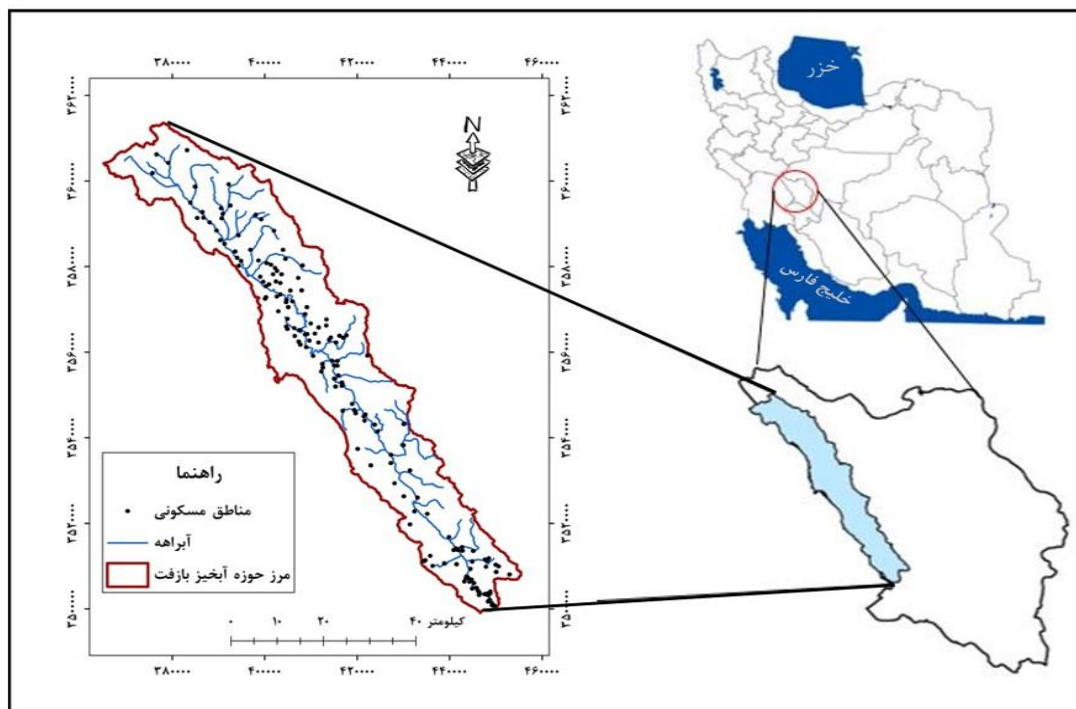
منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوزه آبخیز بازفت در بخش بالادست حوزه آبخیز کارون شمالی و سد کارون ۴ قرار دارد. این حوزه دارای متوسط دمای سالانه ۱۰/۴ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی سالانه ۷۶۶ میلی‌متر و دبی ۵۷/۸ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است. منطقه مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۳۳° ۵' تا ۴۹° ۳۰' ۲۹" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۳۷' تا ۳۲° ۳۹' ۱۶" شمالی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه به‌ترتیب برابر با ۸۴۴ متر در خروجی و ۴۱۳۵ متر در ارتفاعات زردکوه بختیاری است. منطقه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی و شیب متوسط حوزه حدود ۴۵ درصد می‌باشد. کاربری غالب حوزه مرتع بوده و کاربری‌های جنگل و اراضی کشاورزی نیز از کاربری‌های عمده این حوزه است. از نظر خاکشناسی، بافت‌های غالب حوزه شامل بافت سیلتی-لومی و رسی-لومی بوده و بافت‌های دیگر نظیر رسی، لومی و شنی-لومی نیز در این حوزه مشاهده می‌شود. بررسی زمین‌شناسی نشان می‌دهد که از مساحت ۲۱۷۵۸۲ هکتار کل حوزه، ۱۲/۵۰ درصد آن مربوط به دوران اول، ۲۶/۱۸ درصد مربوط به دوران دوم، ۵۸/۸۸ کیلومتر مربع مربوط به دوران سوم و ۲/۴۲ کیلومتر مربع به دوران چهارم زمین‌شناسی است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

قرار داشته باشند (Mather, 1999; Jensen, 2005; Deng et al., 2019; Zhang et al., 2019). مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا در پژوهش حاضر به ترتیب ۹۱ درصد و ۰/۸۹ به دست آمد که نشان دهنده دقت بالای طبقه‌بندی می‌باشد.

دقت کلی نشان‌دهنده نسبت پیکسل‌های به درستی طبقه‌بندی شده است، در حالی که ضریب کاپا میزان تطابق طبقه‌بندی با واقعیت را با در نظر گرفتن توافق تصادفی نشان می‌دهد. بیشترین اعتبار طبقه‌بندی زمانی حاصل می‌شود که هر دو شاخص در سطوح بالا



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

است تغییرات احتمالی آینده را به صورت نقشه‌های فضایی بازنمایی کند. برای اجرای مدل، داده‌های متنوعی مورد نیاز است که شامل موارد زیر می‌باشد: نقشه پایه کاربری اراضی (سال ۱۴۰۰)، لایه‌های محدودیت مکانی مانند مناطق حفاظت شده، مقادیر پیش‌بینی‌شده تغییرات در انواع کاربری، ماتریس احتمال انتقال کاربری‌ها، فاکتورهای مؤثر بر استعداد زمین برای تغییر، ماتریس اولویت تغییرات کاربری، نقشه ابطال تغییرات و وزندهی به فاکتورهای مؤثر در مدل. در این پژوهش، از نقشه کاربری اراضی سال

پیش‌بینی تغییرات کاربری

به منظور شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی در افق سال ۱۴۲۰، از ابزار Scenario Generator از مجموعه نرم‌افزاری InVEST استفاده شد. این ابزار بر پایه مدل‌سازی مبتنی بر قابلیت تناسب اراضی عمل می‌کند و فرض بر این است که تغییرات کاربری عمدتاً در مناطقی رخ می‌دهد که از نظر ویژگی‌های طبیعی و محیطی، استعداد بالاتری برای تغییر دارند. این مدل با بهره‌گیری از ترکیب روش‌های GIS^۱، MCA^۲ و استفاده از دانش بومی و تخصصی کارشناسان، قادر

تحقیق مدل SDR در نرم‌افزار InVEST جهت تخمین نسبت و میزان تحویل رسوب در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته می‌شود. این مدل به وسیله Borselli و همکاران (۲۰۰۸)، معرفی و بکار گرفته شده و طی سالیان گذشته بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (Sougnez *et al.*, 2011; Lopez-vicente *et al.*, 2013; Cavalli *et al.*, 2013). این مدل بر مبنای میزان قدرت تفکیک مکانی لایه مدل رقومی ارتفاع عمل می‌کند، به نحوی که ابتدا برای هر پیکسل میزان رسوب حاصل از فرسایش را محاسبه و سپس مقدار رسوبی که به خروجی حوزه می‌رسد را تحت عنوان SDR برآورد می‌کند.

به منظور آماده‌سازی ورودی‌های مدل SDR، مدل رقومی ارتفاعی از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد. عامل فرسایش‌دهی باران با استفاده از رابطه ۱ و با احتساب آمار و اطلاعات ۳۰ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی در داخل و اطراف منطقه مورد مطالعه محاسبه شد، همچنین میزان عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

این مدل، معادله جهانی فرسایش اصلاح شده (RUSLE)^۳ را جهت محاسبه خاک از دست رفته به صورت سالانه برای هر سلول بکار می‌گیرد (Sharp *et al.*, 2018; Sharp *et al.*, 2014) که از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$SDR(1-CP) SR = R \cdot K \cdot LS \quad (1)$$

که SDR بیانگر میزان هدررفت خاک با استفاده از کاربری اراضی موجود در مقایسه با خاک لخت است که به وسیله مدل SDR در نرم‌افزار InVEST محاسبه می‌شود (Sharp *et al.*, 2014).

۱۴۰۰ به‌عنوان مبنای مدل‌سازی استفاده شد. داده‌های مربوط به روند تغییرات کاربری اراضی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ مبنای برآورد تغییرات آینده قرار گرفت. فاکتورهای استعداد زمین برای هر نوع کاربری به‌صورت مقادیر عددی بین صفر تا یک تعریف شدند، به‌گونه‌ای که مقدار صفر بیانگر عدم تناسب برای تغییر و مقدار یک نمایانگر بیشترین پتانسیل برای تغییر به سایر کاربری‌هاست. ماتریس انتقال و اولویت تغییرات کاربری نیز با بهره‌گیری از نظر خبرگان و ذی‌نفعان تدوین گردید. در ماتریس انتقال، احتمال تغییر هر کاربری در مقیاس ۰ تا ۱۰ سنجیده شد؛ به‌طوری‌که عدد صفر به معنای عدم تغییر و عدد ۱۰ نشان‌دهنده بالاترین احتمال تغییر است. تهیه ماتریس اولویت با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۱ و مقایسه‌های زوجی انجام گرفت. برای گردآوری داده‌های لازم، پرسش‌نامه‌ای طراحی و میان ۳۰ نفر از کارشناسان سازمان‌های ذی‌ربط از جمله اداره‌های امور آب، حفاظت از محیط زیست، منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان‌های تابعه استان چهارمحال و بختیاری توزیع شد. در مجموع، ۲۳ پرسش‌نامه تکمیل و بازگردانده شد (نرخ بازگشت ۷۷ درصد) و داده‌های حاصل در مدل‌سازی آینده‌نگر مورد استفاده قرار گرفت.

مدل نسبت تحویل رسوب (SDR)^۲

ارزیابی و تخمین مقدار رسوب تولید شده در حوزه و برنامه‌ریزی برای حفاظت و مدیریت آن به وسیله اجزاء مختلف حوزه آبخیز می‌بایست یکی از مهمترین اولویت‌ها برای مدیران باشد. به همین دلیل در این

3- Revised Universal Soil Loss Equation

1- Analytical Hierarchy Process
2 - Sediment Delivery Ratio

داده‌های موردنیاز

با توجه نقشه تهیه شده فاکتور C محاسبه می‌گردد (Asadolahi *et al.*, 2015).

ج) فاکتور عملیات حفاظتی (P): نسبت مقدار خاک فرسایش یافته در شرایط حفاظتی به همین مقدار در شرایط استاندارد Renard و همکاران (۱۹۹۷) بنابراین، در تحقیق حاضر، مقدار فاکتور P با توجه به کاربری اراضی منطقه و بر اساس جدول پیشنهادی Deore (۲۰۰۵)، بین صفر تا ۱ تعیین شد.

۷- شاخص جریان تجمعی آستانه: میزان سلول‌های بالادست در حوزه که باید به یک سلول در پایین دست جریان یابد. این شاخص به منظور طبقه‌بندی جریان در نقشه ارتفاع بکار گرفته می‌شود.

۸- پارامترهای K_b و IC_0 : دو پارامتر برای واسنجی می‌باشند که ارتباط بین اتصال هیدرولوژیکی و نسبت تحویل رسوب را مشخص می‌کنند.

۹- SDR_{max} : حداکثر مقدار SDR می‌باشد که یک سلول می‌تواند به آن برسد که به بافت خاک ربط دارد و به آن بخش از ذرات شن و ماسه سطحی خاک گفته می‌شود در حدود اندازه ۱۰۰۰ میکرومتر گفته می‌شود (Vigiak *et al.*, 2012).

۱۰- نقشه زهکشی (اختیاری): به صورت یک نقشه رستری با مقادیر ۰ و ۱ است که ارزش ۱ برای سلول‌هایی مثل جاده‌ها، لوله‌های سطحی فاضلاب و غیره که به شکل مصنوعی به جریان وصل می‌شوند، لحاظ می‌گردد.

بعد از تهیه و آماده‌سازی اطلاعات و داده‌های موردنیاز و وارد کردن آن‌ها، مدل SDR در نرم‌افزار نقشه‌های ذیل نقشه هدررفت خاک در هر خاک به صورت سالانه در هر پیکسل، نقشه هدررفت خاک محاسبه شده توسط مدل USLE در هر پیکسل، میزان کل رسوب هر پیکسل که وارد جریان می‌گردد، نقشه توان نگهداشت خاک به عنوان یک خدمت بوم‌سازگانی برای

۱- کاربری اراضی با فرمت رستری

۲- نقشه رقومی ارتفاع (DEM)

۳- فاکتور R یا فرساینده‌گی باران که حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I_{30}) که طبق معادله (۲) محاسبه می‌گردد:

$$R = E \cdot I_{30} = (210 + \log I_{30}) * I_{30} \quad (2)$$

در این پژوهش، برای تهیه نقشه فرساینده‌گی باران، از مطالعه (Nikkami & Mahdian 2015) استفاده شده است.

۴- فاکتور (K) یا فرسایش‌پذیری خاک: پتانسیل تفکیک‌پذیری ذرات خاک یا حمل توسط رواناب. برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک، بعد از نمونه‌برداری نقاطی در داخل منطقه مورد مطالعه و تعیین بافت خاک در آزمایشگاه و برای برآورد عامل K از جدول ارائه شده توسط Roose (۱۹۹۶)، استفاده شد.

۵- نقشه حوزه آبخیز و زیرحوزه‌ها به صورت نقشه وکتوری

۶- اطلاعات بیوفیزیکی در قالب یک جدول اکسل با فرمت CSV. به شرح ذیل: الف) کد و اسامی تمام کاربری‌ها (ب) کاربری اراضی و پوشش گیاهی (C): این فاکتور اثر اقدامات مدیریتی کشاورزی و اثر پوشش گیاهی و درختی روی کاهش فرسایش خاک را نشان می‌دهد (Asadolahi *et al.*, 2015). برای مشخص کردن این فاکتور شاخص تفاضل پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) بکار گرفته می‌شود (Lin, 1997). فاکتور C طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$C = (1 - NDVI) / 2 \quad (3)$$

لذا در این پژوهش، ابتدا با محاسبه شاخص NDVI و تهیه نقشه آن در حوزه مورد مطالعه تهیه و در نهایت

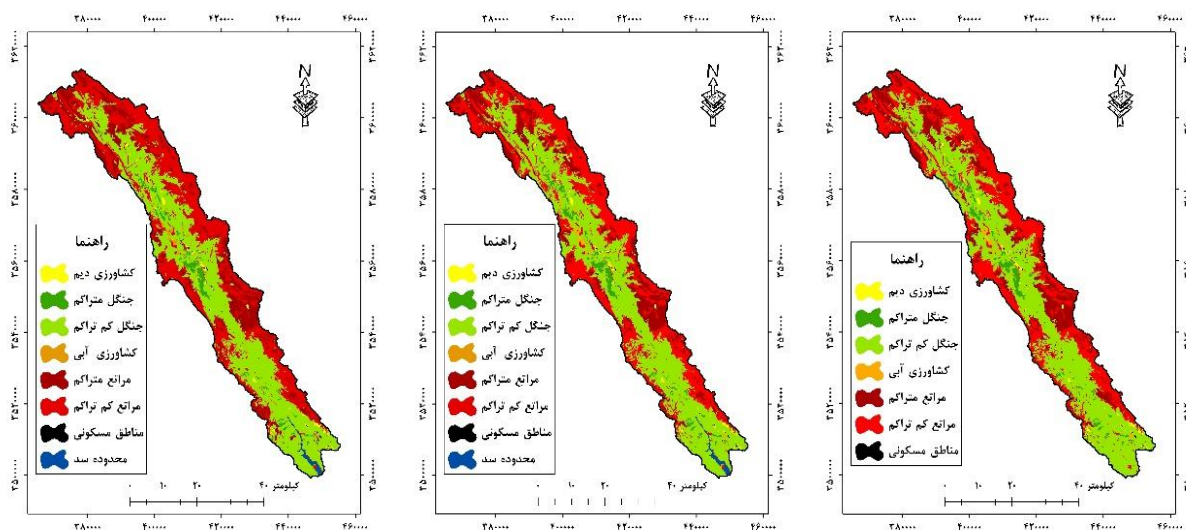
سطح داشته است که حاکی از توسعه مناطق مسکونی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی دیگر نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل در منطقه مورد مطالعه بیانگر کاهش پوشش جنگلی حوزه بازفت در طول سال های ۱۴۲۰-۱۴۰۰ به میزان ۱۳/۰۴ درصد خواهد بود که نشان دهنده فشار روزافزون بر منابع طبیعی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته مطالعاتی که در خصوص پیش‌بینی وضعیت برخی از حوزه‌های آبخیز کشور تحت اثرات تغییر کاربری اراضی انجام شده است، نتایج پژوهش حاضر را تایید می‌نمایند. به طوریکه در مطالعه Afifi (۲۰۲۰) که تغییر کاربری اراضی شهر شیراز را مورد بررسی قرار داده است افزایش سطح اراضی کشاورزی و مسکونی و کاهش مناطق مرتعی و جنگلی به ثبت رسیده است. همچنین در پژوهشی دیگر Falahatkar و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل LCM تغییرات کاربری اراضی دیلمان را مطالعه و نتیجه گرفتند که مساحت اراضی جنگلی و مرتعی در ۴۰ سال آینده به ترتیب ۹ و ۲۳ درصد کاهش خواهد یافت.

تمام منطقه مورد مطالعه، نقشه نگهداشت رسوب با هدف شناسایی پهنه‌های با توان نگهداشت خاک، نقشه تولید و انتقال رسوب از حوزه و مقدار خاک از دست رفته در شرایط فعلی و پیش‌بینی برای آینده استخراج شد.

نتایج

تغییرات کاربری اراضی

نتایج مربوط به تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در دوره زمانی مورد مطالعه سطح پوشش اراضی دیم طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ مقدار ۲۵/۹ درصد افزایش یافته و این در حالی است که مقدار افزایش سطح پوشش اراضی دیم پیش‌بینی شده توسط مدل برای سال‌های ۱۴۲۰-۱۴۰۰ افزایش ۲۱/۷ درصدی را نشان می‌دهد. این در خصوص مناطق مسکونی نیز صادق است به نحوی که در حد فاصل سال های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ حدود ۶۳/۰۷ درصد افزایش



نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در سال

۱۴۲۰

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در

سال ۱۴۰۰

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در

سال ۱۳۸۰

شکل ۲- روند تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Lnad use change trend in study arae

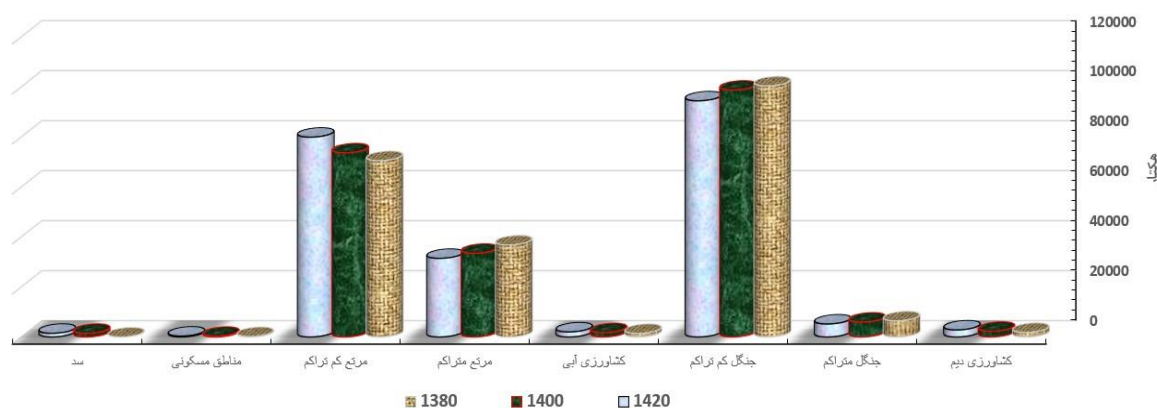
جدول ۱- مقدار تغییر در کاربری اراضی مختلف

Table 1- The amount of changes of various land uses

درصد تغییر مساحت در کل محدوده		درصد تغییر مساحت هر کاربری		مساحت (هکتار)			نوع کاربری
1400-1420	1380-1400	1400-1420	1380-1400	1420	1400	1380	
0.23	0.22	21.7	25.9	2804	2304	1830	کشاورزی دیم
-0.36	-0.22	-13.04	-7.53	5182	5959	6444	جنگل متراکم
-1.97	-0.76	-4.34	-1.65	94441	98730	100387	جنگل کم تراکم
0.12	0.14	15.53	22.12	2009	1739	1424	کشاورزی آبی
-0.93	-1.53	-6.06	-9.07	31443	33472	36811	مرتع متراکم
2.88	1.43	8.51	4.42	79901	73636	70517	مرتع کم تراکم
0.03	0.05	20.91	63.07	347	287	176	مناطق مسکونی
0	0.67	0	-	1462	1462	0	سد
				217589	217589	217589	مجموع

مورد مطالعه مساحت کاربری‌های جنگل کم تراکم و مراتع کم تراکم افزایش یافته است. از این رو با ادامه تغییر کاربری انتظار بر این است که در آینده نه‌چندان دور کاربری‌های با کیفیت پایین‌تر جای کاربری‌های کیفیت بالا را از نظر مساحتی بگیرند.

شکل ۳ نمودار تغییرات مساحت کاربری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را برای سال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد به علت تخریب‌ها و تغییر کاربری‌های اراضی طبیعی، در هر سه سال مورد بررسی از مساحت جنگل متراکم و مراتع کم تراکم کاسته شده است، در حالی که در طول دوره



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای تغییرات مساحت کاربری‌های مختلف در دوره زمانی مورد مطالعه

Figure 3- Comparative graph of changes in the area of different land uses during the study period

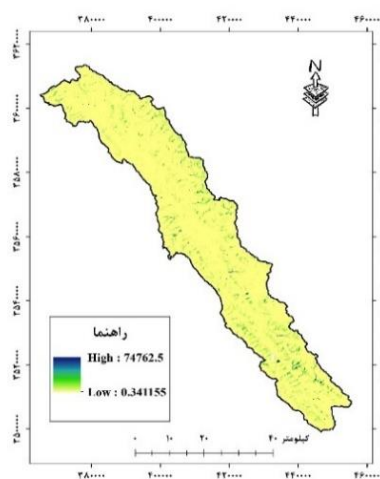
انتقال رسوب تأثیرگذار است. در سناریوهای مختلف کاربری، سطوحی که پوشش گیاهی طبیعی کاهش یافته و به اراضی کشاورزی، باغی یا ساخت‌وساز تبدیل

نتایج مدل نسبت تحویل رسوب

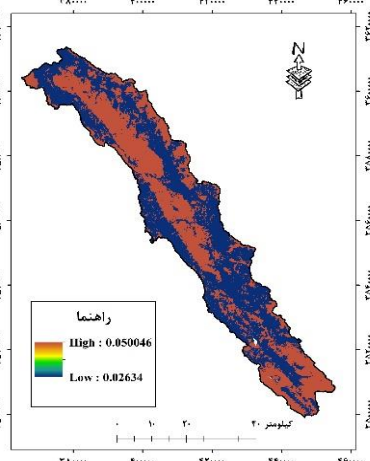
مدل‌سازی با استفاده از ماژول SDR در نرم‌افزار InVEST نشان داد که تغییر کاربری زمین در حوزه آبخیز به‌طور معنی‌داری بر الگوهای فرسایش خاک و

شده‌اند، شاهد افزایش میزان فرسایش پتانسیل، بار رسوب و انتقال مؤثر رسوب به مجاری بوده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷، ۲۹/۴۴، ۱۴۹/۴۲ و ۵۲۰/۲۴ تن در هکتار محاسبه شد. این در حالی است که این مقادیر برای شرایط آینده و سال ۱۴۲۰ به ترتیب برابر با ۳۹/۶۱، ۸/۸۶، ۲۹/۴۹، ۱۵۰/۳۷ و ۵۲۰/۰۱ تن در پیکسل به دست آمد (شکل ۴ و جدول ۲).

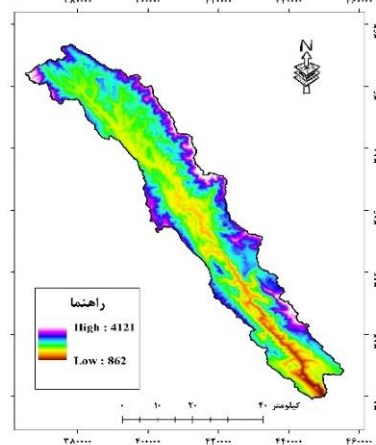
شده‌اند، شاهد افزایش میزان فرسایش پتانسیل، بار رسوب و انتقال مؤثر رسوب به مجاری بوده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷، ۲۹/۴۴، ۱۴۹/۴۲ و ۵۲۰/۲۴ تن در هکتار محاسبه شد. این در حالی است که این مقادیر برای شرایط آینده و سال ۱۴۲۰ به ترتیب برابر با ۳۹/۶۱، ۸/۸۶، ۲۹/۴۹، ۱۵۰/۳۷ و ۵۲۰/۰۱ تن در پیکسل به دست آمد (شکل ۴ و جدول ۲).



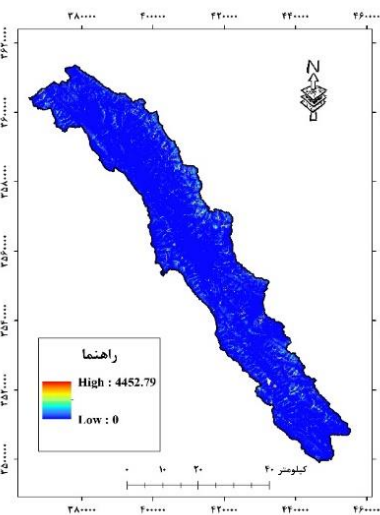
نقشه میزان فعلی RLKS



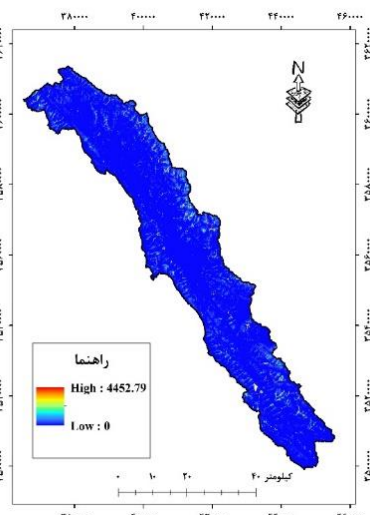
نقشه مدل رقم ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



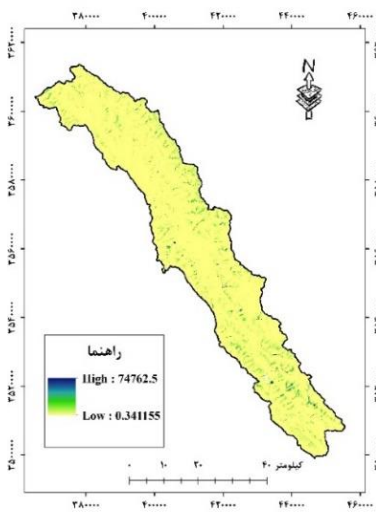
نقشه عامل فرسایش پذیری خاک (K) در منطقه مورد مطالعه



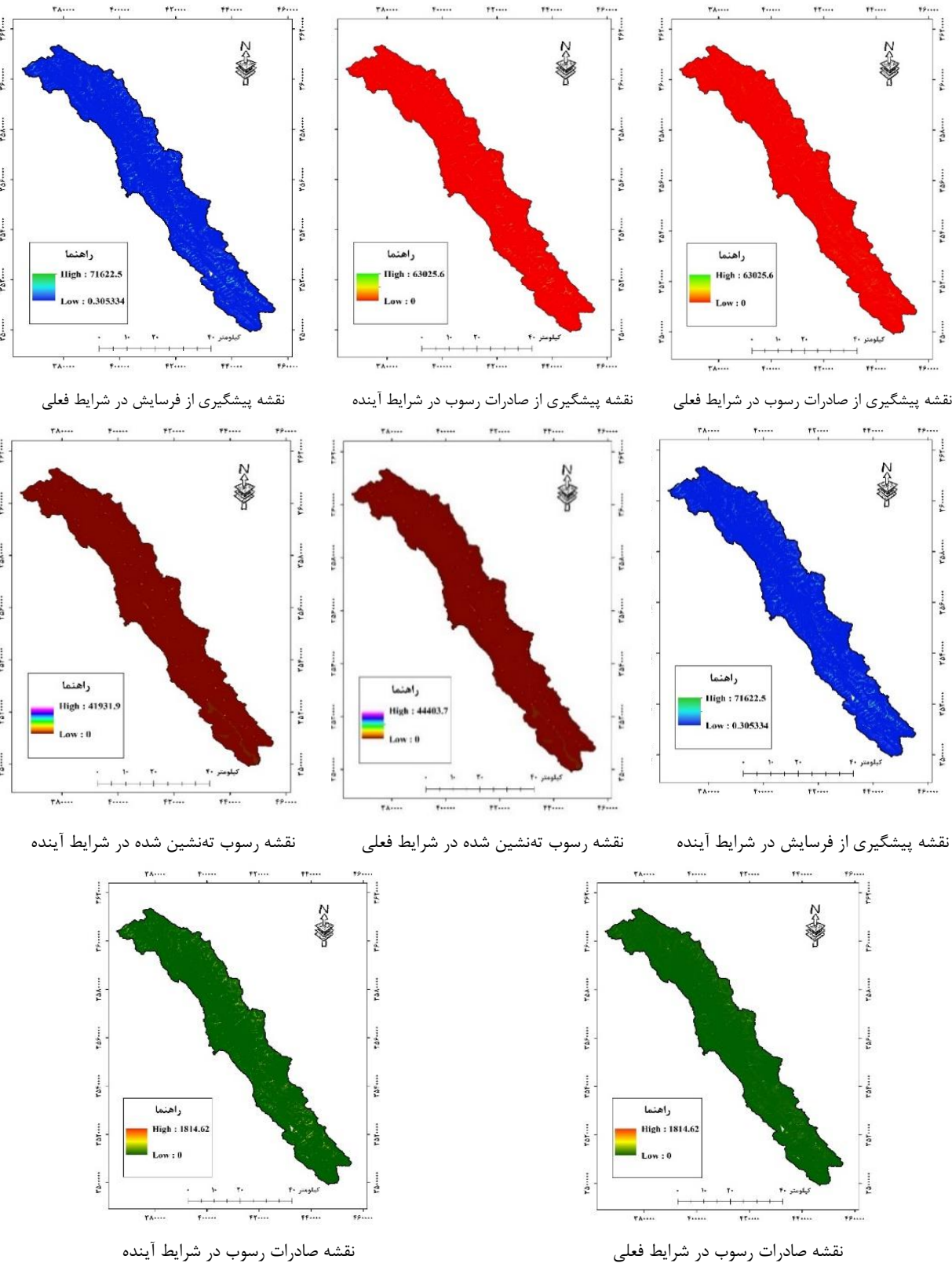
نقشه میزان آینده USLE



نقشه میزان فعلی USLE



نقشه میزان آتی RLKS



شکل ۴- روند تغییرات مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب

Figure 4- Trends in changes of soil loss potential, sediment export, deposited sediment, erosion prevention, and sediment export prevention

جدول ۲- مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب

Table 2- Values of soil loss potential, sediment export, deposited sediment, erosion prevention, and sediment export prevention

وضعیت تولید رسوب	پتانسیل هدرروی خاک	صادرات رسوب	رسوب ته نشین شده	پیشگیری از صادرات رسوب	پیشگیری از فرسایش
شرایط فعلی	39.39	8.77	29.44	149.42	520.24
شرایط آینده	39.61	8.86	29.49	150.37	520.01

راهنما: کلیه اعداد جدول فوق بر حسب تن بر هکتار می باشد.

بحث

۱۴۲۰ به ترتیب به ۳۹/۶۱، ۸/۸۶ و ۲۹/۴۹ تن در هکتار افزایش یافته‌اند. همچنین شاخص‌های خدمات بوم-سازگانی شامل پیشگیری از فرسایش از ۱۴۹/۴۲ به ۱۵۰/۳۷ تن در هر پیکسل و پیشگیری از صادرات رسوب از ۵۲۰/۲۴ به ۵۲۰/۰۱ تن در هر هکتار نیز تغییرات اندکی داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که با وجود تغییرات چشمگیر در کاربری اراضی، شاخص‌های رسوب و فرسایش تغییرات ملایمی را تجربه کرده‌اند، اما تداوم روند کنونی می‌تواند منجر به کاهش بیشتر توان بوم‌سازگان در کنترل فرسایش و رسوب در آینده شود. Zabihی و همکاران (۲۰۲۱) نیز به نتایج مشابهی برای حوزه آبخیز تالار دست یافتند و نشان دادند که روند رسوب‌گذاری از جنوب به شمال حوزه دارای روندی افزایشی می‌باشد. تحلیل انجام‌شده با استفاده از مدل SDR در نرم‌افزار InVEST نشان داد که تغییرات کاربری زمین تأثیرات قابل توجهی بر خدمات بوم‌سازگان تنظیمی مرتبط با خاک و رسوب دارد. افزایش سطوح کاربری‌های ناپایدار می‌تواند منجر به تشدید فرسایش و رسوب‌زایی شود، در حالی که حفظ یا احیای پوشش‌های گیاهی طبیعی می‌تواند عملکرد تنظیمی بوم‌سازگان را ارتقاء بخشد که با نتایج تحقیق Barzali و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. نتایج این تحقیق تفاوت میزان نگهداشت رسوب در هر یک از

نتایج حاصل از تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوزه آبخیز بازفت طی دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۰ بیانگر روند روبه‌رشد کاربری‌های انسانی به‌ویژه کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی بوده و کاهش پوشش‌های طبیعی شامل جنگل‌های متراکم، جنگل‌های کم‌تراکم و مراتع متراکم است. بیشترین افزایش سطح مربوط به کاربری‌های کشاورزی دیم (از ۱۸۳۰ به ۲۸۰۴ هکتار)، کشاورزی آبی از ۱۴۲۴ به ۲۰۰۹ هکتار و مناطق مسکونی از ۱۷۶ به ۳۴۷ هکتار بوده است، در حالی که جنگل‌های متراکم از ۶۴۴۴ به ۵۱۸۲ هکتار و مراتع متراکم از ۳۶۸۱۱ به ۳۱۴۴۳ هکتار کاهش یافته‌اند. همانند نتایج مطالعه Daneshi و همکاران (۲۰۲۰) این تغییرات، با درصد رشد سالانه متفاوت، نشان‌دهنده تبدیل تدریجی کاربری‌های طبیعی به کاربری‌های انسانی در نتیجه افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و تغییرات اقلیمی است. مدل‌سازی شاخص‌های مرتبط با فرسایش و رسوب با استفاده از ماژول SDR در نرم‌افزار InVEST نیز روندی مشابه را تأیید می‌کند. مقادیر پتانسیل هدررفت خاک، صادرات رسوب و رسوب ته‌نشین شده به ترتیب در سال پایه ۱۳۸۰ برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷ و ۲۹/۴۴ تن در هر هکتار بوده و در سناریوی پیش‌بینی شده برای سال

برنامه‌های توسعه پایدار بیش از پیش احساس می‌شود. بهره‌گیری از ابزارهای تصمیم‌یار مانند مدل InVEST می‌تواند در پیش‌بینی اثرات تغییرات کاربری و ارائه راهکارهای مدیریتی نقش مؤثری ایفا کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده که حاکی از آن است که کاربری زمین و شیوه مدیریت آن یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کارایی خدمات بوم‌سازگان مرتبط با تنظیم فرسایش و رسوب است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در سایر مناطق کشور و جهان سازگار است، که نشان داده‌اند تغییرات انسانی در کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل اراضی طبیعی به کشاورزی، سبب تشدید فرسایش خاک و تهدید خدمات تنظیمی بوم-سازگان می‌شود.

استفاده از ابزارهای مدل‌سازی فضایی مانند InVEST، می‌تواند دیدی علمی و داده‌محور با لحاظ دیدگاه ذی-نفعان، سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای آینده خدمات بوم‌سازگان فراهم آورد و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌تر در حوزه مدیریت منابع طبیعی باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد جهت مدیریت یکپارچه حوزه تمام خدمات بوم‌سازگان نظیر تولید آب، ترسیب کربن و خدمات تفرجگاهی تحت اثر توامان کاربری اراضی و تغییر اقلیم مطالعه شود.

کاربری‌های اراضی مختلف را ارائه می‌دهد. بنابراین، با توجه به اهمیت نگهداشت خاک در بالادست سطح حوزه آبخیز و در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی، توصیه می‌شود که برنامه‌ریزان و مدیران حوزه آبخیز، سیاست‌هایی مبتنی بر حفظ کاربری‌های پایدار و اعمال شیوه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب را در دستور کار قرار دهند. در این راستا اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه‌های با میزان تخریب و فرسایش بیش از حد مجاز جهت حفاظت خاک و تثبیت شرایط هیدرولوژیکی حوزه از جمله راهکارهای اجرایی و مدیریتی می‌باشد. از لحاظ مطالعاتی نیز همانطور که در پژوهش Zarandian و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثبات شد.

به‌طور کلی، به دلایل مختلف از جمله افزایش جمعیت، رشد و توسعه شهرسازی، توسعه اقتصادی و معیشتی، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و همچنین تخریب مراتع و جنگل‌ها، شاهد افزایش چشمگیر اراضی کشاورزی دیم، اراضی کشاورزی آبی و مناطق مسکونی و کاهش سطح جنگل‌ها و مراتع در حوزه آبخیز بازفت هستیم. کاهش پوشش‌های گیاهی به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع موجب تضعیف عملکردهای طبیعی حوزه آبخیز در مهار فرسایش و حفظ کیفیت خاک شده است. بنابراین، لزوم بازنگری در سیاست‌های کاربری اراضی، حفاظت و احیای پوشش‌های طبیعی و اجرای

References

Afifi M E. (2020). Modeling land use changes using Markov chain model and LCM model. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 20(56), 141-158. <https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.141>

Al-Ahmadi, F.S., & A.S. Hames. (2009). Comparison of four classification methods to extract land use and land cover from raw satellite images for some remote arid areas. *Kingdom of Saudi Arabia. Earth*

Science, 20, 167-191. <https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.9>

Asadolahi, Z., & Norozi nazar, M. (2020). Quantification of the ecosystem service of erosion control under the influence of climate change in the Gorgan Rud watershed. *Environmental research*, 11(21), 3-16. <https://doi.org/20.1001.1.20089597.1399.11.21.2.1> (In Persian)

- Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., & Mirkarimi, H. (2015). Modeling the supply of sediment retention ecosystem service (Case study: eastern part of Gorgan-rud watershed). *Environmental Erosion Research Journal*, 5(3), 961-75. <https://doi.org/20.1001.1.22517812.1394.5.3.6.6> (In Persian)
- Bai, Y., Ochuodho, T. O., & Yang, J. (2019). Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.079>
- Barzali, M., Azimi, M., Abdolhoseini, M., & Lotfi, A., (2022). Evaluating rangeland ecosystem services from the perspective of sediment retention potential using the InVEST software package (Case study: Atrak watershed). *Iranian Rangeland and Desert Research*, 29(1), 133-144. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2022.126019> (In Persian)
- Bogdan, S. M., Pătru-Stupariu, I., & Zaharia, L. (2016). The assessment of regulatory ecosystem services: the case of the sediment retention service in a mountain landscape in the southern Romanian Carpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.008>
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Daneshi, A., Najafinezhad, A., Panahi, M., & Zarandian, A. (2020). Predicting land use change effects on habitat quality of Narmada Dam Basin in Golestan Province. *Journal of Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1(1), 120-130. (In Persian)
- Deng, Z., Zhu, X., He, Q., & Tang, L. (2019). Land use/land cover classification using time series Landsat 8 images in a heavily urbanized area. *Advances in Space Research*, 63, 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.005>
- Deore, M.S.J. (2005). Prioritization of Micro-watershed of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Remote Sensing and GIS Technology. *Doctoral Dissertation, University of Pune Pune*.
- Falahatkar, S., Hosseini, S.M., Salman Mahiny, A.R., & Ayoubi, S. (2016). Prediction of land use/cover change by using LCM model (Case study in Iran). *Environmental Researches*, 7(13), 163-174. (In Persian)
- Fu, Q., Li, B., Hou, Y., Bi, X., & Zhang, X. (2017). Effects of land use and climate change on ecosystem services in central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total Environment*, 607, 633-646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.241>
- Haghdadi, M., Heshmati, GH. A., & Azimi, M.S. (2018). Assessment of water yield service on the basis of InVEST tool (Case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4), 275-290. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14361.2910>
- Jensen, J. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (3rd.ed)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 526 pp.
- Kusi, K. K., Khattabi, A., & Mhammdi, N. (2023). Evaluating the impacts of land use and climate changes on water ecosystem services in the Souss watershed, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2), 126. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11206-6>
- Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 101, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003>
- Lopez-vicente, M., Poesen, J., Navas, A., & Gaspar, L. (2013). Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*, 102, 62-

73.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.01>
- Mather, A. S., 1999. Land Use and Cover Change, *Land Use Policy*, 16, 143.
- Mohammadyari, F. (2023). Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Town and Country Planning*, 15 (2), 327-342.
<https://doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408> (In Persian).
- Nikkami, D. and Mahdian, M. H. (2015). Rainfall erosivity mapping in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 6(4), 364-376.
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.100819> (In Persian).
- Ochoa, V., & Urbina-Cardona, N. (2017). Tools for spatially modeling ecosystem services: publication trends, conceptual reflections and future challenges. *Ecosystem Services*, 26, 155-169.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.011>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, DC: United State Department of Agriculture.
- Roose, E. (1996). *Land Husbandry Components and Strategy*. Rom. FAO.
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 646, 573-586.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347>
- Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote Sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27 (2007), 28-41.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004>
- Sharp, R., H.T. Tallis, T. Ricketts, A.D. Guerry, S.A. Wood, R. Chaplin-Kramer, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstol, D. Pennington, G. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, K. Arkema, E. Lonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C.K. Kim, G. Guannel, M. Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt, R. Griffin, K. Glowinski, N. Chaumont, A. Perelman, M. Lacayo, L. Mandle, P. Hamel and A.L. Vogl. (2018). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford, 307 pp.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P. and Vogl, A.L. (2014). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford.
- Singh, P., & Khanduri, K. (2011). Land use and land cover change detection through Remote Sensing & GIS technology: case study of pathankot and dhar kalan tehsils, Punjab. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 839-846.
- Sougnéz, N., Wesemael, B., & Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *Catena*, 84, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.010>
- Vigerstol, K. L., & J. E. Aukema., (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2403-2409.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.040>
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., & Roberts, A.M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138, 74-88.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
- Vogl, A., Tallis, H., Douglass, J., Sharp, R., Wolny, S., Veiga, F., Benitez, S., León, J., Game, E., Petry, P., Guimerães, J., Lozano, J.S. (2016). *Resource Investment*

- Optimization System (RIOS), Introduction and Theoretical Documentation.* United Nations, Stanford (CA).
- Wang, S., Hu, M., Wang, Y., & Xia, B. (2022). Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103561>
- Xie, Z., Li, X., Chi, Y., Jiang, D., Zhang, Y., Ma, Y., & Chen, S. (2021). Ecosystem service value decreases more rapidly under the dual pressures of land use change and ecological vulnerability: A case study in Zhujiajian Island. *Ocean & Coastal Management*, 201, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105493>
- Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2021). Application of InVEST ecosystem services model to prioritize sub-watersheds of Talar in term of soil erosion, sediment retention and yield. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 293-303. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.257980.1470>
- Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mirsanjari, M. M., & Visockiene, J. S. (2023). Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: a case study of Karaj Metropolis, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 273. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10740-2>
- Zhang, X., F. Zhang, Y. Qi, L. Deng, X. Wang & S. Yang. (2019). New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>

Content

Design and implementation of a spatial data infrastructure for planning and sustainable natural resource management (Case study: Ilam Province)

Jalal Aziz, Ali Mahdavi, Shaban Shatai Jouibari

1-23

Study of vegetation cover changes in north khorasan province using remote sensing-based vegetation indices (Case study: Jiransu Rangelands)

Reza Omidipour, Mohabat Nadaf

24-42

Investigating temporal and spatial changes in hydrological response to flooding in the Balikhouchay Watershed

Payam Amouzegari, Nahideh Parchami

43-60

Investigation of land use changes in the Salehiyeh Wetland basin using landsat satellite data

Mahdiye Shaker, Hadi Eskandari Damaneh, Hassan Khosravi

61-84

Development of a nonparametric K-Nearest neighbors model enhanced by the PSO metaheuristic catalyst for dust storm modeling in Western Iran

Mohammad Ansari Ghojghar, Haniyeh Mohammadi

85-106

Potential assessment of karst water resources for water extraction using hydrogeological methods (Case study: Garmook karst region, Semiroom County, Isfahan Province)

Ahmadreza Karimi, Haji Karimi, Seyed Yahya Mirzaei Arjenaki

107-125

Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province

Iman Davoodi, Mostafa Moradi, Reza basiri, Pejman Tahmasebi Kohyani

126-146

Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model

Mohammad Rahmat, Siamak Dokhani, Reza Ghazavi, Alireza Daneshi, Hamid Nouri

147-163



Integrated Watershed Management

Vol: 6, No: 1. Spring 2026

Online ISSN	2783-4581
Publisher	Ilam University in association with Iranian Rainwater Catchment Systems Association
Director-in-Charge	Dr. Noredin Rostami
Editor-in-Chief	Dr. Haji Karimi
Editorial Board	Dr. Hosein Arzani (Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran) Dr. Gholamreza Zehtabian (Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran) Dr. Forood Sharifi (Professor, Research Group of Hydrology and Water Resources Development, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran) Dr. Haji Karimi (Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of 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 Pourbabaei (Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran) Dr. Mohsen Rezaei (Professor, Department of Geology, Shiraz University, Faculty of Sciences, Shiraz, Iran) Dr. Zargham Mohammadi (Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran) Dr. Hamid Reza Pourghasemi (Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran) Dr. Abazar Esmali Ouri (Professor, Department of Range & Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran) Dr. Mehdi Heydari (Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, 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



Ilam University



Address: **Deputy of Research and Technology, Ilam University, Pajoohesh Bolvd, Ilam- Iran**

P.O. Box: **69317-516**

Telefax: **0843222703**

Email: **iwm@ilam.ac.ir**

Web Site: **www.iwm.ilam.ac.ir**



Integrated Watershed Management



Ilam University

Vol: 6, No: 1. Spring 2026

Online ISSN: 2783-4581

Design and implementation of a spatial data infrastructure for planning and sustainable natural resource management (Case study: Ilam Province)

1-23

Jalal Aziz, Ali Mahdavi, Shaban Shatai Jouibari

Study of vegetation cover changes in north khorasan province using remote sensing-based vegetation indices (Case study: Jiransu Rangelands)

24-42

Reza Omidipour, Mohabat Nadaf

Investigating temporal and spatial changes in hydrological response to flooding in the Balikhouchay Watershed

43-60

Payam Amouzegari, Nahideh Parchami

Investigation of land use changes in the Salehiyeh Wetland basin using landsat satellite data

61-84

Mahdiye Shaker, Hadi Eskandari Damaneh, Hassan Khosravi

Development of a nonparametric K-Nearest neighbors model enhanced by the PSO metaheuristic catalyst for dust storm modeling in Western Iran

85-106

Mohammad Ansari Ghojghar, Haniyeh Mohammadi

Potential assessment of karst water resources for water extraction using hydrogeological methods (Case study: Garmook karst region, Semirum County, Isfahan Province)

107-125

Ahmadreza Karimi, Haji Karimi, Seyed Yahya Mirzaei Arjenaki

Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province

126-146

Iman Davoodi, Mostafa Moradi, Reza basiri, Pejman Tahmasebi Kohyani

Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model

147-163

Mohammad Rahmat, Siamak Dokhani, Reza Ghazavi, Alireza Daneshi, Hamid Nouri