پژوهش‌های آبخیزداری

۱۵۲

دوره ۳۹، شماره ۳ — شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵

- **رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین‌لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور**

رضاعلی رحیمی‌تالارپشتی، قربان وهاب‌زاده، عطاالله کاویان، سیدرمضان موسوی ۱

- **پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در آبخیز قره‌سو استان گلستان**

کورش شیرانی، محمدعلی صدری ۲۲

- **بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی**

کیوان کاظمی‌حسنوند، حجت‌اله یونسی، امیرحمزه حقی‌آبی، رسول دانشفراز، بابک شاهی‌نژاد ۴۵

- **یادگیری تقویتی چارچوبی به‌منظور پهنه‌بندی سیل در مناطق کوهستانی با استفاده از مدل Deep Q-Learning**

صالح یوسفی، سارا مردانیان، احمدرضا کریمی‌پور ۶۴

- **مقایسه رواناب و فرسایش خاک در توده‌های طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) و جنگل‌کاری‌شده با زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) در بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس**

سمیه حیدری، نورالدین رستمی، مهدی حیدری، مرتضی قیصوری ۷۹

- **مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان**

آرمان کیانی، کاکا شاهدی، محمود حبیب‌نژادروشن، علی حقی‌زاده ۹۷

- **شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابور در دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب**

سیدحمیدرضا صادقی، نسترن نادری‌مرنگلو، سحر مصطفایی‌یونجالی، اسماء بادامه، زینب شیخی، علی نوری، سودابه قره‌محمودلی ۱۲۳

نشریهٔ علمی "پژوهش‌های آبخیزداری"

صاحب امتیاز: سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس
دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵

درجه علمی پژوهشی این نشریه به استناد نامه شماره ۳/۱۸/۱۹۲۹۱۶ به تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۲مورد تأیید وزارت علوم، تحقیقات و فناوری قرار گرفته است. همچنین این نشریه دارای پروانه انتشار به شماره ۱۶۱۹۹ مورخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی می‌باشد.

مدیر مسئول: ابوالفتح مرادی، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سردبیر: علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اعضای هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):
امیر حمزه حقی آبی، استاد گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
داور خلیلی، استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
محمدتقی دستورانی، استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
محمد زارع، استاد بخش علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز
سیدمسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
مجید صوفی، دانشیار بازنشسته بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سیدیوسف عرفانی فرد، دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران
عطا الله کاویان، استاد گروه آبخیزداری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری
علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
مدیر داخلی: سید مسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
ویراستار و کارشناس اداری: مریم عنایتی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
کارشناس آماری: لادن جوکار، مربی بازنشسته مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی شیراز، ایران
صفحه آرا : پارسا حقیقی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

این نشریه در پایگاه‌های استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ISSN ۲۹۸۱-۲۰۳۸ به نشانی https://isc.gov.ir ، نظام نمایه سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICeST) به نشانی https://ricest.ac.ir ایران ژورنال www.sid.ir و www.magiran.com نمایه می‌شود.

نشریه در رد ویرایش نوشته ها و یا خلاصه کردن آنها آزاد است.
استفاده از تصویرهای نشریه با ارجاع به نشریه آزاد است.

نشانی: شیراز بلوار، مدرس خیابان جانبازان نبش استاد مردانی غربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، دفتر نشریهٔ پژوهش‌های آبخیزداری

کدپستی : ۷۱۵۵۸-۶۳۵۱۱ **صندوق پستی: ۶۱۷-۷۱۵۵۵**
تلفن: ۳۷۲۰۴۹۵۹ (۰۷۱) داخلی -۲۲۴ **دورنگار: ۳۷۲۰۶۳۷۶ (۰۷۱)**
تارنما: http://wmrj.areeo.ir **رایانامه: wmrj@areeo.ac.ir**

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

فهرست **شماره ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵**

رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین‌لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور

رضاعلی رحیمی‌تالارپشتی، قربان وهاب‌زاده، عطاالله کاویان، سیدرمضان موسوی ۱

پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در آبخیز قره‌سو استان گلستان

کورش شیرانی، محمدعلی صدری ۲۲

بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی

کیوان کاظمی‌حسنوند، حجت‌اله یونسی، امیرحمزه حقی‌آبی، رسول دانشفراز، بابک شاهی‌نژاد..... ۴۵

یادگیری تقویتی چارچوبی به‌منظور پهنه‌بندی سیل در مناطق کوهستانی با استفاده از مدل Deep Q-Learning

صالح یوسفی، سارا مردانیان، احمدرضا کریمی‌پور ۶۴

مقایسه رواناب و فرسایش خاک در توده‌های طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) و جنگل‌کاری‌شده با زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) در بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس

سمیه حیدری، نورالدین رستمی، مهدی حیدری، مرتضی قیصوری..... ۷۹

مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان

آرمان کیانی، کاکا شاهدی، محمود حبیب‌نژادروشن، علی حقی‌زاده..... ۹۷

شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابور در دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب

سیدحمیدرضا صادقی، نسترن نادری‌مرنگلو، سحر مصطفایی‌یونجالی، اسماء بادامه، زینب شیخی، علی نوری، قره‌محمودلی..... ۱۲۳

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین‌لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور

رضاعلی رحیمی‌تالارپشتی[۱]، قربان وهاب‌زاده[۲]، عطاالله کاویان*[۳]، سید رمضان موسوی[۴]

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران
۲ و ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران
۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

زمین‌لغزش‌ها، به‌عنوان یکی از ویرانگرترین پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناختی، هرساله در مناطق مختلف ایران سبب خسارت‌های جانی و مالی هنگفتی می‌شوند. زمین‌لغزش‌ها، نوعی حرکت دامنه‌ای هستند که بیشتر تحت تأثیر عامل‌های طبیعی مانند زلزله، بارندگی شدید و فرسایش بوده، اما به‌وسیلهٔ مداخلات انسانی مانند ساخت و سازهای غیراصولی، جاده‌سازی و تغییر در الگوی رواناب، تشدید می‌شود. در مناطق کوهستانی و دامنه‌های شیب‌دار کشور به‌ویژه مناطق شمالی آن، به‌دلیل شرایط حساس سنگ‌شناسی و زمین‌ساختی، کانون اصلی این پدیده هستند. پیامدهای زمین‌لغزش‌ها به ویرانی خانه‌ها و شریان‌های حیاتی محدود نمی‌شود و بیشتر منجر به مسدود شدن مسیرهای حمل و نقل، آسیب به زمین‌های کشاورزی و تلفات انسانی می‌شود. با تلفیق روش‌های سنجش از دور و بررسی‌های میدانی، می‌توان امکان پایش و ارزیابی دقیق‌تر زمین‌لغزش‌ها را فراهم آورد. تحلیل‌های زمین‌فناوری و زمین‌ریخت‌شناختی نقش بسزایی در شناسایی مناطق مستعد و مدیریت خطر این مخاطره طبیعی دارند. ازاین‌رو، بررسی و شناسایی مناطق ناپایدار و تحلیل عامل‌های مهارکننده این پدیده، گامی اساسی در کاهش خطر و مدیریت بحران است. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف سنجش رفتار مکانی-زمانی توده زمین‌لغزش چاسرکا بابل انجام شد.

مواد و روش‌ها

در مرحله نخست، به‌منظور بررسی تاریخچه و شناخت توده زمین‌لغزش چاسرکا، از تصویرهای تاریخی سامانه گوگل‌ارث در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۴ استفاده شد و پنج سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ به‌عنوان نمونه انتخاب شد. در این پژوهش، شبکه‌های رفتارسنجی منطقه لغزشی با چهار نقطه مبناء و ۲۲ نقطه پایش جابجایی، طراحی و ایجاد شد. افزون بر این، عکس‌های هوایی تصحیح‌شده هندسی در دوره‌های مختلف بررسی و روند تغییرات آنها مقایسه شد.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** ataollah.kavian@gmail.com
استناد: رحیمی‌تالارپشتی، ر. ع.، وهاب‌زاده، ق.، کاویان، ع.، موسوی، س. ر. ۱۴۰۵. رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین‌لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳):۲۱-۱.
شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.371320.1643
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۰/۱۴، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱ تا ۲۱.
ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس
© نویسندگان

برای پردازش داده‌ها و محاسبات سرشکنی شبکه زمین‌سنجی پایش زمین‌لغزش، از نرم‌افزار تجاری Leica Geo Office نسخه ۷ بهره‌برداری شد و دقت مدل و صحت کلی آن ارزیابی شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده نقش ترکیبی عامل‌های طبیعی و مداخلات انسانی در رخداد زمین‌لغزش‌ها در منطقه چاسرکا بود. تحلیل‌ها بیانگر آن بود که عامل‌های طبیعی مانند شیب، جهت دامنه و ویژگی‌های زمین‌شناسی (مارن، شیل و رس‌های نئوژن) زمینه‌ساز رخداد زمین‌لغزش‌ها بودند، اما مداخلات انسانی به‌ویژه نابودی پوشش جنگلی، ساخت و سازهای غیرمهندسی، و تغییر پوشش زمین در دهه‌های پیشین، عامل اصلی ناپایداری شیب‌ها و تشدید خطر زمین‌لغزش‌ها، به‌شمار می‌آیند. بیشترین رخداد زمین‌لغزش‌ها در جهت‌های شمال‌شرق، شرق و شمال‌غرب در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵٪ و در مناطق با ژرفای خاک کمتر از ۵۰ سانتی‌متر مشاهده شد. در ۴۰ سال گذشته، تغییرات پوشش زمین از جنگل‌های بکر به جاده‌ها و زمین‌های زراعی، افزون بر کاهش پوشش گیاهی، موجب اختلال در تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی دامنه‌ها و افزایش خطر لغزش‌ها شده است. ازاین‌رو، نتایج پایش زمین‌سنجی نشان‌دهنده تغییرات تدریجی و پیوسته در حرکت توده‌های لغزشی بود. تغییرات ثبت‌شده در پنج مرحله مشاهده‌ای، نشان داد که زمین‌لغزش‌ها در چاسرکا فرآیندهای تدریجی و پویایی هستند که سرانجام به شکست ناگهانی منجر می‌شوند. تحلیل‌ها نشان داد که جابجایی‌های قابل‌توجه در برخی نقاط (مانند R2 و R3) با جهت غالب لغزش‌ها در منطقه همخوانی زیادی داشته و این یافته نشان‌دهنده رخداد تغییرات تدریجی در مقاومت برشی خاک است که سرانجام موجب شکست شیب‌ها می‌شود. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش مؤید اهمیت تحلیل جامع تغییرات اقلیمی، زمین‌ریخت‌شناختی و انسانی در مدیریت خطر زمین‌لغزش‌ها است. بر اساس نتایج این پژوهش برای پیشگیری از زمین‌لغزش‌ها، برنامه‌ریزی‌های مناسب برای مهار تغییرات پوشش زمین و حفظ پوشش گیاهی در مناطق حساس باید انجام شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های تحلیل پایش و رفتارسنجی توده زمین‌لغزش چاسرکا بیانگر آن بود که تغییر شکل‌های تدریجی پیش از گسیختگی ناگهانی عامل اصلی ناپایداری این توده است. ازاین‌رو، بر پایهٔ نتایج این پژوهش استقرار سامانه پایش دائمی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری دقیق جابجایی‌ها برای توسعه سامانه هشدار زودهنگام زمین‌لغزش پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، با توجه به نقش و اهمیت پوشش گیاهی در تعدیل شرایط آب‌شناختی و سازه‌ای شیب، احیای هدفمند پوشش گیاهی با استفاده از گونه‌های بومی به‌عنوان یک راهکار تکمیلی در مدیریت پایداری توده لغزشی پیشنهاد می‌شود. همچنین، با توجه به ویژگی بارش‌های حدی (نوع و شدت) به‌دلیل تغییر اقلیم در شمال ایران، تداوم پایش بلندمدت برای تحلیل رفتار توده لغزشی در پاسخ به محرک‌های آبی–اقلیمی در دیگر آبخیزهای مشابه کشور، پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

پایداری شیب، پایش، تحلیل مکانی-زمانی، زمین‌لغزش، شکست شیب

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطره‌های طبیعی و ناپایداری دامنه‌ای (کاویان و همکاران ۲۰۲۰؛ احسان و همکاران ۲۰۲۵) هرساله در کشور خسارت‌های جانی و مالی سنگینی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز، به‌همراه دارند (جویباری و همکاران ۲۰۱۶؛ دسترنج و نور ۲۰۲۱؛ درویشی و همکاران ۲۰۲۵). ازاین‌رو، برای کاهش خسارت‌های احتمالی دستیابی به اطلاعات شیوه سازوکار شروع، توسعه و پویایی حرکات زمین‌لغزشی، ضروری است. اگرچه عامل‌های محیطی مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش‌ها، به‌ویژه در مناطق جنگلی، به‌طور گسترده بررسی شده‌اند (شفیعی کیگاسری و همکاران ۲۰۲۴)، اما ماهیت پنهان، توسعه تدریجی و رفتار پیچیده زمانی–مکانی این پدیده‌ها، سبب‌شده تا پایش و رفتارسنجی دقیق آن‌ها چالش اساسی شود (گوو و همکاران ۲۰۲۱). بسیاری از سامانه‌های متداول پایش، مبتنی بر مشاهده‌های تک‌بعدی است و نمی‌توان به‌طور هم‌زمان تغییر شکل‌ها و پاسخ‌های پویایی توده زمین‌لغزش را در مقیاس‌های مختلف، ثبت کرد (وانگ و

همکاران ۲۰۲۲). افزون بر این، بخش قابل‌توجهی از زمین‌لغزش‌های ویران‌گر ثبت‌شده در سال‌های پیشین، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی نشده‌اند؛ زیرا اغلب در مناطق صعب‌العبور، با پستی‌بلندی پیچیده و پوشش سطحی متراکم، توسعه یافته‌اند. ازاین‌رو، بازسازی تاریخچه حرکتی زمین‌لغزش‌ها، یکی از مؤلفه‌های مهم و ضروری برای درک پویایی و ارزیابی خطر آن‌ها است.

بااین‌حال، اطلاعات مربوط به تاریخچه زمانی حرکات زمین‌لغزشی برای اکثر مناطق نامشخص است و روش‌های تاریخ‌گذاری مطلق به‌رغم کاربرد گسترده، با محدودیت‌هایی ازجمله بازه زمانی محدود و نبودن قطعیت مواجه‌اند (لانگ و همکاران ۱۹۹۹؛ پنیک ۲۰۱۵). در چنین شرایطی پایش بلندمدت و پیوسته تغییر شکل توده زمین‌لغزش به‌عنوان رویکردی کارا و مؤثر برای شناسایی و پایش زمین‌لغزش‌های فعال و تحلیل رفتار حرکتی آن‌ها توصیه می‌شود. روش‌های پایش اندازه‌گیری مستقیم شامل روش زمین‌سنجی، روش عکس‌برداری نزدیک (شو ۲۰۱۴)، سامانه جهانی ناوبری ماهواره‌ای[1] (GNSS) و تداخل‌سنجی[2] (InSAR) (ژوو و همکاران ۲۰۱۹) است. به‌طور کلی، ابزارهای پایش جابجایی‌های سطحی زمین‌لغزش نیز شامل نقشه‌بردارها، ابزارهای عرض و طول جغرافیایی، ایستگاه‌های کل، حسگرهای جابجایی و اندازه‌گیرهای فاصله مادون‌قرمز است. با ابزارهای پایش می‌توان جابجایی مطلق سطح را مشاهده کرد، اما مناسب شرایط خارجی است (ژوو و همکاران ۲۰۱۹). در روش عکس‌برداری نزدیک از نقشه‌بردار نزدیک استفاده می‌شود تا به‌طور هم‌زمان دو نقطه ثابت مشاهده‌ای در موقعیت‌های مختلف، تصویربرداری شود و تغییرات موقعیت‌های متناظر برای هدف پایش تغییر شکل تحلیل شود و ذخیره‌سازی اطلاعات اندازه‌گیری آسان شود، اما در برابر شرایط جوی آسیب‌پذیر است (ژوو و همکاران ۲۰۲۵). در روش GNSS جابجایی و تغییر شکل را با ثبت ویژگی نقاط در موقعیت‌های ثابت پایش می‌کنند و اندازهٔ تغییرات آنها را بر اساس تفاوت میان مختصات سه‌بعدی در دوره‌های مختلف به‌دست می‌آورند. این فناوری برای جمع‌آوری اطلاعات سریع است، ولی به‌دلیل پایه‌گذاری نقطه به نقطه و حساس بودن سیگنال نسبت به تداخل، نمی‌توان تغییرات پیوسته سطح را به‌طور مستقیم مشاهده کرد (وانگ و همکاران ۲۰۲۲). با توجه به‌دشواری پیش‌بینی زمان رخداد، شناسایی و منطقه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش برای کاهش خسارت‌ها ضروری است. در این راستا، بررسی‌های پرشماری انجام‌شده است. موسوی و همکاران (۲۰۱۱) در آبخیز سجارود شمال ایران از تابع وایازی لجستیک برای مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش از سنجه‌های شبکه جاده، بلندی، انحنای شیب، بارندگی و فاصله از گسل استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد فقط اثر شبکه جاده بر رخداد زمین‌لغزش معنادار بود و اثر دیگر سنجه‌ها بر افزایش دقت مدل قابل‌توجه نبوده و حذف شدند. آنها بر اساس شاخص‌های آماری (ROC و R^2) دقت کلی مدل نهایی را ۸۵/۳٪ گزارش کردند. رضوان‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) در بخشی از مازندران، سه مدل نسبت فراوانی (FR)، وزن شواهد (WoE) و شاخص آماری (SI) را با استفاده از ۱۳ عامل مؤثر بر زمین‌لغزش ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد (AUC) هر سه مدل مناسب و از ۷۹/۴۳ تا ۸۱/۵۱٪ بود و می‌توان از این مدل‌ها به‌عنوان ابزارهای قابل‌اطمینان برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در منطقه بهره برد. دسترنج و نور (۲۰۲۰) برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش در بینالود، روش‌های AHP و منطق فازی در GIS را با یکدیگر مقایسه کردند. آنها دریافتند که روش AHP[3] با دقت ۸۱/۷٪ برتر از روش فازی (۷۵/۲٪) بود و از نقشه‌های تهیه‌شده به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای کاهش خسارت‌های زمین‌لغزش، می‌توان استفاده کرد. شفیعی کیگاسری و همکاران (۲۰۲۴) از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش وایازی وزنی فراوانی برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در رامسر استفاده کردند. آنها مهم‌ترین سنجه‌های مؤثر را عامل‌های شیب، خاک، زمین‌شناسی، فاصله از جاده و پوشش گیاهی معرفی کردند. افزون بر این، آنها دریافتند که ۳۱/۷۹٪ از منطقه در معرض لغزش شدید است و بیشترین خطر مربوط به جاده‌های شمال‌غرب و شرق است. ژانگ و چین (۲۰۲۵) برای بررسی علت ریزش‌های زمین به‌دلیل بارش در جنوب‌غربی چین از چهار گروه داده‌های بارش و داده‌های تاریخی ریزش‌های زمین (۲۰۱۸-۲۰۱۰) استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد ۸۰٪

1- Global Navigation Satellite System
2- Interferometric Synthetic Aperture Radar
3- Analytic Hierarchy Process

ریزش‌های زمین در فصل سیلاب (آوریل-ژوئیه) رخداده است. این پژوهشگران بیشترین تراکم را در شیب‌های پیچیده مشاهده کردند.

منحنی‌های مؤثر شدت-مدت (EID) و تحلیل حساسیت نشان دادند بهترین عملکرد در پیش‌بینی ریزش‌های زمین مربوط به داده‌های CMFD (R^2=۰/۹۵۲۹) است. ترکیب فراوانی حرکات شناسایی‌شده با توزیع مکانی آن‌ها، اطلاعات بسیار مهمی برای تعیین خطر زمین‌لغزش در مناطق جنگلی، به‌ویژه مناطقی که منابع اطلاعاتی دیگری درباره جابجایی‌های زمین‌لغزشی برای آنها در دسترس نیست، فراهم می‌آرود.

بر پایهٔ نتایج بررسی‌های پیشین، تحلیل پایش و رفتارسنجی مکانی–زمانی الگوهای حرکتی زمین‌لغزش‌ها یکی از مؤلفه‌های مهم برای درک پویایی و ارزیابی خطر توده‌های ناپایدار است. اگرچه پدیده زمین‌لغزش در پژوهش‌های پرشماری در شمال کشور، ازجمله آبخیزهای شلمانرود و چاکرود در استان گیلان (شعبانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مهرپویا ۲۰۲۴)، آبخیز رامیان در استان گلستان (صالحی‌پورمیلانی و یمانی ۲۰۱۸)، آبخیز نکارود و شهرستان نور در استان مازندران (زالی و شاهدی، ۲۰۲۱؛ شریفی و همکاران، ۲۰۲۲) و گسله خزر در البرز مرکزی (نظری و همکاران، ۲۰۲۱) بررسی‌شده است، اما هدف غالب این پژوهش‌ها شناسایی، مدل‌سازی، پهنه‌بندی و تحلیل عامل‌های مؤثر بوده است و همچنان داده‌های مبتنی بر پایش پیوسته و رفتارسنجی تغییر شکل توده‌های زمین‌لغزشی ناکافی و محدود است.

در این راستا، نتایج پژوهش‌های انجام‌شده برای پایش و رفتارسنجی مکانی–زمانی توده زمین‌لغزشی منطقه چاسرکا در شهرستان بابل که یکی از نواحی مستعد ناپایداری دامنه‌ای است، نیز محدود و ناکافی است. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف پایش پیوسته و تحلیل رفتار حرکتی توده زمین‌لغزشی نامبرده انجام شد تا تصویر دقیقی از وضعیت فعالیت و الگوی تغییر شکل آن ارائه شود.

مواد و روش‌ها

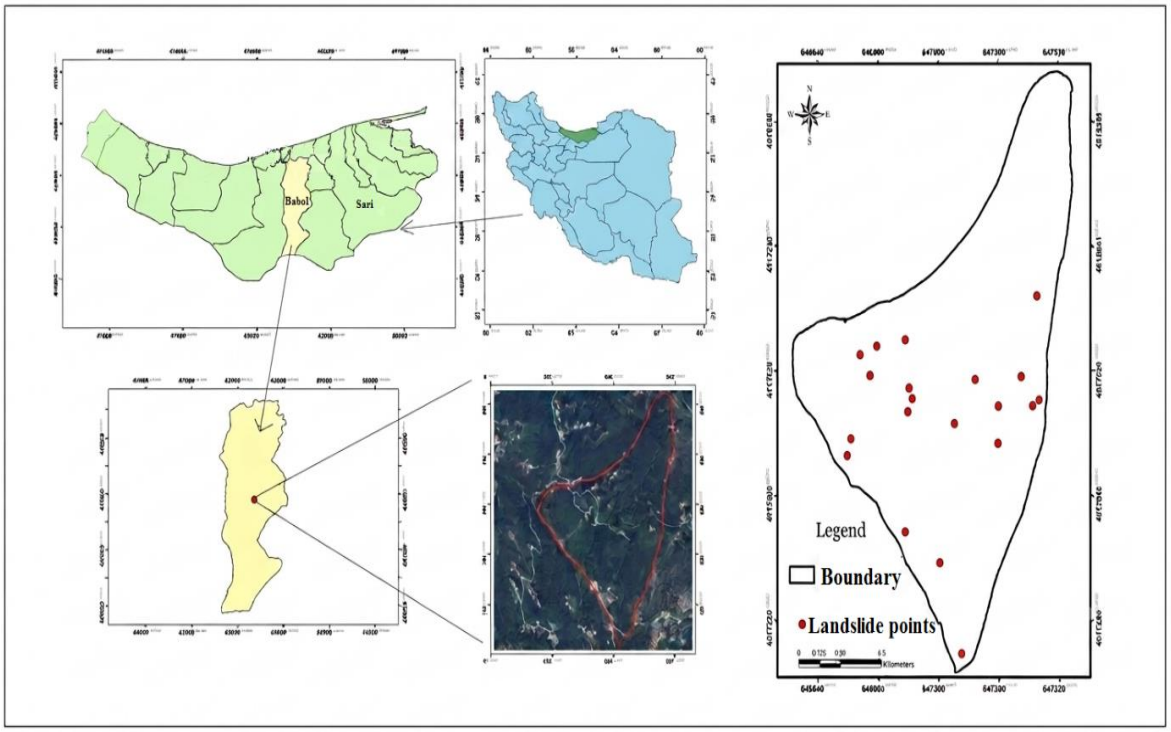
معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

توده زمین‌لغزش چاسرکا در جنوب‌شرقی شهر گلوگاه (بخش بندپی شرقی) و در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان بابل است. این منطقه در آبخیز سجاد رود و مساحت آن حدود ۷۲ هکتار است. زمین‌لغزش‌های رخداده در این منطقه از نوع چرخشی مرکب بوده و اثرات آن بر زیرساخت‌ها و زندگی ساکنان قابل توجه است. افزون بر نابودی راه‌های روستایی و منازل مسکونی، این زمین‌لغزش‌ها موجب قطع ارتباط ۳۰ روستای ییلاقی منطقه فیروزجاه با شهرهای گلوگاه و بابل شده است.

اجرای طرح‌های زیربنایی مانند لوله‌گذاری آب شرب، انتقال گاز، برق‌رسانی و تلفن در سال‌های ۹۰ تا ۹۵ نیز در تشدید این پدیده تأثیرگذار بوده است. با توجه به این مشکلات و اثرات اجتماعی و اقتصادی زمین‌لغزش‌ها، این منطقه به‌عنوان منطقه پژوهشی مناسب برای بررسی الگوهای زمین‌لغزش در مناطق مشابه شمال ایران انتخاب شد. موقعیت منطقه پژوهشی و پراکنش نقاط زمین‌لغزش در شکل ۱ و نمودار روندنمای پژوهش در شکل ۲، نشان داده‌شده است.

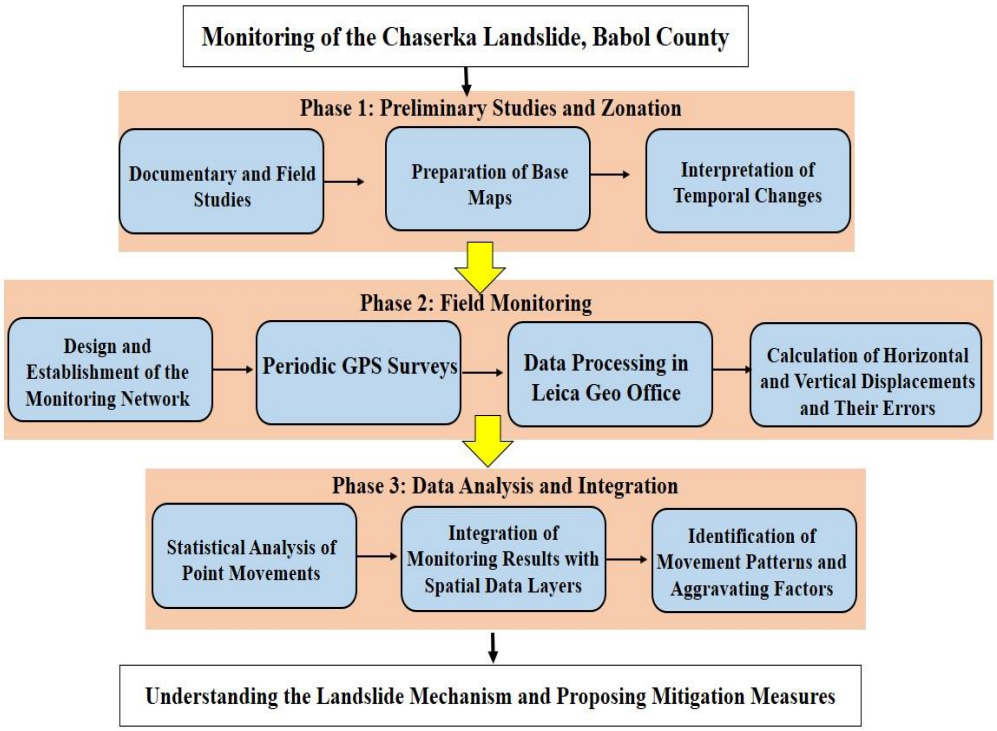
روش پژوهش

به‌منظور دستیابی به راهکارهای مهار زمین‌لغزش‌ها، مراحل مهم در اجرای این پژوهش شناسایی سازوکارهای رخداد حرکت و عامل‌های اصلی رانش بود. می‌توان با استفاده از سامانه‌ها و روش‌های مختلفی ازجمله روش‌های سنجش از دور، تصویرسنجی، نقشه‌برداری، مشاهده‌ای، زمین‌فناوری و زمین‌فیزیکی، جابجایی سطح و تغییر شکل زمین در مدت زمین‌لغزش پایش کرد (یوردانوف و همکاران ۲۰۲۱؛ مینئو و همکاران ۲۰۲۵).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در سطح استان مازندران و ایران.

Figure 1- Location of the study area in the Mazandaran Province and Iran.



شکل ۲- روندنمای پژوهش برای پایش و تحلیل زمین‌لغزش چاسرکا.

Figure 2- Research Flowchart for Monitoring and Analysis of the Chaserka Landslide.

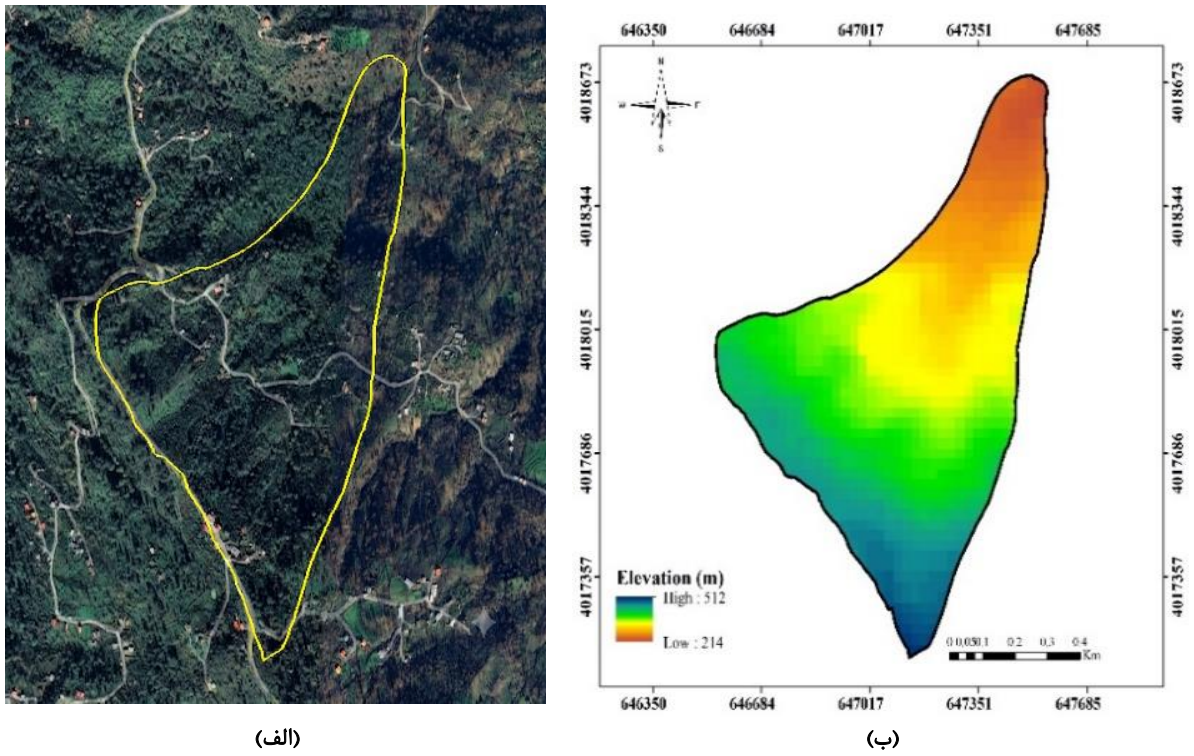
مراحل اولیه پژوهش شامل ارزیابی بررسی‌های پیشین، شناسایی منطقه لغزشی با انجام بازدیدهای اولیه به‌منظور آشنایی با زمین‌لغزش‌های موجود، ثبت اطلاعات عمومی و توجیه منطقه، تعیین مرز توده لغزشی با استفاده از دستگاه GPS دستی و تعیین مرز محدوده لغزش به‌وسیلهٔ نقشه‌های پستی‌بلندی و تصویرهای ماهواره‌ای، بود.

شناسایی تغییرات تاریخی توده زمین‌لغزش

با استفاده از تصویرهای تاریخی سامانه گوگل ارث و پیش از انجام بازدیدهای میدانی، پیشینهٔ تغییرات تاریخی توده زمین‌لغزش چاسرکا، به‌طور دقیق بررسی شد. در این راستا، از تصویرهای موجود در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۴ بهره‌برداری شد تا امکان تحلیل روند تغییرات در طول زمان فراهم آید. برای بررسی دقیق وضعیت توده زمین‌لغزش در این سال‌ها، پنج سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ به‌عنوان نمونه‌های مهم انتخاب شدند. با این رویکرد می‌توان تغییرات جغرافیایی و رفتاری توده زمین‌لغزش در طول زمان را شناسایی کرد و به درک بهتری از عامل‌های اثرگذار بر پایداری آن، دست‌یافت.

تهیه نقشه‌های پستی‌بلندی و پوشش زمین چاسرکا

با استفاده از نقشه رقومی بلندی (DEM) با دقت ۱۰×۱۰ متر، نقشه‌های اولیه شیب، جهت و بلندی منطقه تهیه شد. بررسی‌های پستی‌بلندی در منطقه چاسرکا نشان داد بیشترین عامل اثرگذار بر فعال‌سازی لغزش‌های چرخشی، صفحه‌ای و حرکت گل‌آلود شیب‌های از ۲۵ تا ۴۵٪ است. این بازه شیب معمولاً در سازندهای حساس به لغزش (مارن، شیل، رس‌های نئوژن و آبرفت‌های اشباع‌شده کوهپایه‌ای) مشاهده شد. تصویر پوشش زمین با استفاده از گوگل‌ارث و پستی‌بلندی منطقه چاسرکا در شکل ۳، نشان‌داده شده است.



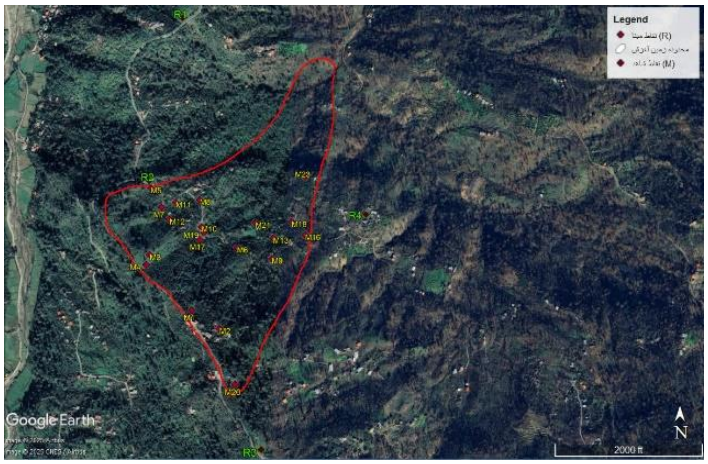
(الف) (ب)

شکل ۳- تصویر پوشش زمین با استفاده از گوگل‌ارث (الف) پستی‌بلندی منطقه چاسرکا (ب).

Figure 3 – Land cover image using Google Earth (a) topography map of the Chaserka Region (b).

ایجاد شبکه‌های رفتارسنجی منطقه لغزشی

در این مرحله، موقعیت تمام نقاط ثابت شبکه (نقاط مبناء) روی زمین با استفاده از GPS تعیین شد و پس از حفاری، این نقاط نصب شدند. شبکه نقاط ثابت شامل چهار نقطه مبناء بود که معمولاً در محدوده‌ای خارج از پیرامون توده لغزشی و در مکان‌هایی که زمین ثابت و بدون حرکت بود، انتخاب شدند و با مقایسه تفاوت مختصات محاسبه‌شده از حداقل دو دوره مشاهده‌ای برای تعیین جابجایی، استفاده شدند. به‌منظور رفتارسنجی جابجایی سطحی به‌دلیل پدیده زمین‌لغزش در روستای چاسرکا و مناطق پیرامون آن، شبکه‌ای با ۲۶ نقطه طراحی شد. این شبکه شامل چهار نقطه مبناء در محل‌های ثابت و ۲۲ نقطه پایش جابجایی در محل درزها، شکاف‌ها، توده‌های مشکوک به لغزش و جابجایی سطحی زمین بود (شکل ۴). این نقاط به‌گونه‌ای انتخاب شدند تا موانع (درختان، تیر برق، ساختمان و....) کمترین اثر را بر امواج میان منبع و گیرنده داشته باشند و معمولاً در مکان‌هایی با تراکم کمتری از درخت و پوشش گیاهی مستقر می‌شوند. نمایی از آثار ویرانگر زمین‌لغزش در مناطق مختلف با انواع پوشش گیاهی در روستای چاسرکا در شکل ۵، نشان‌داده‌شده است.



شکل ۴- نمای قائم از شبکه رفتارسنجی جابجایی سطحی زمین در زمین‌لغزش روستای چاسرکا.

Figure 4 - Vertical view of the surface ground displacement behavior measurement network in the Chaserka Village landslide.



شکل ۵- نمایی از آثار ویرانگر زمین‌لغزش در مناطق مختلف با انواع پوشش گیاهی در روستای چاسرکا.

Figure 5 - A view of the destructive effects of landslides in various areas with different types of vegetation cover in the Chasarka Village.

بررسی عکس‌های هوایی تصحیح‌شده هندسی مربوط به دوره‌های مختلف و مقایسه روند تغییرات

در این مرحله پنج دوره (پنج دهه) عکس‌های هوایی از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۳ مربوط به سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح و سازمان نقشه‌برداری کل کشور، تهیهٔ و با انجام تصحیحات هندسی روی آنها تغییرات پوشش، مشاهده شد.

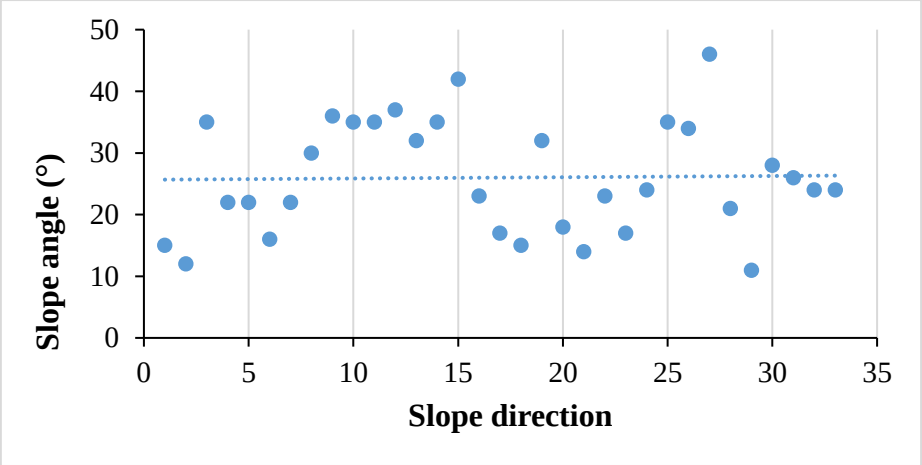
پردازش و محاسبات سرشکنی شبکه زمین‌سنجی پایش زمین‌لغزش

برای پردازش مشاهده‌ها و انجام محاسبات شبکه زمین‌سنجی تعیین موقعیت ماهواره‌ای، از نرم‌افزار تجاری Leica Geo Office نسخه ۷ استفاده شد. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار و با استفاده از روش برآورد کم‌ترین مربعات می‌توان داده‌های مشاهده‌ای یک و دو فرکانسه را برای سرشکنی شبکه، پردازش کرد (جویباری و همکاران ۲۰۱۶). افزون بر این، با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل‌های مناسبی برای تعدیل خطاهای محیطی جوی (اثر تروپسفر) طراحی کرد. ورودی این نرم‌افزار، فایل‌های مشاهده‌ای در قالب Rinex و خروجی آن، مختصات سه‌بعدی منحصربه‌فرد برای هر یک از نقاط شبکه در هر مرحله مشاهده‌ای است.

نتایج و بحث

برای تحلیل وضعیت منطقه، پرسشنامه‌ای به‌وسیلهٔ افراد بومی تهیه و نتایج به‌شکل نموداری ارائه شد. با استفاده از این نمودارها پوشش جنگل بر اساس سنجه‌های جهت شیب و زاویه شیب تحلیل شد. نتایج بیانگر رابطه معنادار میان جهت و زایه شیب و رخداد زمین‌لغزش بود (شکل ۶). بر این اساس، بیشتر پوشش‌های جنگلی در جهت‌های شمال تا شرق و زاویه با زاویه حداکثر ۵۰ درجه با زمین‌لغزش‌های منطقه مرتبط بودند. افزون بر این، بیشترین ژرفای زمین در دامنه شمال‌غربی منطقه ۵۰ سانتی‌متر بود.

بر اساس یافته‌های کیفی به‌دست آمده از پرسشنامه مشخص شد که تغییرات پوشش جنگلی در منطقه چاسرکا قابل‌توجه است (جدول ۱). در وضعیت قبل از رخداد زمین‌لغزش، بیشتر مساحت منطقه تحت پوشش جنگلی بود، اما در هنگام رخداد زمین‌لغزش، تغییرات چشمگیری در پوشش زمین رخ داد. بسیاری از کاربری‌های جنگلی به ترکیب‌هایی از جنگل و جاده تغییر یافتند و کاربری برخی دیگر به زمین بایر تبدیل شد. این تغییرات بیشتر به‌دلیل اثرات نابودگر زمین‌لغزش‌ها و نیاز به ایجاد زیرساخت‌های جدید برای دسترسی به مناطق آسیب‌دیده رخ داده است. پس از رخداد زمین‌لغزش، وضعیت پوشش زمین به‌طور قابل‌توجهی تغییرکرد و بخش گسترده‌ای از کاربری مناطق جنگلی به زمین‌های زراعی و جاده‌ها تغییر یافت. این موضوع سبب کاهش چشمگیر سطح پوشش جنگلی شد. این روند نشان‌دهنده فشارهای انسانی و نیاز به توسعه زیرساخت‌ها و فعالیت‌های اقتصادی در منطقه است. به‌طورکلی، این تغییرات هم سبب کاهش تنوع زیستی و هم سبب اثرات منفی بر بوم‌سازگان و پایداری آن در منطقه می‌شوند.



شکل ۶- وضعیت کاربری جنگل بر اساس جهت شیب و زاویه شیب (درجه) در منطقه.

Figure 6 - Forest use status based on slope direction and slope angle (degree) in the region.

جدول ۱- تغییرات کاربری جنگل در منطقه چاسرکا.

Table 1 - Forest use changes in the Chaserka Region.

Land-cove before slipping	Land-cove during slipping	Land-cove after slipping
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Forest, Road, S	Forest, Road, S, Bare
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Agricultural	Agricultural, Bare
Forest	Forest	Forest, Bare
Forest	Agricultural	Agricultural, Bare
Forest	Forest, Road	Bare
Forest	Forest	Forest, Bare
Forest	Road, Road	Forest, Road, Bare
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Forest, Agricultural, Road, Agricultural	Agricultural, Road, Bare

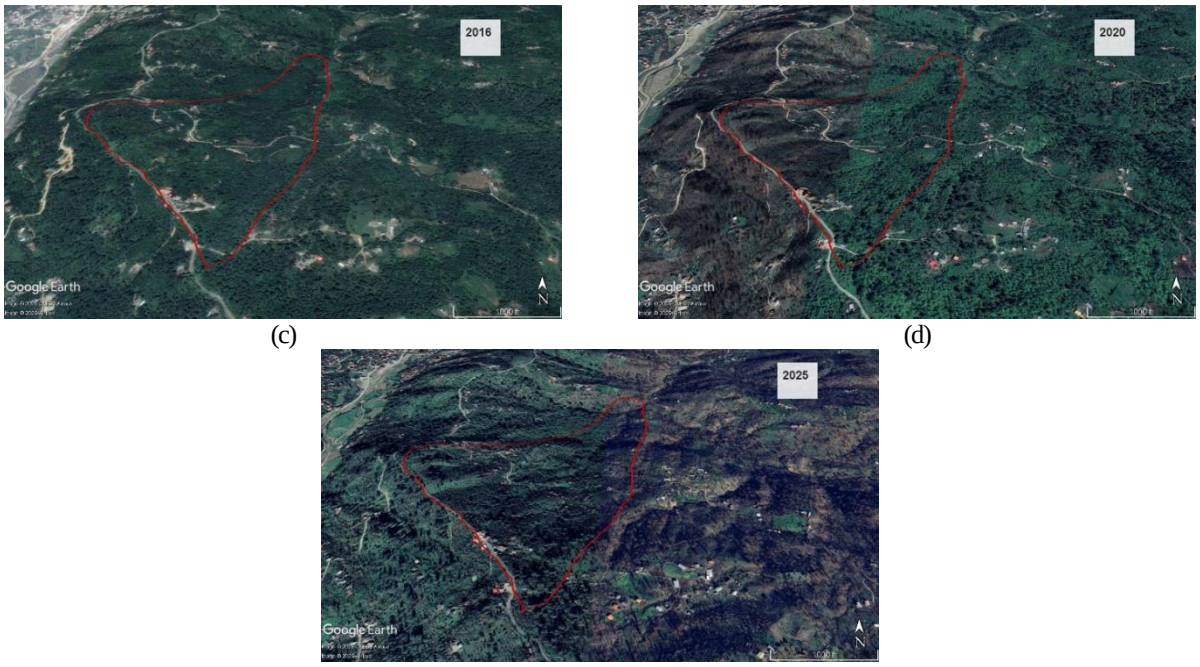
در چهار دهه پیشین، نتایج بررسی روند تغییرات پوشش زمین در منطقه کوهستانی چاسرکا بر پایه تحلیل داده‌های گوگل ارث و بررسی‌های میدانی، بیانگر تحول قابل‌توجهی در ساختار چشم‌انداز و الگوهای بهره‌برداری از زمین بود. در دهه ۱۳۶۰، پوشش بخش گسترده‌ای از منطقه طبیعی و بکر بود و دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی بیشتر پوشیده از جنگل‌های انبوه با درختان بومی (ممرز، راش، افرا و بلوط) بودند و در تثبیت شیب‌ها نقش مؤثری داشتند. در آن زمان، مراتع طبیعی در نواحی بلندتر و زمین‌های کشاورزی سنتی در مناطق پایین‌دست به‌طور محدود توسعه‌یافته بودند و ساخت و سازها بسیار پراکنده در قالب بافت‌های کوچک روستایی بودند. از سوی دیگر، تحلیل داده‌های دو دهه پیشین نشان‌دهنده روند افزایشی نابودی پوشش طبیعی و گسترش مداخلات انسانی بود. بارزترین تحولات شامل افزایش سطح ساخت و سازها، گسترش جاده‌های فرعی و مسیرهای دسترسی به درون شیب‌ها با هدف ویلاسازی و فعالیت‌های دامداری است که با حذف بخشی از پوشش جنگلی و خاک‌برداری در دامنه‌ها همراه بوده‌اند. افزون بر این، افزایش باغ‌های میوه در شیب‌های متوسط تا زیاد با ایجاد تراس‌های غیرمهندسی، تعادل طبیعی دامنه را مختل کرده‌اند. بخش بزرگی از زمین‌های مرتعی نیز نابودشده یا خارج از چارچوب غیرقانونی به باغ تغییر کاربری یافته‌اند. نتایج این تحلیل نشان داد در ۴۰ سال گذشته، وضعیت بوم‌شناختی منطقه چاسرکا از یک ساختار نسبتاً پایدار به یک ساختار نیمه‌مصنوعی تغییریافته است. این موضوع سبب افزایش قابل‌توجه خطر پدیده‌هایی مانند زمین‌لغزش شده است. نابودی پوشش گیاهی در شیب‌های ناپایدار، ایجاد مسیرهای دسترسی در بلندی‌ها و گسترش فعالیت‌های انسانی در نقاط حساس زمین‌ریخت‌شناختی، از مهم‌ترین عامل‌های تشدید ناپایداری زمین در این منطقه به‌شمار می‌آیند (شکل ۷).



(a)



(b)



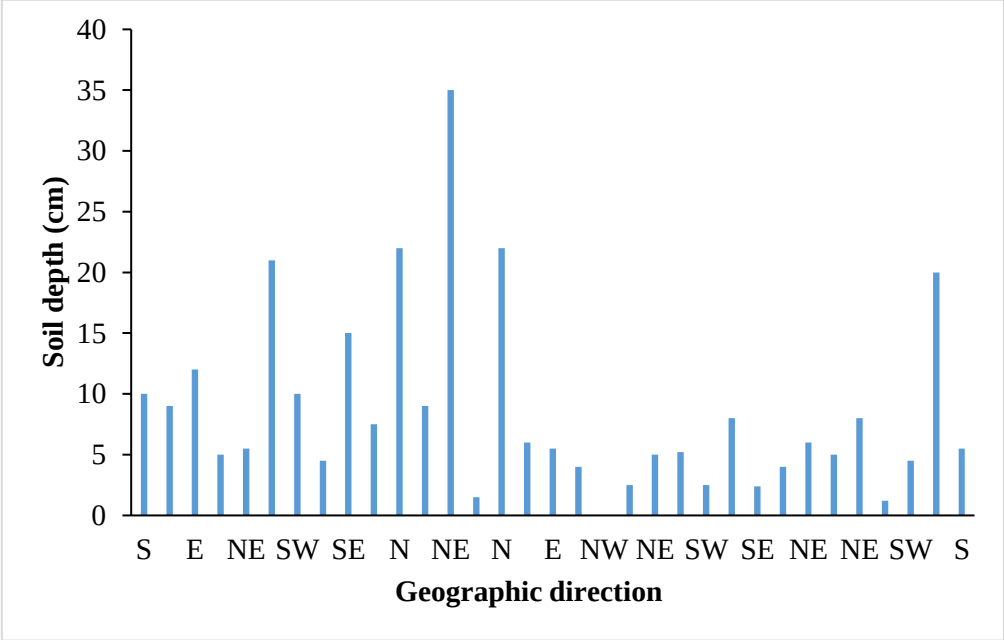
(c) (d)

(e)

شکل ۷- تغییرات منطقه چاسرکا در پنج سال: ۲۰۱۰ (الف)، ۲۰۱۳ (ب)، ۲۰۱۶ (پ)، ۲۰۲۰ (ت) و ۲۰۲۵ (ث).

Figure 7 - Changes in the Chaserka Region in the five years: 2010 (a), 2013 (b), 2016 (c), 2020 (d) and 2025 (e).

وضعیت ژرفای خاک منطقه چاسرکا در جهت‌های جغرافیایی مختلف در شکل ۸، نشان‌داده‌شده است. بر پایهٔ شکل ۸، بیشترین ژرفای خاک منطقه بر اساس بافت خاک ۳۵ سانتی‌متر و در جهت شمال‌شرقی و جنوب‌غربی منطقه چاسرکا بود. کمترین آن کمتر از پنج سانتی‌متر و در دامنه شمال‌غربی منطقه مشاهده شد.



شکل ۸- نتایج بررسی ژرفای خاک در جهت‌های جغرافیایی مختلف منطقه.

Figure 8 - Results of soil depth investigation in different geographical directions of the region.

در بررسی نقشه‌های شیب، جهت دامنه و زمین‌شناسی منطقه چاسرکا در سامانه GIS، مشاهده شد که بیشترین اندازهٔ لغزش‌های فعال و لغزش‌های قدیمی تثبیت‌شده مربوط به دامنه‌های شمال‌شرقی (NE)، شرقی (E) و شمال غربی (NW) است. به‌طورکلی، در منطقه چاسرکا، جهت دامنه یک عامل مهم اثرگذار بر رخداد لغزش زمین است. نقش و اثرگذاری آن بر ناپایداری شیب هم از دیدگاه هندسی (زاویه تابش، جریان سطحی و ساختار دامنه)، و هم از دیدگاه تعامل با اقلیم خزری و شرایط زمین‌شناسی حائز اهمیت است. بر این اساس، ترکیب جهت‌های شمال‌شرقی، شرقی و شمال‌غربی با شیب‌های متوسط تا زیاد (۴۵–۲۰٪) و سنگ‌شناسی‌های ناپایدار، زمینه‌ساز بیشترین لغزش‌های مشاهده‌شده در منطقه است.

پردازش و محاسبات سرشکنی شبکه زمین‌سنجی پایش زمین‌لغزش

نتایج به‌دست‌آمده از مختصات سرشکن‌شده به‌همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط مبناء در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در پنج مرحله مشاهده‌ای، نشان داد دامنه دقت ثبت تغییرات نرم‌افزار نامبرده از شش، یک، یک، دو و دو میلی‌متر برای مؤلفه مسطحاتی (بیضی خطا در سطح اطمینان ۹۵٪) و نُه، دو، دو، چهار و سه میلی‌متر (فاصله اطمینان ۹۵٪) برای مؤلفه بلندی نقاط است. نتایج این تغییرات در پنج مرحله مشاهده‌ای در جدول‌های ۲ تا ۶ نشان‌داده شده است.

جدول ۲- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به‌همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله اول مشاهده‌ای).

Table 2 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (first observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0031	0.002	-27	0.0062
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0014	0.001	-14	0.0035
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0062	0.0043	20	0.0093
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0000	0.0000	90	0.0000

جدول ۳- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله دوم مشاهده‌ای).

Table 3 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (second observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0006	0.0005	-4	0.0010
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0005	0.0004	-3	0.0008
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0007	0.0006	-4	0.0011
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0005	0.0004	-3	0.0008

جدول ۴- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله سوم مشاهده‌ای).

Table 4 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (third observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6725	4018830.3060	361.7858	0.0009	0.0008	-32	0.0016
R2	646731.9330	4018081.6031	378.3438	0.0009	0.0009	-47	0.0017
R3	647286.6762	4016927.6251	543.1991	0.0006	0.0006	-20	0.0012
R4	647722.2240	4017945.9785	350.6432	0.0008	0.0007	-8	0.0015

جدول ۵- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵ ٪ (مرحله چهارم مشاهده‌ای).

Table 5 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (fourth observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0019	0.0012	-27	0.0034
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0018	0.0013	-23	0.0033
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0015	0.0010	-24	0.0027
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0019	0.0012	-27	0.0034

جدول ۶- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵ ٪ (مرحله پنجم مشاهده‌ای).

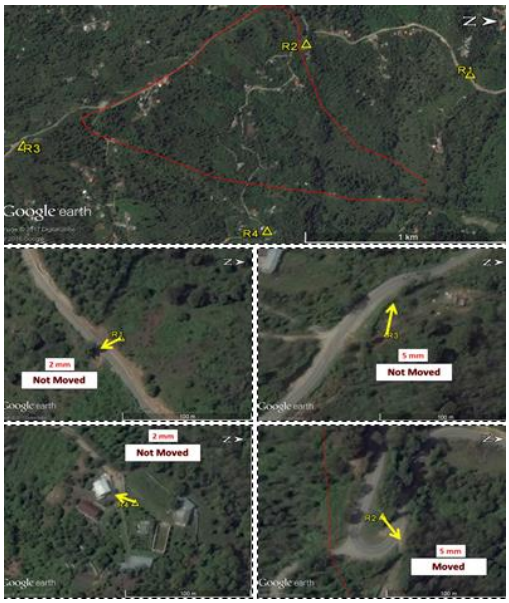
Table 6 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (fifth observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0014	0.0007	-2	0.0016
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0010	0.0005	-2	0.0012
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0020	0.0010	-2	0.0023
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0010	0.0005	-2	0.0012

رفتارسنجی جابجایی شبکه نقاط مبناء

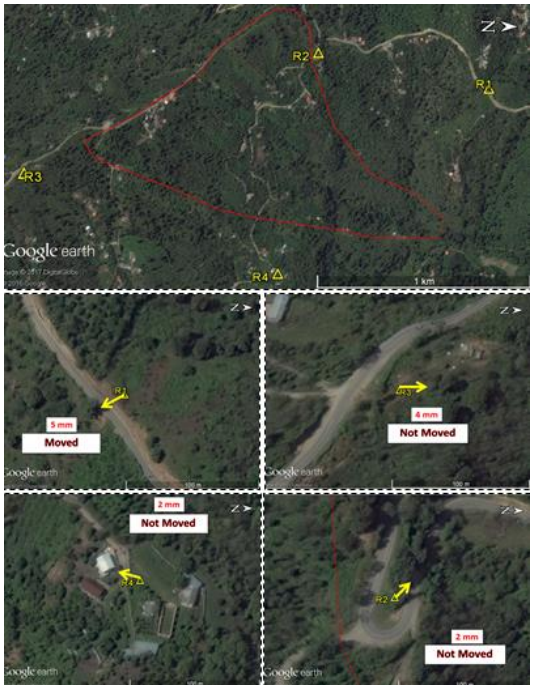
نتایج پردازش و سرشکنی شبکه نقاط مبناء در مراحل اول تا پنجم مشاهده‌ای با روش شبکه آزاد (Inner-Constraint)، با وجود ثبت جابجایی‌های نامحسوس مسطحاتی و بلندی، مؤید ثبات نسبی شبکه بود. نتایج به‌دست‌آمده از اختلاف موقعیت مراحل مشاهده‌ای اول تا پنجم شبکه نقاط مبناء در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه‌شده است و بردارهای جابجایی نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌داده شده است. نتایج جدول ۷، بیانگر الگوی حرکتی متفاوت داده‌های پایش چهار نقطه شاهد (R1 تا R4) در بازه زمانی ۱۰۶ روزه، در منطقه لغزشی، بود. به‌طوری که جابجایی بلندی نقطه R1 اندک و رو به پایین (۸- میلی‌متر) و جابجایی افقی آن نیز اندک (۲ میلی‌متر) بود اما این جابجایی‌ها از دیدگاه آماری معنادار نبودند. این یافته بیانگر آن است که احتمالاً حرکت این نقطه در این بازه از حداقل قابلیت تشخیص شبکه فراتر نرفته است. حرکت نقطه R2 برخلاف دیگر نقاط، در هر دو مؤلفه از دیدگاه آماری معنادار بود. جابجایی افقی این نقطه با دقت اندازه‌گیری زیاد (بیضی خطای کوچک و خطای بلندی ۴ میلی‌متر) همراه با فرازش قابل‌توجهی (۱۷+ میلی‌متر) ۵ میلی‌متر بود که آن را به شاخص اصلی حرکت فعال تبدیل کرد. برای نقطه R3 اگرچه جابجایی‌هایی به اندازه ۵ میلی‌متر در مؤلفه افقی و ۶- میلی‌متر در مؤلفه قائم برآورد شد، اما داده‌های آن به‌دلیل دقت بسیارکم (بزرگ‌ترین بیضی خطا با ابعاد ۹ و ۷ میلی‌متر و خطای بلندی ۱۴ میلی‌متر) از دیدگاه آماری قابل اطمینان نبود و بر اساس آن‌ها نمی‌توان وجود حرکت قطعی را تأیید کرد. سرانجام، نقطه R4 مشابه R1، بدون حرکت معنادار و جابجایی‌های اندک ثبت‌شدهٔ آن در محدوده خطای اندازه‌گیری بود. در مجموع، از میان چهار نقطه پایش‌شده، فقط نقطه R2 به‌عنوان شاخص قابل‌اتکای حرکت فعال زمین‌لغزه در بازه ۱۰۶ روزه، شناسایی شد. این یافته بیانگر فعال بودن فقط یک بخش خاص از لغزش یا متفاوت بودن نرخ حرکت در زیر بخش‌های مختلف آن است. داده‌های نقاط دیگر، یا حرکت معناداری را نشان ندادند (R1 و R4) و یا به‌دلیل خطای زیاد نامعتبر بودند (R3). بر اساس نتایج پایش زمین‌سنجی در بازه ۱۱۱ روزه مراحل چهارم و پنجم (جدول ۸) مشخص شد که نقطهٔ R1 با ثبت یک جابجایی افقی معنادار (۵ میلی‌متر) و مؤلفهٔ عمودی بدون جابجایی معنادار، نشان‌دهندهٔ یک سازوکار حرکتی غالباً انتقالی در آن بخش از دامنه است. از سوی دیگر، نقطهٔ R3 یک رفتار کاملاً متفاوت را با رخداد یک فرونشست قائم معنادار (۱۳- میلی‌متر) و بدون حرکت افقی معنادار نشان داد که می‌تواند به‌دلیل سازوکار چرخشی یا فرآیند تراکم و تحکیم درونی توده باشد. دو نقطهٔ R2 و R4 بدون هرگونه جابجایی معنادار در هر دو مؤلفه نشان‌دهندهٔ وضعیت پایدار یا نرخ تغییر شکل بسیار ناچیز در آن بخش‌ها در این بازهٔ

زمانی بودند. این پراکندگی مکانی در الگوهای حرکت (انتقالی محض در R1، قائم محض در R3 و سکون در R2 و R4) به‌خوبی مؤید ناهمگن بودن رفتار پویایی تودهٔ لغزشی و فعال بودن ترجیحی زیر بخش‌های خاصی از آن است. چنین مشاهده‌ای مؤید آن است که تفسیر نتایج پایش می‌بایست در مقیاس محلی انجام شود و نباید فقط بر میانگین‌گیری منطقه‌ای تأکید داشت. این موضوع برای مدل‌سازی صحیح خطر و تعیین مرزهای دقیق بخش‌های فعال زمین‌لغزش ضروری است. نمای کلی تغییرات در شکل ۱۱ نشان‌داده شده است.



شکل ۹- نمودار نقاط مبناء و بردار جابجایی (جهت و اندازه) میان سه مرحله اول مشاهده‌ها روی تصویر هوایی.

Figure 9- Diagram of the reference points and the displacement vector (direction and magnitude) between the first three stages of observations on the aerial image.



شکل ۱۰- نمودار نقاط مبناء و بردار جابجایی (جهت و اندازه) میان مرحله چهارم و پنجم مشاهده‌ها روی تصویر هوایی.

Figure 10 - Diagram of the reference points and the displacement vector (direction and magnitude) of the boundary between the fourth and fifth stages of observations on the aerial image.

جدول ۷- اندازه‌های جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی به‌همراه ابعاد بیضی خطای نسبی جابجایی و خطای تعیین جابجایی بلندی شبکه نقاط شاهد منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۰۶ روزه.

Table 7 - The values of planar and elevational displacements along with the ellipse dimensions, relative displacement error and elevational displacement determination error of the network of witness points of the landslide area at the surface and the 95% confidence interval in the 106-day period.

Base points	Δx (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	b (mm)	Horizontal Status	Δz (mm)	$Sd.\Delta z$ (mm)	Vertical Status
R1	1	-2	2	149	3	1	N	-8	10	N
R2	4	3	5	52	2	1	Y	17	4	Y
R3	-5	0	5	275	9	7	N	-6	14	N
R4	0	-2	2	193	2	1	N	-3	3	N

* Y : نشان‌دهندهٔ حرکت نقطه است. * N : نشان‌دهندهٔ عدم حرکت نقطه است.

* Y = Point analyzed as moving. * N = Point analyzed as non-moving.

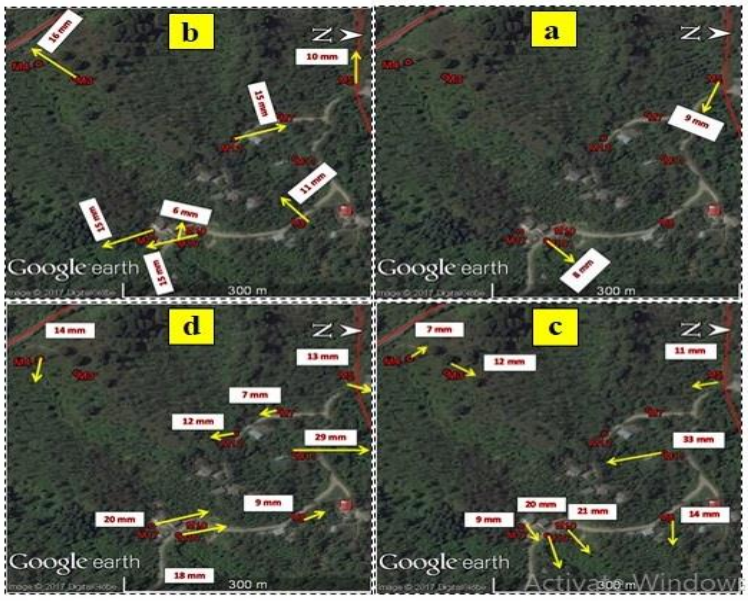
جدول ۸- اندازه‌های جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی به‌همراه ابعاد بیضی خطای نسبی جابجایی و خطای تعیین جابجایی بلندی شبکه نقاط شاهد منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۱۱ روزه مرحله چهارم و پنجم مشاهده‌ها.

Table 8 - The values of planar and elevational displacements along with the ellipse dimensions, relative displacement error and elevational displacement determination error of the network of witness points of the landslide area at the surface and the 95% confidence interval in the 111-day period of the fourth and fifth observation stages.

Base points	Δx (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	b (mm)	Horizontal Status	Δz (mm)	$Sd.\Delta z$ (mm)	Vertical Status
R1	3	-4	5	147	2	1	Y	6	6	N
R2	-2	2	3	317	3	1	N	3	5	N
R3	0	4	4	0	4	2	N	-13	5	Y
R4	-1	-2	2	192	2	1	N	3	6	N

* **Y** به‌منزله تحلیل به حرکت نقطه می‌باشد. * **N** به‌منزله تحلیل به عدم حرکت نقطه می‌باشد.

* Y = Point analyzed as moving. * N = Point analyzed as non-moving.



شکل ۱۱- بزرگنمایی‌شده از جهت و اندازه بردار جابجایی مسطحاتی شبکه نقاط شاهد در بخش الف) جابجایی میان مرحله اول و دوم؛ ب) جابجایی میان مرحله دوم و سوم؛ ج) جابجایی میان مرحله سوم و چهارم؛ د) جابجایی میان مرحله چهارم و پنجم.

Figure 11 - Enlarged view of the direction and magnitude of the planar displacement vector of the control grid points in sectiona) Displacement of the first and second stage boundary; b) Displacement of the second and third stage boundary; c) Displacement of the third and fourth stage boundary; d) Displacement of the fourth and fifth stage boundary.

یافته‌های این پژوهش نشان داد زمین‌لغزش‌های آبخیز چاسرکا نتیجه یک فرآیند تدریجی، پویا و چندعاملی است که در آن، عامل‌های طبیعی زمینه‌ساز اولیه هستند، اما مداخلات انسانی عامل بسیارمهم و فعال‌کننده ناپایداری شیب است. در این راستا، نتایج این پژوهش با یافته‌های لی و همکاران (۲۰۲۰) و آلکانتارا-آیالا (۲۰۲۵) مبنی بر اینکه فعالیت‌های انسانی نیز مانند تغییرات اقلیمی، گسترش شهری و جنگل‌زدایی سبب رخداد مکرر زمین‌لغزش‌ها می‌شوند، هم‌راستا است. برای مدیریت این پدیده، تعیین اثر این فعالیت‌ها بر احتمال رخداد زمین‌لغزش ضروری است. این موضوع را می‌توان در سه سطح تحلیل کرد: (۱) زمینه‌های زمین‌ریخت‌شناختی و اقلیمی، (۲) نابودی ساختار بوم‌شناختی در چهار دهه گذشته و (۳) پویایی حرکتی شیب‌ها که با رفتارسنجی زمین‌سنجی تأییدشده است.

تحلیل‌ها نشان داد بیشترین اندازهٔ لغزش‌های فعال و قدیمی مربوط به دامنه‌های شمال‌شرقی، شرقی و شمال‌غربی در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵ ٪ و سنگ‌شناسی ناپایدار (مارن، شیل و رس‌های نئوژن) است. شریفی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل تحلیل شبکه در شهرستان نور دریافتند بیشترین اندازهٔ زمین‌لغزش در این شهرستان مربوط به بخش‌های شمال، شمال‌غربی و شمال‌شرقی است که با نتایج این پژوهش مبنی بر تأیید جهت‌های منطقه بر رخداد زمین‌لغزش، هم‌راستا است. افزون بر این، داده‌های آبی-اقلیمی بیانگر آن است که بیشترین فراوانی لغزش‌ها مربوط به مناطقی با بارش سالانه ۸۵۰ میلی‌متر و ژرفای خاک ۵۰ سانتی‌متر است. این شرایط، هرچند برای رخداد لغزش لازم هستند، اما کافی نیستند؛ زیرا در دهه ۱۳۶۰، این شرایط هم بود، ولی لغزش‌ها به‌شکل گسترده نبودند. در پژوهشی شریفی‌پیچون و همکاران (۲۰۲۲) دریافتند در میان عامل‌های طبیعی، بیشترین نقش در رخداد زمین‌لغزش‌های آبخیز وهرگان در پیشکوه‌های زاگرس مربوط به عامل سنگ‌شناسی و بارش به‌ترتیب با ضریب تأثیر ۰/۳۶۲ و ۰/۲۹۹ بود که با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. در سطح دوم، تحلیل تغییرات پوشش زمین در طول ۴۰ سال گذشته بیانگر شواهدی بر نابودی سامانه تثبیت‌کننده طبیعی بود. در گذشته، دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی منطقه پوشیده از جنگل‌های بکر با درختان بومی (راش، ممرز، بلوط و افرا) بودند که همراه با ریشه‌های ژرف، سبب پایداری خاک در برابر فرسایش و لغزش شده بودند؛ اما در دو دهه پیشین، بخش گسترده‌ای از این پوشش جنگلی بر اساس نتایج جدول ۱، به‌شکل نظام‌مند به جاده، زراعت و ساخت و ساز ویلایی تبدیل‌شده است. این تغییرات هم پوشش گیاهی را نابود کرده و هم با ایجاد برش‌های مصنوعی در شیب، تراس‌های غیرمهندسی و مسیرهای دسترسی در بلندی‌ها، تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی شیب‌ها را به‌شدت مختل کرده‌اند.

نتایج بررسی‌های بورنانه و بوهدا (۲۰۲۱) و پاچکوکِودو و همکاران (۲۰۲۳) نیز مبنی بر اثر تغییر کاربری زمین بر افزایش تعداد و شدت زمین‌لغزش‌ها با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. بر اساس داده‌های میدانی، در ۶۲/۷٪ موارد، فعالیت‌های انسانی پیش از رخداد لغزش اجرایی‌شده‌اند که این یافته نشان‌دهنده رابطه علّی مستقیم میان مداخله انسان و فعال‌سازی لغزش‌ها است. در سطح سوم، نتایج پایش زمین‌سنجی با استفاده از شبکه نقاط مبناء و نرم‌افزار Leica Geo Office، نشان‌دهندهٔ جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی در حد چند میلی‌متر بود (جدول‌های ۲ تا ۶)، اما الگوی این جابجایی‌ها به‌ویژه در بازه‌های بارانی نشان‌دهنده فرآیند تدریجی ناپایداری بود. بر اساس نتایج جدول‌های ۷ و ۸، جابجایی‌های برخی نقاط (مانند R2 و R3) در بازه‌های مشاهده‌ای ۱۰۶ و ۱۱۱ روزه، در جهت‌های خاصی (مثلاً زاویه ۵۲ یا ۰°) معنادار بود که با جهت غالب لغزش‌های منطقه (شمال تا شرق) همخوانی داشت. این یافته بسیار با اهمیت، بیانگر آن است که زمین‌لغزش‌ها در چاسرکا رویدادهای ناگهانی نیستند، بلکه نتیجه نابودی تدریجی مقاومت برشی خاک هستند که سرانجام به شکست ناگهانی منجر می‌شود. ازاین‌رو، زنجیره علّی-معلولی به‌شکل زیر تبیین می‌شود:

نابودی پوشش جنگلی ⟶ کاهش مقاومت برشی + افزایش نفوذ آب ⟶ جابجایی تدریجی جرم ⟶ شکست ناگهانی شیب.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش به‌خوبی نشان داد که رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه چاسرکا در شهرستان بابل تابع الگوهای مکانی-زمانی خاصی است. تحلیل‌ها نشان‌دهندهٔ بیشترین فعالیت‌های زمین‌لغزشی در جهت‌های شمال‌شرقی تا شمال‌غربی و در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵٪ بودند. افزون بر این، نتایج این پژوهش مؤید وجود یک الگوی تدریجی از ناپایداری قبل از رخداد شکست ناگهانی است. با تبدیل‌شدن جنگل‌ها به زمین‌های زراعی و ساخت و ساز، گستردگی پوشش گیاهی کاهش‌یافته است و به‌دنبال آن برش‌های مصنوعی در شیب‌ها سبب اختلال تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی شده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پهنه‌های پرخطر تحت نظارت نهادهای مسئول و در چارچوب قانونی، ممنوعیت ساخت و ساز، اجرا شود. همچنین پیشنهاد می‌شود احیای پوشش گیاهی بومی و عملیات مهندسی تثبیت شیب‌ها با مشارکت سازمان‌های محیط‌زیست و منابع‌طبیعی انجام شود. پایش بلندمدت (بیش از دو سال) در پژوهش‌های آتی برای تحلیل رفتار بلندمدت توده زمین‌لغزش و توسعه سامانه هشدار زودهنگام بسیار ارزشمند است. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود با توجه به افزایش بارش‌های حدی در اثر تغییرات اقلیمی در شمال ایران، ضروری است مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی برای مدیریت آب و خاک در برنامه‌ریزی منطقه‌ای لحاظ شوند و در راستای آن آموزش‌های لازم برای جوامع محلی به‌منظور افزایش آمادگی در برابر زمین‌لغزش ارائه شود. با اجرای این مجموعه اقدامات می‌توان به‌طور اثرگذاری خطرپذیری منطقه را کاهش داد و سبب ارتقای ایمنی ساکنان شد. در پایان پیشنهاد می‌شود که در بررسی‌ها و پژوهش‌های آینده از تعداد و تراکم بیشتری از نقاط شبکه زمین‌سنجی استفاده شود تا دقت و صحت نتایج افزایش یابد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: مفهوم‌سازی، بررسی نتایج

نویسندهٔ سوم: مفهوم‌سازی، بررسی نتایج

نویسندهٔ چهارم: مفهوم‌سازی، ویرایش، بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

Alcántara-Ayala I. 2025. Landslides in a changing world. Landslides. pp. 1-15.

Bourenane H, Bouhadad Y. 2021. Impact of land use changes on landslides occurrence in urban area: the case of the Constantine City (NE Algeria). Geotechnical and Geological Engineering. 39(6): 1-21. doi.org/10.1007/s10706-021-01768-1

Darvishi R, Jafarian Y, Lashgari A. 2025. Fragility analysis of buried pipelines subjected to seismic landslides in Iran. Journal of Earthquake Engineering. 29(9): 1820-1838. doi.org/10.1080/13632469.2025.2496653

Dastranj A, Noor H. 2021. Comparative evaluation of landslide susceptibility map using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy methods. Journal of RS and GIS for Natural Resources. 12(3): 62-81. (In Persian).

Ehsan M, Anees MT, Bakar AFB.A, Ahmed A. 2025. A review of geological and triggering factors influencing landslide susceptibility: artificial intelligence-based trends in mapping and prediction. International Journal of

Environmental Science and Technology. 22(16): 17347-17382. doi.org/10.1007/s13762-025-06741-6

Guo X, Guo Q, Feng Z. 2021. Detecting the vegetation change related to the creep of 2018. Baige landslide in Jinsha River, SE Tibet using SPOT data. Front. Earth Science. 9: 706998. doi.org/10.3389/feart.2021.706998

Joybari J, Kavian A, Mosaffaei J. 2016. The effect of precipitation characteristics on spatial and temporal variations of Tavan Landslide Movement. Journal of Geography and Environmental Hazards. 4(4): 75-86. (In Persian).

Kavian A, Rezaei M, Shahedi K, Hadian Amri MA. 2021. Evaluation of random forest method in landslide susceptibility mapping in Sadat Mahalleh Watershed of Sari. Watershed Management Research. 34(1): 74-92. (In Persian).

Lang A, Moya J, Corominas J, Schrott L, Dikau R. 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. Geomorphology. 30(1-2): 33-52.

Li Y, Wang X, Mao H. 2020. Influence of human activity on landslide susceptibility development in the Three Gorges area. Natural Hazards. 104(3): 2115-2151. doi.org/10.1007/s11069-020-04264-6

Mehrpouya MR. 2024. Using the TRIGRS program in the analysis of landslide probability (Case study: Chakrod Watershed, Gilan). Journal of Range and Watershed Management. 77(4): 471-489. (In Persian). doi: 10.22059/jrwm.2024.377135.1767

Mineo S, Caliò D, Intelisano M, Pappalardo G. 2025. Landslide studying and monitoring by combining digital models from aerial visible and infrared photogrammetry. Landslides. 22(6): 1789-1804. doi.org/10.1007/s10346-025-02481-3

Mousavi SZ, Kavian A, Soleimani K, Mousavi SR, Shirzadi A. 2011. GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2(1): 33-50. doi.org/10.1080/19475705.2010.532975

Nazari H, Ritz J, Avagyan A. 2021. Morphotectonics and Slip rate of the Khazar fault in Central Alborz, (North of Iran). Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 31(2): 101-110. (In Persian). doi: 10.22071/gsj.2021.259868.1863

Pacheco Quevedo R, Velastegui-Montoya A, Montalván-Burbano N, Morante-Carballo F, Korup O, Daleles Rennó C. 2023. Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review. Landslides. 20(5): 967-982. doi.org/10.1007/s10346-022-02020-4

Pánek T, Šilhán K, Tábořík P, Hradecký J, Smolková V, Lenart J, Pazdur A. 2011. Catastrophic slope failure and its origins: Case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic). Geomorphology. 130(3-4): 352-364. doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.020

Razavizadeh S, Solaimani K, Massironi M, Kavian A. 2017. Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: A case study in northern Iran. Environmental Earth Sciences. 76(14): 1-16. doi.org/10.1007/s12665-017-6839-7

SalehiPour Milani A, Yamani M. 2018. Landslide hazard zoning in Ramian Basin (Golestan Provinces). Disaster Prevention Management of Knowledge. 8(2):161-172. (In Persian). doi: 20.1001.1.23225955.1397.8.2.5.9

Sathyanarayanan S, Tantri BR. 2024. Confusion matrix-based performance evaluation metrics. African Journal of Biomedical Research. 27(4S): 4023-4031. doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.4345

Shabani E, Javadi MR, Zare Khosh Eghbal M. 2015. Landslide hazard zonation using information value and analytical hierarchy process (AHP) methods (A case study: Shalmanrood Watershed). Journal Watershed Management Resource. 5(10): 157-169. (In Persian).

Shafiee kigasari N, Hosseinim AO, Pourghasemi HR. 2024. Spatial assessment of the sensitivity of landslide occurrence and their correlation with the forest road network (Case study: Ramsar County). Journal Watershed Management Resource. 15(1): 63-77. (In Persian).

Sharifi Paichoon M, Shirani K, Shirani M. 2021. Prioritization of factors affecting the occurrence of landslides and zoning its sensitivity using multiple linear regression case study: Vahargan Catchment-west of Isfahan Province. Journal of Hydrogeomorphology. 8(26): 163-139. (In Persian).

Sharifi H, Ramazanipore M, Ebrahimi L, Haghzad A. 2022. Landslide hazard zoning of Noor City using network analysis model. Economic Geography Research. 2(6): 40-55. (In Persian).

Sharifi H, Ramazanipore M, Ebrahimi L, Haghzad A. 2022. Landslide hazard zoning of Noor city using network analysis model. Economic Geography Research. 2(6): 40-55. (In Persian).

approach and GIS in Neka Watershed. Water and Soil Management and Modelling. 1(1): 67-80. (In Persian). doi: 10.22098/mmws.2021.1183

Zhang R, Chen S. 2025. Spatiotemporal analysis, simulation, and early warning of landslides based on landslide sensitivity and multisource precipitation products in Southwestern China. Landslides. 22(5): 1413-1434. doi.org/10.1007/s10346-024-02437-z

Zhu Q, Zeng H, Ding Y. 2019. A review of major potential landslide hazards analysis. Acta Geodaetica Cartogr. Sinica. 48: 1551–1561 .

Zhu Z, Li Q, Zhao L, Huang D, Wu Q, Zuo S. 2025. Whole-process survey of a landslide based on UAV tilt photography and 3D reconstruction and spatial analysis techniques. Landslides. 22(2): 485-497. doi.org/10.1007/s10346-024-02396-5

Wang H, Guo Q, Ge X, Tong L. 2022. A spatio-temporal monitoring method based on multi-source remote sensing data applied to the case of the Temi landslide. Land. 11(8): 1-19. doi.org/10.3390/land11081367

Xu X, Shang M, Deng Y. 2014. Analysis about the classification of landslide monitoring method. Appl. Mech. Mater. 638, 360–364.

Yordanov V, Biagi L, Truong XQ, Tran VA, Brovelli MA. 2021. An overview of geoinformatics state-of-the-art techniques for landslide monitoring and mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 46: 205-212. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W2-2021-205-2021

Zali M, Shahedi K. 2021. Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Spatial-Temporal Behavior Analysis of the Chaserka Babol Landslide by Combining Field Data and Remote Sensing

Reza Ali Rahimi Talarposhti[1]*, Ghorban Vahabzadeh [2], Ataollah Kavian[3], Seyed Ramezan Mousavi [3]

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

2 and 3- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

4- Assistant Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Landslides, as one of the most destructive geomorphological phenomena, cause huge loss of life and property every year in different regions of Iran. Landslides are a type of slope movement is mostly influenced by natural factors such as earthquakes, heavy rainfall, and erosion, but is exacerbated by human interventions such as substandard construction, road construction, and changes in runoff patterns. The mountainous regions and steep slopes of the country, especially the northern regions, are the main focus of this phenomenon due to sensitive lithological and geological conditions. The consequences of landslides are not limited to the destruction of homes and vital arteries, but also lead to the blockage of transportation routes, damage to agricultural lands, and human casualties. By combining remote sensing methods and field studies, it is possible to provide more accurate monitoring and assessment of landslides. Geotechnical and geomorphological analyses play a significant role in identifying susceptible areas and managing the risk of this natural hazard. Therefore, studying and identifying unstable zones and analyzing the factors that inhibit this phenomenon is a fundamental step in risk reduction and crisis management. For this reason, this study aimed to assess the spatio-temporal behavior of the landslide mass in Chaserka, Babol.

Materials and Methods

In the first stage, to examine the history and identify the Chaserka landslide mass, historical images from Google Earth were used between 1981 and 2004, and five years, 2010, 2013, 2016, 2020, and 2025, were selected as samples.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** ataollah.kavian@gmail.com

Citation: Rahimi Talarposhti, R.A., Vahabzadeh, Gh., Kavian, A., Mousavi, S.R. 2026. Spatial-temporal Behavior Analysis of the Chaserka Babol Landslide by Combining Field Data and Remote Sensing. Watershed Management Research. 39(3): 1-21.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.371320.1643

Received: 06 November 2025, **Received in revised form:** 04 January 2026, **Accepted:** 19 March 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 1-21.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

In this study, landslide behavior measurement networks with four reference points and 22 displacement monitoring points were designed and created. In addition, orthorectified aerial photographs were examined in different periods and their change trends were compared. For data processing and landslide monitoring geodetic network calculations, Leica Geo Office version 7 commercial software was used, and the model accuracy and overall accuracy were evaluated.

Results and Discussion

The results of this study indicate the combined role of natural factors and human interventions in the occurrence of landslides in the Chaserka region. The analyses indicate that natural factors such as slope, direction of the slope, and geological features (marl, shale, and Neogene clays) were the factors that caused the occurrence of landslides, but human interventions, especially the destruction of forest cover, non-engineering constructions, and land cover changes in previous decades, were the main factors in the instability of slope and the intensification of the risk of landslide. The highest incidence of landslides was observed in the northeast, east, and northwest directions on slopes of 25 to 45 percent and in areas with soil depths less than 50 cm. Changes in land cover in the last 40 years from virgin forests to roads and agricultural lands, in addition to reducing vegetation cover, have disrupted the hydrogeochemical balance of slopes and increased the risk of landslides. Therefore, the results of geodetic monitoring indicate gradual and continuous changes in the movement of the landslide masses. The changes recorded in five observational stages indicate that landslides in Chaserka are gradual and dynamic processes that ultimately lead to sudden failure. The analyses showed that significant displacements at some points (such as R2 and R3) were highly consistent with the dominant direction of landslides in the region, and this finding indicates the occurrence of gradual changes in the soil shear strength that ultimately cause slope failure. Overall, the results of this study emphasize the importance of comprehensive analysis of climatic, geomorphological, and human changes in landslide risk management. Based on the results of this research, to prevent landslides, appropriate planning should be carried out to control land cover changes and preserve vegetation in sensitive areas.

Conclusion and Suggestions

The findings of the monitoring and behavior analysis of the Chaserka landslide mass indicate that gradual deformations before sudden rupture are the main factor in the instability of this mass. Therefore, based on the results of this study, it is recommended to establish a permanent monitoring system based on remote sensing data and accurate measurement of displacements to develop a landslide early warning system. In addition, considering the role and importance of vegetation in modulating the hydrological and structural conditions of the slope, targeted vegetation restoration using native species is suggested as a complementary solution in managing landslide stability. Also, considering the characteristics of extreme precipitation (type and intensity) due to climate change in northern Iran, continued long-term monitoring is recommended to analyze landslide mass behavior in response to hydro-climatic stimuli in other similar watersheds in the country.

Keywords: Landslide, monitoring, slope failure, slope stability, spatio-temporal analysis

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest
The authors of this article declare that they have no conflicts of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement
The data and results used in this research will be made available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution
Author 1: Software/statistical analyses, writing the first draft of the article
Author 2: Conceptualization, review of results
Author 3: Conceptualization, review of results
Author 4: Conceptualization, editing, revision of the text

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در آبخیز قره‌سو استان گلستان

کورش شیرانی*[۱]، محمدعلی صدری[۲]

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

۲- کارشناس‌ارشد دانشگاه آزاد اسلامی لنجان اصفهان، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

سیل یکی از ویرانگرترین بلاهای طبیعی با پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. ازاین‌رو، روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی و پیش‌بینی آن توسعه‌داده شده‌اند. هدف این پژوهش، پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل با استفاده از سه مدل یادگیری عمیق شامل مدل‌های شبکه عصبی بازگشتی واحد دروازه‌دار (GRU)، حافظه کوتاه-بلندمدت (LSTM) و شبکه‌های پیچشی زمانی (TCN) و معرفی مناسب‌ترین آن‌ها در آبخیز قره‌سو استان گلستان بود. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش مقایسه نتایج آن با نتایج دیگر پژوهش‌های مرتبط با پهنه‌بندی خطرها در داخل کشور، به‌کارگیری مدل‌های جدید یادگیری عمیق و درنظرگرفتن بیشترین عامل‌های سیل‌خیزی برای تعیین کارآمدترین مدل و افزایش دقت نقشه‌های پیش‌بینی رخداد سیل بود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهشی آبخیز قره‌سو گرگان انتخاب شد. سپس، نقشه‌های عامل‌های مؤثر جمع‌آوری و آماده‌سازی شد. در این پژوهش ۱۶ عامل به‌عنوان متغیرهای مستقل و اطلاعات دریافت‌شده از سازمان مدیریت منابع آب وزارت نیرو و بازدیدهای میدانی به‌عنوان متغیر وابسته، انتخاب شدند. سپس، نقشهٔ پراکنش رخداد سیل تهیه شد. برای مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل، نقشه پراکنش رخداد سیل به دو دستهٔ نقاط آزمایشی (۳۰٪) و آموزشی (۷۰٪) تقسیم شد. پس از اجرای مدل‌های TCN، LSTM و GRU، نقشه‌های به‌دست آمده از پهنه‌بندی خطر رخداد سیل به پنج ردهٔ خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد طبقه‌بندی شدند. سرانجام، دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی ارزیابی، خطر رخداد سیل پیش‌بینی و مناسب‌ترین مدل انتخاب شد.

نوع مقاله: پژوهشی

***مسئول مکاتبات:** Kouroshshirani@gmail.com

استناد: شیرانی، ک.، صدری، م. ع. ۱۴۰۵. پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در آبخیز قره‌سو استان گلستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۴۴-۲۲.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2026.371561.1648

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۹، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۳۱، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۲۲ تا ۴۴.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان

نتایج و بحث

برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی رخداد سیل، داده‌های مکانی ۵۹ نقطه سیل (متغیر وابسته) بر اساس اطلاعات موجود و بررسی تصویرهای راداری در بازه زمانی قبل و بعد از سیلاب با استفاده نرم‌افزار گوگل‌ارث، جمع‌آوری شد. در هر یک از این نقاط رخداد سیل در دوره ۲۰ ساله (۱۴۰۳-۱۳۸۳) با ۱۰ بار تناوب رخداد سیل ثبت و گزارش‌شده بود. از این تعداد ۷۰٪ به‌عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰٪ به‌عنوان داده‌های آزمایشی به‌ترتیب برای اجرا و اعتبارسنجی مدل، به‌طور تصادفی انتخاب و تقسیم شدند. در مرحله بعد، از ۱۶ عامل در قالب گروه‌های محیطی، آب‌شناسی، پستی‌بلندی آبخیز به‌همراه داده‌های اقلیمی (به‌عنوان متغیر مستقل) و برای پهنه‌بندی و مدل‌سازی استفاده شد. دقت طبقه‌بندی مدل‌ها با استفاده از دو شاخص نسبت فراوانی (FR) و مساحت سلول هسته (SCAI) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بیشتر نقاط سیل در رده‌های پرخطر (زیاد و خیلی‌زیاد) بودند و بیشترین سهم از مساحت منطقه نیز مربوط به این پهنه‌ها بود. افزون بر این، بر اساس مساحت زیر منحنی‌های عملگر نسبی و هزینه مشخص شد کارآمدترین و مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین مدل در مقایسه با مدل‌های LSTM و GRU مدل TCN بود. در میان مدل‌های بررسی‌شده بیشترین و کمترین مساحت زیر منحنی‌های عملگر نسبی و هزینه مربوط به مدل TCN به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۰۸ بود. نتایج این پژوهش نشان داد بر پایهٔ مدل TCN، ۴۵٪ از مساحت منطقه در رده خطر خیلی‌زیاد در برگیرندهٔ ۸۳٪ از رخدادهای سیل بودند. همچنین، بر پایهٔ مدل LSTM، ۲۳٪ از مساحت منطقه در برگیرندهٔ ۶۰٪ از رخدادهای سیل و بر پایهٔ مدل GRU، ۱۰٪ از مساحت منطقه در برگیرندهٔ ۴٪ از رخدادهای سیل بودند. از نقشه‌های پهنه‌بندی خطر رخداد سیل به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت بحران ناشی از رخداد سیل، کاهش خطر سیل و مدیریت آن بهره برد. افزون بر این، بر اساس عملکرد عالی هر سه مدل TCN، LSTM و GRU، نتایج این پژوهش برای توسعه طرح‌های آتی سازمان‌های گوناگون و فعال در بسیاری از کشورهای در حال توسعه لازم و ضروری است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پس از اجرای هر سه مدل TCN، LSTM و GRU، نتایج شاخص AUC-ROC، در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان‌دهندهٔ عملکرد عالی مدل‌های نامبرده بود. نقشه‌های تهیه‌شده از پهنه‌بندی خطر رخداد سیل با کاربرد هر سه مدل، نشان‌دهنده دقت زیاد طبقه‌بندی پهنه‌ها و توزیع مناسب نقاط سیلابی در رده‌های زیاد و خیلی‌زیاد بود. برازش مدل TCN در پیش‌بینی رخداد سیل در مرحله آزمون در مقایسه با دو مدل دیگر، بهتر بود. ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد دو مدل TCN و LSTM با داشتن آستانه طبقات مناسب در طبقه‌بندی، اولویت کاربرد آنها برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل بیشتر است. سرانجام در این پژوهش، اندازه‌های شاخص مساحت زیر منحنی ارزش یا هزینه برای مدل‌های TCN، LSTM و GRU به‌ترتیب ۰/۰۸، ۰/۱۰ و ۰/۱۱ به‌دست آمد. پیشنهاد می‌شود بر اساس اهمیت ویژگی‌های ریخت‌سنجی در پهنه‌بندی نقشه‌های خطر رخداد سیل، در پژوهش‌های آینده از این سنجه‌ها همراه با دیگر سنجه‌های متداول در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شود. افزون بر این، بر پایهٔ نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود از روش‌های یادگیری عمیق و ترکیب آن با یکدیگر استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی نوین (هیبریدی) و بهینه‌سازهای مناسب در دیگر آبخیزهای استان گلستان، بررسی و ارزیابی شود.

واژگان کلیدی

پهنه‌بندی، پیش‌بینی، خطر، سیل، قره‌سو، مدل‌های یادگیری عمیق

مقدمه

سیل یکی از ویرانگرترین مخاطره‌های طبیعی است که سالانه خسارت‌های زیادی به جان انسان‌ها و اقتصاد جهانی وارد می‌آورد و برآورد شده بیش از یک سوم مساحت زمین در معرض خطر آن است (کانورتینو و همکاران ۲۰۱۹؛ پرادهان ۲۰۰۹؛ رزالیس و همکاران ۲۰۱۰). در بسیاری از مناطق جهان افزایش بلندی آب رودها و طغیان سیلاب‌ها، به‌ویژه در نتیجه تغییرات کاربری زمین و گسترش بی‌رویه سکونت‌گاه‌ها، موجب افزایش خطر سیلاب شده است (دالو و همکاران ۲۰۱۸).

ایران به‌دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بارش‌های رگباری شدید، شیب زیاد دامنه‌ها و نفوذناپذیری خاک‌ها، از جمله کشورهای آسیب‌پذیر رخداد سیل به‌شمار می‌آید (ملکیان و همکاران ۲۰۱۲). در استان گلستان نیز به‌واسطه رگبارهای کوتاه‌مدت و شدید، همواره پدیدهٔ سیلاب‌های ویران‌گر رخ‌داده است؛ به‌طوری که در دوره ۲۰۱۹-۱۹۹۱ بیش از ۱۳۴ رخداد سیل در این استان ثبت شد و خسارت‌های مالی قابل‌توجهی نیز گزارش شد (اداره کل منابع‌طبیعی و آبخیزداری استان گلستان ۲۰۱۸). برای کاهش خسارت‌های این پدیده، مدیریت جامع آبخیز و توسعه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل، اهمیت زیادی دارد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۶الف). با وجود پیچیدگی فرایندهای مؤثر بر رخداد سیل و کمبود داده‌های دقیق، پیش‌بینی قابل اطمینان این پدیده دشوار است. امروزه، کاربرد سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های داده‌محور برای تسریع تهیه نقشه‌های خطر افزایش‌یافته است. در سال‌های گذشته، روش‌های متنوعی برای پهنه‌بندی خطر سیل توسعه یافتـه‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به AHP (ناچاپا و همکاران ۲۰۲۰؛ دانو و همکاران ۲۰۱۹)، مدل نسبت فراوانی (چن و همکاران ۲۰۲۰؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۶ب)، مدل‌های احتمالاتی (شیرانی و صدری ۲۰۲۳؛ چن و همکاران ۲۰۱۹) و روش‌های یادگیری ماشین مانند RF، DT، SVM و ANN (وفاخواه و همکاران ۲۰۲۰؛ ان‌اچ‌یو و همکاران ۲۰۲۰؛ خسروی و همکاران ۲۰۱۹؛ چوبین و همکاران ۲۰۱۹؛ تهرانی و همکاران ۲۰۱۴؛ کیا و همکاران ۲۰۱۲؛ گبرهیوت و همکاران ۲۰۱۹)، اشاره کرد

کاربرد مدل‌های داده‌محور به‌دلیل برتری و توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی بدون نیاز به شبیه‌سازی فیزیکی، افزایش‌یافته است (موسوی و همکاران ۲۰۱۸). در این میان، کارایی مدل‌های یادگیری عمیق مانندRNN ، CNN، LSTM و GRU به‌دلیل توانایی استخراج خودکار ویژگی‌ها و تحلیل داده‌های سری زمانی، در مقایسه با روش‌های سنتی بیشتر است (کاور و همکاران ۲۰۲۶؛ صالح و همکاران ۲۰۲۵؛ بنتیواگلیو و همکاران ۲۰۲۲؛ لی‌کان و همکاران ۲۰۱۵؛ ابوآه و همکاران ۲۰۲۳؛ کراتزرت و همکاران ۲۰۱۹). همچنین، عملکرد مدل‌های LSTM، GRU و TCN در پژوهش‌های مرتبط با زمین‌لغزش نیز خوب گزارش‌شده است (بهرا و همکاران ۲۰۲۶؛ لی و همکاران ۲۰۲۵؛ ژاهو و همکاران ۲۰۲۲).

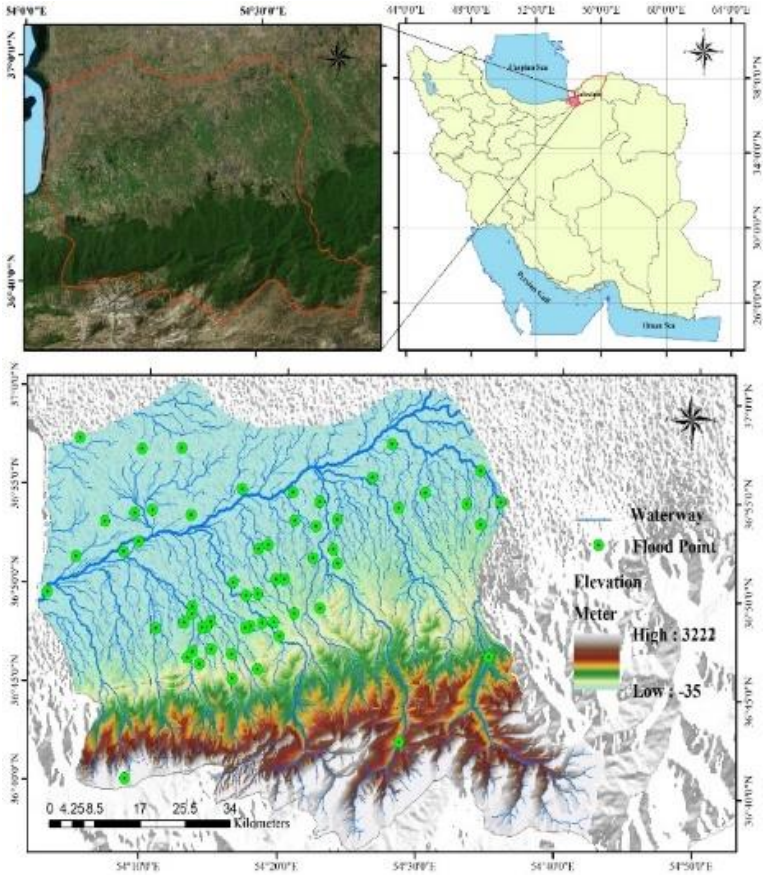
در این پژوهش، برای نخستین بار در استان گلستان، برای پهنه‌بندی خطر سیل سه مدل یادگیری عمیق LSTM، GRU وTCN، به‌طور هم‌زمان مقایسه شدند. با توجه به اهمیت انتخاب عامل‌های مؤثر که بسته به شرایط مکانی متفاوت هستند (کیا و همکاران ۲۰۱۲)، تعداد ۱۶ عامل مؤثر شامل متغیرهای زمین‌شناسی، آب‌شناختی، ریخت‌شناختی و اقلیمی انتخاب شدند. منطقه پژوهشی محدوده آبخیز قره‌سو در استان گلستان بود. هدف اصلی پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل‌های نامبرده و معرفی کارآمدترین مدل برای پیش‌بینی خطر سیل در آبخیز قره‌سو بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

استان گلستان با مساحت ۲۰۴۳۸ کیلومترمربع شامل ۵ آبخیز گرگان‌رود، اترک، قره‌سو، خلیج گرگان و نکارود بالادست می‌باشد که مجموعاً ۴۵ رشته رود به‌طول ۲۷۰۰ کیلومتر در آن امتداد دارد. میانگین سالانه بارندگی استان در شرایط عادی حدود ۴۵۰ میلی‌متر است. آبخیز قره‌سو در میان عرض‌های جغرافیایی ′۳۳ °۳۶ تا ′۰۰ °۳۷ شمالی و طول‌های

جغرافیایی ′۰۰ °۵۴ تا ′۴۵ °۵۴ شرقی است. این آبخیز با ۱۶۷۰ کیلومترمربع مساحت، دربرگیرندهٔ ۸٪ از مساحت کل استان گلستان است. آبخیز قره‌سو از شمال و شرق به آبخیز گرگان‌رود، از جنوب به آبخیز نکارود و از غرب به آبخیز خلیج گرگان و نیز دریاچهٔ بزرگ خزر محدود می‌شود و در روستای قره‌سو به این دریاچه تخلیه می‌شود (شکل۱). ۸٪ آب سطحی استان معادل با ۱۰۰ میلیون مترمکعب در این آبخیز جریان دارد. بخش بزرگی از جنوب آبخیز قره‌سو پوشیده‌شده از جنگل و شمال آن، دشت آبرفتی با کاربری زراعی و مسکونی است. بلندی‌های آبخیز از ۳۵- متر تا ۳۲۲۲ متر متغیر است. مناطق جنوبی به‌دلیل اختلاف زیاد در بلندی با دشت آبرفتی شمالی و بارندگی زیاد سبب روان شدن رودهای جنوبی-شمالی بسیار جوان و با انرژی فرسایندگی زیاد شده‌اند که این رودها پس از ملحق شدن به آبراههٔ اصلی آبخیز قره‌سو به‌سوی دریا روانه می‌شوند.



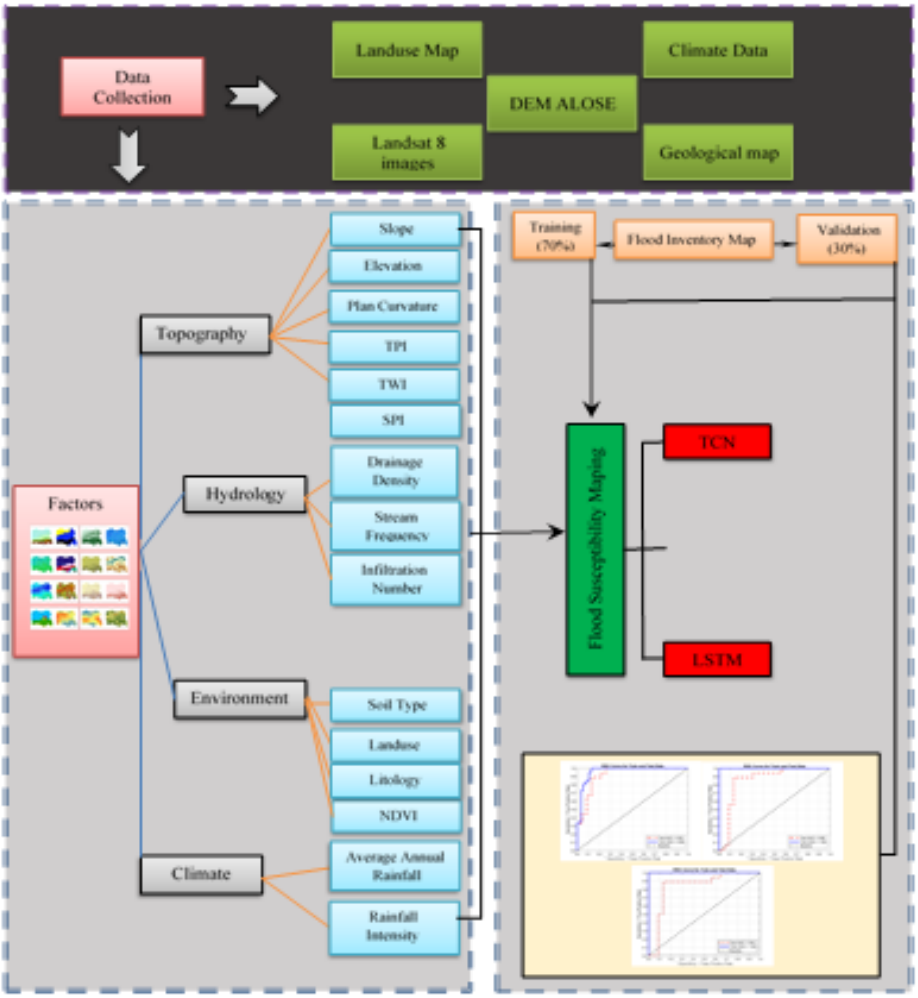
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز قره‌سو.

Figure 1- Geographical location of the Qarasu Watershed.

روش پژوهش

تهیه نقشه‌ها و پیش‌بینی خطر رخداد سیل در ۵ مرحله اصلی انجام شد (شکل ۲). در مرحله نخست منطقه پژوهشی انتخاب و نقشه‌های عامل‌های مؤثر جمع‌آوری و آماده‌سازی شد. در مرحله دوم تهیه نقشه پراکنش رخداد سیل، در مرحله سوم کمی‌کردن، وزن‌دهی عامل‌های مؤثر و آزمون استقلال داده‌ها، در مرحله چهارم اجرای مدل‌های LSTM، GRU و TCN، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر رخداد سیل و

طبقه‌بندی آنها به پنج رده خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد انجام شد. سرانجام در مرحله پنجم دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی ارزیابی شد و خطر رخداد سیل پیش‌بینی و مناسب‌ترین مدل معرفی شد.



شکل ۲- نمودار روش پژوهش.

Figure 2- Diagram of research method.

نقشه پراکنش رخداد سیل

در این پژوهش برای استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل از داده‌های مکانی و نقشه پراکنش سیل‌خیزی به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در راستای تهیه این نقشه، از اطلاعات سیل مدیریت منابع آب وزارت نیرو، بازدیدهای میدانی، ثبت مکانی نقاط سیل‌خیز به‌وسیلهٔ دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، نقشه به‌دست آمده از پردازش تصویرهای ماهواره‌ای در سال ۲۰۱۹ تهیه‌شده به‌وسیلهٔ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان گلستان، تصویرهای گوگل‌ارث برای رسم و تدقیق، بهره‌گیری شد. بر این اساس، تعداد ۵۹ نقطه سیلابی (سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۹۱) شناسایی و نقشه پراکنش مناطق رخداد سیل در منطقه پژوهشی، تهیه شد. نقاط سیلابی در قالب دو دسته آموزشی و آزمایشی به‌ترتیب با نسبت ۷۰٪ برای واسنجی (اجرا یا توسعه) و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی مدل‌ها به‌طور کاملاً تصادفی در محیط ArcGIS®10.5 تقسیم و انتخاب شدند.



شکل ۳- شواهدی از رخداد سیل در منطقه مطالعه‌شده (a) و (b) رود قره‌سو، (c) و (d) شهر گرگان.
Figure 3- Evidence of flooding in the study area (a) and (b) Qarasu River (c) and (d) Gorgan City.

جمع‌آوری اطلاعات و تهیه عامل‌های مؤثر بر سیل

عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل (داده‌های مستقل) صرف‌نظر از قابلیت اندازه‌گیری، از کل منطقه مطالعه‌شده جمع‌آوری و تهیه شدند. چندین سنجه ممکن است در رخداد سیل برای یک منطقه خاص موثر باشند، در حالی‌که این سنجه‌ها ممکن است برای محیط‌های دیگر اهمیت کمی داشته باشند. روش انتخاب دقیقی برای اینکه کدام سنجه باید در ارزیابی خطر سیل استفاده شود، وجود ندارد. با این حال، برخی از متغیرها بیشتر به‌وسیلهٔ محققین استفاده شده‌اند که بیانگر اهمیت و نقش مهم آنها در پژوهش‌های سیلاب است. در این پژوهش، بر اساس سابقه پژوهش‌های انجام‌شده (شیرانی و صدری ۲۰۲۳، رحمتی و همکاران ۲۰۱۶الف و ب، حقی‌زاده و همکاران ۲۰۱۷)، منابع موجود و تجارب متخصصان، ۱۶ عامل اثرگذار برای تهیه نقشه خطر رخداد سیل انتخاب شدند. این عامل‌ها عبارت بودند از: بلندی[۱]، شیب[۲]، تراکم زهکشی[۳]، سنگ‌شناسی[۴]، کاربری زمین[۵]، نوع خاک[۶]، میانگین سالانهٔ بارش[۷]، شدت بارش[۸]، فراوانی آبراهه[۹]، ضریب نفوذ[۱۰]، شاخص توان آبراهه[۱۱]، شاخص رطوبت پستی‌بلندی[۱۲]، شاخص موقعیت پستی‌بلندی[۱۳]، انحنای مقطع[۱۴]، شاخص پوشش گیاهی[۱۵] و فاصله از رود[۱۶].

نقشه‌های پایه استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه‌شده است. شایان ذکر است مقیاس تمام نقشه‌ها در محیط GIS بر اساس کوچک مقیاس‌ترین نقشه عامل استفاده‌شده یکسان‌سازی و عادی شد و دقت نقشه‌های خروجی بر اساس مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تحلیل شد. برای پهنه‌بندی خطر رخداد سیل، معیارها بر اساس مقیاس، موقعیت منطقه پژوهشی و روش پهنه‌بندی به‌کار برده‌شده، ارزیابی شدند.

1- Elevation
2- Slope
3- Drainage Density
4- Lithology
5- Land Use
6- Soil Type
7- Average Annual Rainfall
8- Rainfall Intensity
9- Stream Frequency
10- Infiltration Number
11- Stream Power Index
12- Topographic Wetness Index
13- Topographic Position Index
14- Profile Curvature
15- Normalized Difference Vegetation Index
16- Distance to River

جدول ۱- نقشه‌های پایه استفاده‌شده برای منطقه مطالعه‌شده.

Table 1- Basic maps used for the study area.

Map	Year	Scale/pixel size	Information Extracted	Source
Geological map of Golestan province	2002	1:100,000	Different classes of geology	Geology and Mineral Exploration Organization of Iran
Topography Map		1:50,000		Iranian Surveying Organization
Landsat 8 satellite images	2021	50*50 (m)	NDVI	United States Geological Survey
Land use map of Golestan province	2017	1:100,000	land use classes	Golestan Province Agricultural and Natural Resources Research Center
Rainfall contour map	2000-2021	50*50 (m)	Annual Rainfall - Intensity of Daily Rainfall	Iran Meteorological Organization
Aerial photos		1:40,000		
Digital Elevation Model (DEM)	-	12.5*12.5 (m)	Elevation-Slope-Curvature-TPI-TWI-SPI-SF-DD-DFR-IN*	Japan Space Agency
Soil type	-	50*50 (m)	Classification of soil units	Soil map of Golestan Province

*: شاخص موقعیت پستی‌بلندی، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، شاخص توان آبراهه، فراوانی آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از رود، ضریب نفوذ.

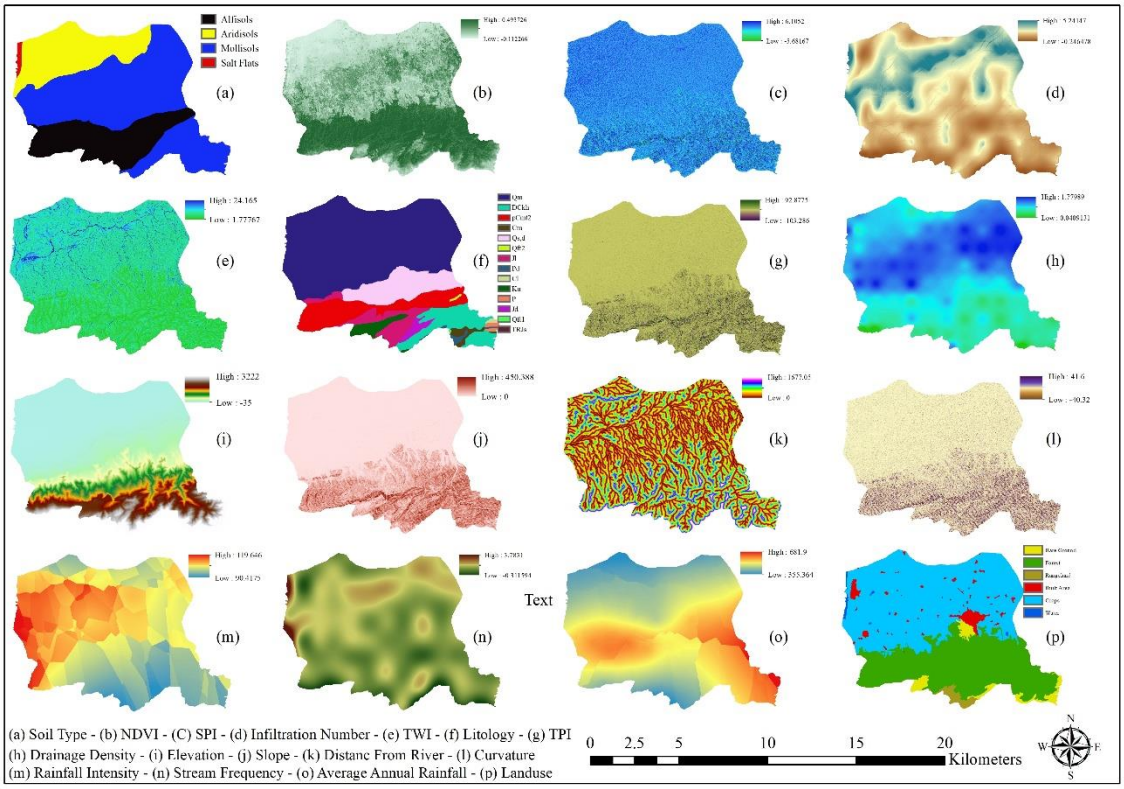
*: Topographic Position Index, Topographic Wetness Index, Stream Power Index, Stream Frequency, Drainage Density, Distance to River, Infiltration Number.

نقشه میانگین سالانه بارش و شدت بارش روزانه با آمار ۲۱ ساله ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده بررسی‌شده (۷۷ ایستگاه باران‌سنجی، ۱۴ ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۱۰ ایستگاه همدید) و روش میان‌یابی کریجینگ در محیط ArcGIS®10.5 برای آبخیز مطالعه‌شده، تهیه شد. نقشه شاخص عادی‌شده تفاوت پوشش گیاهی و کاربری زمین منطقه پژوهشی به‌ترتیب بر اساس تصویرهای ماهواره لندست ۸ و اطلاعات مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع‌طبیعی استان گلستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در محیط نرم‌افزار ENVI®4.5 تصحیح و تهیه شد. شاخص وضعیت پستی‌بلندی، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار SAGA®9.9 تهیه و تولید شدند (شکل ۴). برای یکپارچه‌سازی داده‌ها و ورود آنها به مدل‌ها، دوباره تمام نقشه‌ها با ابعاد پیکسل ۵۰×۵۰ مترمربع نمونه‌برداری شدند.

مدل‌سازی نقشه‌های خطر رخداد سیل

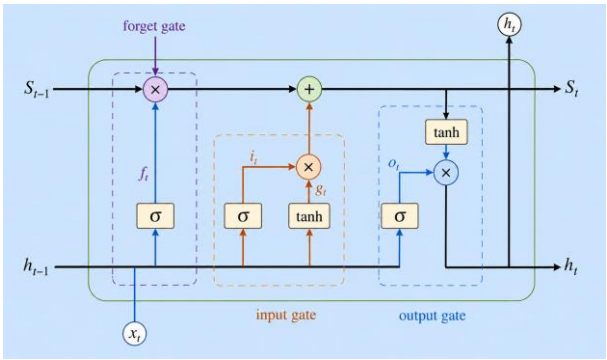
حافظه کوتاه-بلندمدت (LSTM[17]) نوعی شبکه عصبی در قلمرو یادگیری عمیق ماشین است. با بهره‌گیری از این شبکه با ترکیب واحدهای حافظه و واحدهای دروازه‌ای (شامل دروازه‌های ورودی، دروازه‌های فراموشی و دروازه‌های خروجی) می‌توان انتقال و ذخیره اطلاعات را به‌طور دقیق بررسی کرد (چن و همکاران ۲۰۲۳). افزون بر این، می‌توان روندهای بلندمدت رخداد سیل را ثبت کرد. ساختار سلولی شبکه LSTM در شکل ۵ نشان‌داده شده است. از شبکه LSTM با دروازه فراموشی برای تعیین اینکه کدام اطلاعات باید از سلول حافظه (S_t) حذف شوند، استفاده می‌شود.

17- Long Short-Term Memory



شکل ۴ – عامل‌های اثرگذار بر رخداد سیل در منطقه مطالعه‌شده.

Figure 4- Flood conditioning factors of the study area.



شکل ۵- ساختار سلولی شبکه LSTM.

Figure 5- LSTM network cell structure.

این تصمیم بر اساس خروجی گره لایه پنهان قبلی (h_{t-1}) و ورودی کنونی رخداد سیل (x_t) است. داده‌های تعداد رخداد در هر نقطه زمانی، ثبت می‌شود. با عملکرد لایه S دروازه فراموشی (σ) یا این اطلاعات حفظ می‌شود یا فراموش می‌شود و فقط آنچه را که برای پیش‌بینی رخداد آینده مفید است، نگه‌داشته می‌شود. با استفاده از دروازه ورودی مشخص می‌شود که کدام اطلاعات به‌روزرسانی شوند. با این دروازه می‌توان دریافت که آیا داده‌های رخداد سیل جدید به حالت سلول اضافه شده‌اند یا خیر. با یادگیری، شبکه اهمیت داده‌های سیل‌خیزی جدید را تعیین کرده و بر این اساس اطلاعات مرتبط را در حالت سلول حافظه (S_{t-1}) می‌توان به‌روزرسانی کرد.

با دروازه خروجی اطلاعات و خروجی‌های لازم به‌دست می‌آید (h_t). با این دروازه مشخص می‌شود که کدام اطلاعات مهم باید از حالت سلول استخراج شوند. با این سازوکار و با بهره‌گیری از مدل می‌توان روند سیل‌خیزی را بر اساس داده‌های رخداد گذشته و کنونی به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد.

توابع فعال‌سازی S و تانژانت به‌شکل معادله‌های ۱ و ۲ بود.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (۱)$$

$$tanh(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}} \quad (۲)$$

در این پژوهش معادلهٔ دروازه فراموشی استفاده‌شده به‌شکل رابطه ۳ بود.

$$f_t = \sigma\left(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f\right) \quad (۳)$$

W: عبارت وزنی، b: عبارت بایاس، (h_{t-1}): خروجی رخداد سیل در لحظه قبل t-1 است.

معادله‌های ورودی دروازه به‌شکل رابطه‌های ۴ و ۵ بود.

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (۴)$$

$$g_t = tanh\left(W_g \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_g\right) \quad (۵)$$

سپس، وضعیت سلول حافظه به S_t به‌روزرسانی شد. معادله سلول حافظه داخلی به‌شکل رابطهٔ ۶ بود.

$$S_t = f_t \cdot S_{t-1} + i_t \cdot g_t \quad (۶)$$

معادله‌های دروازه خروجی به‌شکل رابطه‌های ۷ و ۸ بودند.

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (۷)$$

$$h_t = o_t \cdot tanh(S_t) \quad (۸)$$

مدل واحد بازگشتی دروازه‌ای[18] یکی از انواع شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است که برای پردازش داده‌های ترتیبی مانند متن، صدا یا سری‌های زمانی استفاده می‌شود. هر سلول GRU شامل دو دروازه است:

الف- دروازه به‌روزرسانی[19] تعیین‌کنندهٔ آن است که چه اندازه از حالت یا حافظه قبلی باید حفظ شود و چه اندازه از ورودی جدید باید جایگزین شود.

ب- دروازه بازنشانی[20] تصمیم‌گیرندهٔ آن است که چه اندازه از اطلاعات قبلی باید فراموش شود.

GRU یک نوع بهینه‌شده از RNN سنتی است. این شبکه حافظه دارد و عملکرد آن در مواجه‌شدن با مسائل توالی، خوب است (ژانگ و همکاران ۲۰۲۱). با این حال، در مقایسه با RNN سنتی، از بروز مشکلات ناپدید شدن شیب و انفجار شیب جلوگیری می‌کند (چن و همکاران ۲۰۲۱). افزون بر این، GRU بسیار ساده‌تر و کارآمدتر از نوع دیگر، LSTM، است. این شبکه فقط از دروازه به‌روزرسانی و دروازه تنظیم مجدد تشکیل‌شده است. دروازه به‌روزرسانی معادل ترکیب دروازه فراموشی و دروازه ورودی LSTM است. با این دروازه می‌توان به‌شکل خطی عامل فراموشی و حالت به‌روزرسانی را بررسی کرد و اندازهٔ حافظه قبلی ذخیره‌شده در گام زمانی کنونی را تعریف کرد. با دروازه تنظیم مجدد بخشی از اطلاعات حالت کنونی را که باید در حالت بعدی استفاده شود، می‌توان بررسی کرد و شیوهٔ ترکیب اطلاعات ورودی جدید با حافظه قبلی را نیز تعیین کرد (وانگ و همکاران ۲۰۲۰ب). ساختار سلولی GRU در شکل ۶ نشان‌داده شده است. محتوای خاص تابع به‌شرح زیر است: r: دروازه تنظیم مجدد، z: دروازه به‌روزرسانی، (h_{t-1}): خروجی دروازه جدید در زمان قبل، $\tilde{h}_t$: اطلاعات حالت پنهان و h_t اندازه خروجی در زمان کنونی است.

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [x_t, h_{t-1}] + b_r) \quad (۹)$$

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [x_t, h_{t-1}] + b_z) \quad (۱۰)$$

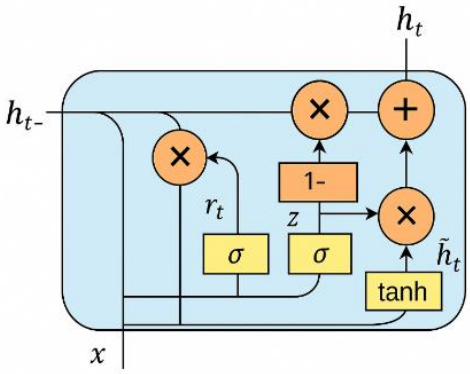
$$\tilde{h}_t = tanh\left(W_{\tilde{h}} \cdot [x_t, r_t h_{t-1}]\right) \quad (۱۱)$$

$$h_t = z_t \tilde{h}_t + (1 - z_t) h_{t-1} \quad (۱۲)$$

18- Gated Recurrent Unit

19- Update Gate

20- Reset Gate



شکل ۶ - ساختار سلولی GRU.
Figure 6- GRU cell structure.

σ: تابع S، tanh: تابع تانژانت هایپربولیک، x_t: ورودی در زمان t، W: ماتریس وزن‌های مختلف و b: بایاس است.

شبکه پیچشی زمانی[۲۱] (TCN) نوعی شبکه عصبی است که برای پردازش داده‌های ترتیبی طراحی‌شده است (ژانگ و همکاران) و از فناوری پیچشی گسترده استفاده‌شده است و شامل درج شکاف‌هایی در هسته‌های پیچشی است. این رویکرد، میدان دریافت هسته را بدون اضافه کردن سنجه‌های بیشتر افزایش می‌دهد. در نتیجه توانایی شبکه برای ثبت وابستگی‌های بلندمدت در رخداد سیل‌های متوالی افزایش می‌یابد. برای محاسبه میان لایه پیچشی گسترده و توالی ورودی جابجایی از رابطهٔ ۱۳ استفاده شد.

$$F(s) = (X * df)(s) = \sum_{i=0}^{k-1} f(i) \cdot X_{s-d \cdot i} \qquad (۱۳)$$

X: سیل‌های متوالی به‌عنوان ورودی، $f: \{0, \cdots, k-1\} \to \mathbb{R}$ فیلتر، d: اندازه ضریب اتساع، k: اندازه هسته فیلتر و $s - d \cdot i$: نورون قبل از لایه پیچشی گسترده‌شده است.

در مدل TCN، معرفی بخش‌های باقی‌مانده، سبب افزایش عملکرد مدل می‌شود (شکل ۷). با الگوبرداری از ساختار بلوک باقی‌مانده موجود در ResNet، این بخش‌ها ورودی‌های اصلی رخداد سیل را از بخش واحد TCN به خروجی‌های لایه‌های پیچشی گسترده می‌افزایند. این رویکرد آموزش هم‌گرایی را آسان‌تر کرده و توانایی تعمیم مدل را افزایش می‌دهد.

$$o = SeLU\big(x + F(x)\big) \qquad (۱۴)$$

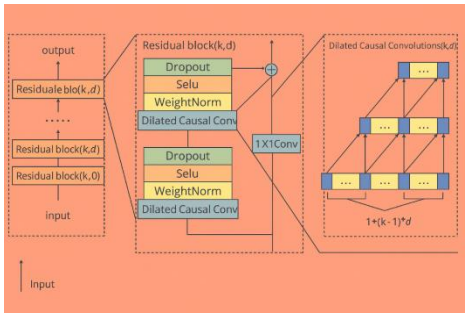
x و o: به‌ترتیب اندازه‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده رخداد سیل، F: مجموعه‌ای از عملیات (توابع پیچشی گسترده و فعال) است.

برای اطمینان از اینکه ورودی X (رخدادهای متوالی) با اندازه F(x) مطابقت دارد، یک لایه پیچشی ۱×۱ اضافه شد. ازاین‌رو، رابطهٔ ۱۴ به‌شکل رابطه ۱۵ تغییر یافت.

$$o = SeLU\big(conv_{1\times1}(x) + F(x)\big) \qquad (۱۵)$$

برای اجرای مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB®9، ۱۶ عامل مؤثر بر رخداد سیل (متغیر مستقل) و نقشه پراکنش نقاط سیل (متغیر وابسته) در محیط ArcGIS®10.5 به‌شکل یک پایگاه اطلاعات مکانی واحد سلول مبنا با اندازه سلولی ۵۰ متر و ساختار مختصات جغرافیایی UTM منطقه ۴۰ تهیه شدند. برای تقسیم‌بندی داده‌ها برای مراحل آموزش و آزمایش از ۷۰٪ از داده‌ها برای آموزش و واسنجی و ۳۰٪ باقی‌مانده برای آزمون و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد.

21- Temporal Convolutional Network



شکل ۷- ساختار سلولی TCN.

Figure 7- TCN cell structure.

روش ارزیابی دقت طبقه‌بندی مدل‌ها

از منحنی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC)[۲۲]، برای مقایسه و ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی استفاده و اعتبار و صحت مدل تعیین شد. در سال‌های گذشته این منحنی به‌عنوان کارآمدترین روش ارزیابی به‌وسیلهٔ پژوهشگران پرشماری استفاده‌شده است (فام و همکاران ۲۰۲۰، کستیچ و زهریا ۲۰۱۷، رحمتی و همکاران ۲۰۲۰). از لحاظ گرافیکی ارتباط میان نرخ‌های مثبت کاذب (محور X) و نرخ‌های مثبت واقعی (محور Y) برای هر اندازه در قالب ماتریس ابهام (Confusion Matrix)، ممکن خواهد بود (رابطه‌های ۱۶ و ۱۷) (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۴).

$$X = FPR = 1 - specify = 1 - \left[\frac{TN}{TN + FP}\right] \quad (۱۶)$$

$$Y = TPR = sensitivity = \left[\frac{TP}{TP + FN}\right] \quad (۱۷)$$

TN[۲۳]: تشخیص درست نبودن رخداد سیل است و بیانگر آن است که در داده‌های واقعی رخداد سیل مشاهده‌نشده و مدل نیز رخداد سیل را پیش‌بینی نکرده است.

FP[۲۴]: هشدار نادرست رخداد سیل است و بیانگر آن است که در داده‌های واقعی پدیده سیل رخ نداده است، اما مدل رخداد سیل را پیش‌بینی کرده است.

TP[۲۵]: تشخیص درست رخداد سیل است و بیانگر آن است که در واقعیت سیل رخداده است و مدل نیز سیل را پیش‌بینی کرده است.

FN[۲۶]: تشخیص ندادن سیل (خطای خطرناک) است و بیانگر آن است که در واقعیت سیل رخداده است ولی مدل رخداد سیل را پیش‌بینی نکرده است.

مساحت زیر منحنی ROC بیانگر اندازهٔ پیش‌بینی ساختار با توصیف توانایی آن در برآورد صحیح بودن و نبودن رخدادها است. AUC-ROC دقت یک مدل پیش‌بینی‌کننده را با تعیین توانایی ساختار برای انتظار بودن یا نبودن رخداد صحیح (رویدادها) از پیش تعریف‌شده توصیف می‌کند (پورتقی و پورقاسمی ۲۰۱۵). در شرایطی که مدل با داده‌های نامشخص محاسبه شود اندازهٔ AUC از ۰/۵ تا ۰/۶ متغیر بوده و نشان‌دهندهٔ ناکارآمدی مدل است (شیرانی و همکاران ۲۰۲۴). اندازه AUC از ۰/۶ تا ۰/۷ نشان‌دهندهٔ یک مدل ضعیف است و اندازه AUC از ۰/۷ تا ۰/۸ نشان‌دهندهٔ یک مدل نسبتاً خوب با عملکرد متوسط است. هنگامی که اندازه AUC بیشتر از ۰/۸ باشد نشان‌دهنده برازش زیاد با مجموعه داده‌ها و کارآمدی مدل است (ساجدی‌حسینی و همکاران ۲۰۱۸).

برای تحلیل و مقایسه ارزش‌های طبقه‌بندی‌شده نادرست مدل‌ها، از شاخص مساحت زیر منحنی ارزش یا هزینه[۲۷](CC) استفاده شد (شیرانی و همکاران ۲۰۲۴). ارزش کل طبقه‌بندی نادرست یک مدل به

22- Receiver Operating Characteristic
23- True Negative
24- False Positive
25- True Positive
26- False Negative
27- Area Under the Cost Curve

درصد واحدهای واقعیت زمینی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند، احتمال پیش‌بینی رخداد سیل در منطقه و ارزش‌های به اشتباه طبقه‌بندی از انواع مختلف خطا، بستگی دارد (دراموند و هولت ۲۰۰۰). منحنی ارزش، نشان‌دهندهٔ ارزش قابل انتظار عادی‌شده به‌عنوان تابعی از تابع احتمال-ارزش است. ارزش قابل انتظار عادی‌شده NE(C) با استفاده از رابطه ۱۸ محاسبه شد.

$$NE(C) = \frac{(1 - TP \cdot P(+) \cdot C(-|+) + FP \cdot P(-) \cdot C(+|-))}{P(+) \cdot C(-|+) + P(-) \cdot C(+|-)} \quad (۱۸)$$

در این رابطه بیشینه ارزش قابل انتظار عادی در شرایطی به‌دست می‌آید که تمام داده‌ها (بودن و نبودن رخداد) به اشتباه طبقه‌بندی‌شده باشند. به‌عنوان مثال زمانی که FP و FN هر دو یکسان باشند، بیشینه و کمینهٔ ارزش عادی‌شده به‌ترتیب یک و صفر است. اندازه عادی‌شده $P(+) \cdot C(-|+)$ با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه شد.

$$PC(+) = \frac{(P(+) \cdot C(-|+))}{P(+) \cdot C(-|+) + P(-) \cdot C(+|-)} \quad (۱۹)$$

PC(+): تابع احتمال- ارزش است. دامنه PC(+) از صفر تا یک متغیر است.

وقتی ارزش‌های نادرست طبقه‌بندی‌شده برابر باشند، عبارت به‌شکل $PC(+) = P(+)$ خواهد بود. به‌طورکلی، $PC(+) = 0$ زمانی به‌دست می‌آید که ارزش فقط به موارد منفی وابسته باشد، یعنی موارد مثبت $(P(+) = 0)$ یا ارزش نادرست طبقه‌بندی‌شده آن‌ها هرگز رخ نمی‌دهد. اگر $C(-|+)$ تهی باشد، اندازه $PC(+) = 1$ مربوط به اندازه‌های بیشینه است. یعنی: $P(-) = 0$ یا $C(+|-) = 0$ است.

منحنی‌های ارزش برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های پهنه‌بندی سیل بر اساس ارزش قابل انتظار عادی‌شده (محور y) در مقابل تابع ارزش احتمالی (محور x) که به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ عملکرد طبقه‌بندی و نقاط عملیاتی (داده‌های به‌دست آمده از واقعیت زمینی) هستند، رسم شد. هرچه ارزش قابل انتظار عادی‌شده کمتر باشد، مدل مدنظر برای پهنه‌بندی رخداد سیل مناسب‌تر است. افزون بر این، تفاوت میان توانایی‌های پیش‌بینی مدل‌های خطر سیل بر اساس فاصله عمودی میان دو منحنی ارزش اندازه‌گیری شد.

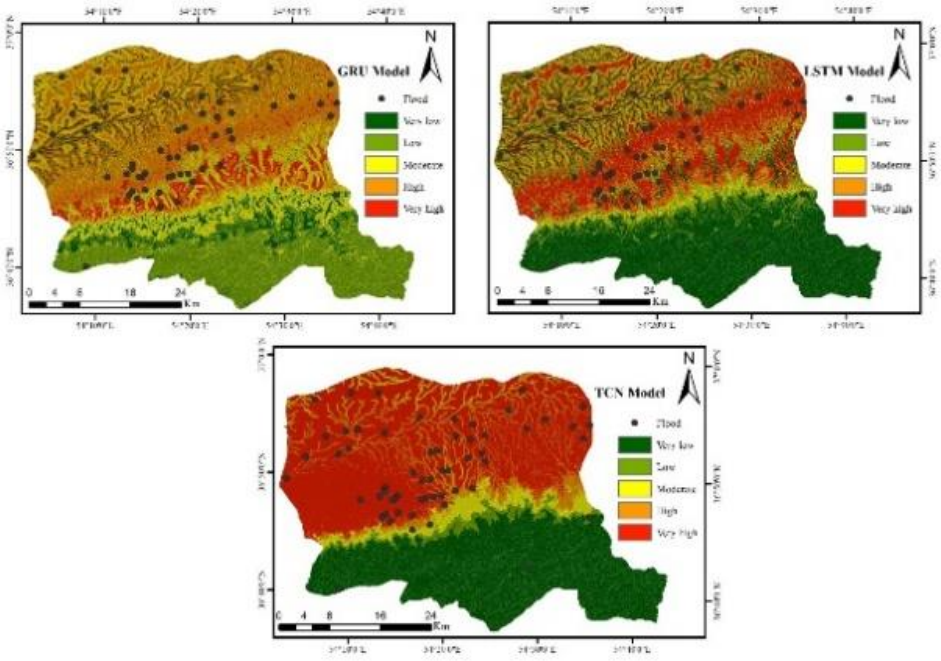
برای ارزیابی عملکرد و طبقه‌بندی طبقه‌ها در هر مدل از شاخص‌های نسبت فراوانی (FR) و مساحت سلول هسته (SCAI) استفاده شد (شیرانی و همکاران ۲۰۲۴). شاخص نسبت فراوانی (FR) بیانگر نسبت مساحت نقطه سیلابی در هر طبقه به مساحت همان طبقه است. این شاخص نشان‌دهندهٔ دقت برای انتخاب مدل‌ها است. برای محاسبه شاخص مساحت سلول هسته (SCAI)، منطقه مطالعه‌شده به شبکه‌هایی از سلول‌ها تقسیم و بر اساس نسبت پیکسل سیلابی محاسبه شد. به‌بیان دیگر برعکس نسبت فراوانی (FR) با تقسیم درصد مساحت هر پهنه به درصد مساحت سلول‌های سیلابی، شاخص نامبرده عادی محاسبه شد. شاخص مساحت سلول هسته SCAI نشان‌دهنده تراکم نقاط محدوده سیل در پهنه‌هاست و برای ارزیابی دقت در انتخاب مدل استفاده شد (شیرانی و همکاران ۲۰۱۸).

نتایج و بحث

نتایج طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر رخداد سیل نشان داد مساحت رده‌های خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی‌زیاد در مدل TCN به‌ترتیب با نسبت‌های ۳۴/۶۶، ۳/۰۰، ۰۶/۰۳، ۱۱/۲۲ و ۴۵/۰۹٪، در مدل GRU به‌ترتیب با نسبت‌های ۰۶/۶۵، ۲۷/۶۸، ۲۲/۰۲، ۳۴/۱۶ و ۰۹/۴۹ و در مدل LSTM به‌ترتیب با نسبت‌های ۳۷/۵۷، ۰۹/۳۳، ۱۱/۴۷، ۱۸/۸۳ و ۲۲/۸۰٪ از مساحت ۱۶۷۰ کیلومترمربعی منطقه مطالعه‌شده را پوشش داد (جدول۲، شکل ۸). افزون بر این، از هم‌پوشانی نقشه پراکنش سیلاب با نقشه طبقه‌بندی پهنه‌بندی خطر رخداد سیل مشخص شد در مدل‌های TCN، GRU و LSTM رده‌های خطر خیلی‌کم تا کم به‌ترتیب ۰۵/۰۸، ۰۳/۳۹ و ۱۰/۱۶٪ و رده‌های متوسط، خطر زیاد و خیلی‌زیاد به‌ترتیب

۹۱/۵۲، ۷۹/۶۶ و ۷۹/۶۶٪ از نقاط سیل را کسب کردند. در مدل TCN، مناطقی که در برگیرنده بیشترین نقاط سیل بودند سهم بیشتری را نیز کسب کردند و رده خطر خیلی‌زیاد به‌طور قابل توجهی افزایش یافت ولی در مدل LSTM و GRU این مناطق کاهش یافتند (جدول۲ و شکل ۸).

نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص‌های نسبت فراوانی (FR) و مساحت سلول هسته (SCAI) برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر رخداد سیل از اجرای مدل‌ها نشان داد دو مدل TCN و LSTM در مقایسه با GRU کارآمدتر بودند (جدول۲).



شکل ۸- نقشه‌های پهنه‌بندی خطر رخداد سیل با اجرای مدل‌های TCN، GRU و LSTM.

Figure 8- Flood hazard zonation maps by implementing TCN, GRU and LSTM models.

جدول ۲- مساحت رده‌های خطر رخداد سیل، نسبت فراوانی و شاخص سلول هسته.

Table 2- Area of hazard classifications and flood occurrence, FR and SCAI.

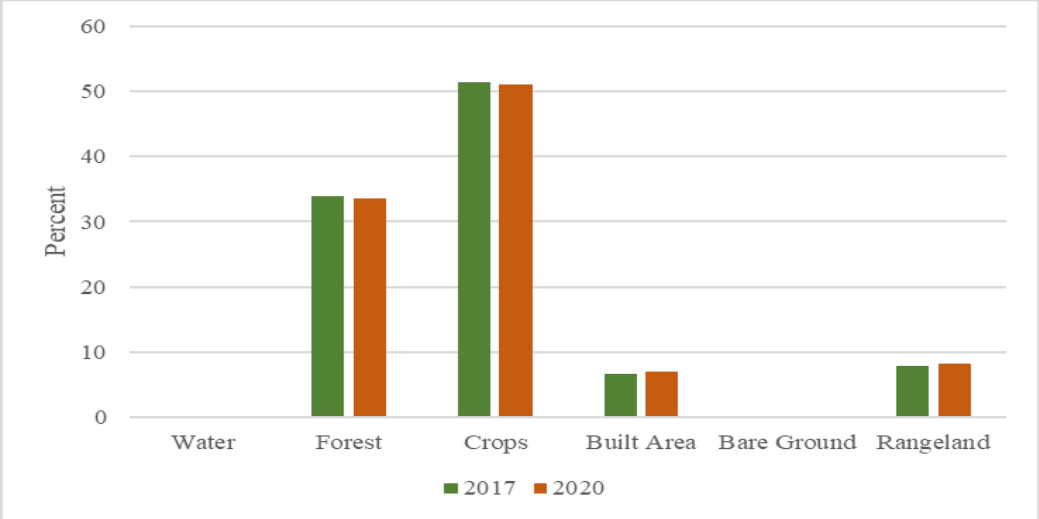
Model	Flood hazard zones	Flood point	Flood point (%)	Pixel of zones	Pixel of zones (%)	Frequency ratio (FR)	Seed (%)	SCAI
TCN	Very low	2	3.39	59811	34.66	0.03	3.39	10.23
	Low	1	1.69	5185	3.00	0.02	1.69	1.77
	Moderate	2	3.39	10399	6.03	0.03	3.39	1.78
	High	5	8.47	19354	11.22	0.08	8.47	1.32
	Very high	49	83.05	77799	45.09	0.83	83.05	0.54
GRU	Very low	0	0.00	11474	6.65	0.00	0.00	0.00
	Low	2	3.39	47759	27.68	0.03	3.39	8.17
	Moderate	10	16.95	37988	22.02	0.17	16.95	1.30
	High	45	76.27	58944	34.16	0.76	76.27	0.45
	Very high	2	3.39	16383	9.49	0.03	3.39	2.80
LSTM	Very low	3	5.08	64819	37.57	0.05	5.08	7.39
	Low	3	5.08	16099	9.33	0.05	5.08	1.83
	Moderate	6	10.17	19795	11.47	0.10	10.17	1.13
	High	12	20.34	32493	18.83	0.20	20.34	0.93
	Very high	35	59.32	39342	22.80	0.59	59.32	0.38

براساس رابطه منطقی و نسبی موجود میان تعداد نقاط سیل و پهنه‌های خطر، به‌ترتیب برای پهنه‌های با خطر خیلی‌کم تا خیلی‌زیاد اندازه نسبت فراوانی (FR) افزایش و شاخص مساحت سلول هسته (SCAI) به‌طور قرینه و معکوس کاهش یافت. روند شاخص FR در مدل‌های TCN و LSTM افزایشی بود و در رده‌های پرخطر (زیاد و خیلی‌زیاد) اندازه‌های آن قابل قبول بود. روند کاهشی شاخص SCAI، نشان‌دهندهٔ عملکرد خوب این دو مدل بود. اما، اندازه‌های هر دو شاخص FR و SCAI مدل GRU در ردهٔ خطر خیلی‌زیاد قابل قبول نبود (جدول ۲). از آنجایی که شیوه‌های مدیریتی کاربری زمین بیشترین اثر را بر منابع‌طبیعی (پوشش گیاهی، آب، مواد غذایی و خاک) دارد، در نتیجه با بهره‌گیری از اطلاعات کاربری زمین می‌توان مشکلات منابع‌طبیعی را مدیریت کرد. ازاین‌رو، نقشه کاربری زمین در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ با استفاده از ماهواره سنتینل ۲ تهیه شد. نتایج به‌دست آمده بر اساس مساحت هر یک از کاربری‌های مختلف نشان داد که بیشترین سهم آبخیز مربوط به مناطق جنگلی و زراعی است. ازاین‌رو، در سال‌های گذشته با افزایش مساحت مناطق مسکونی و ساخت و ساز در بافت جنگلی منطقه، پوشش گیاهی آبخیز مطالعه‌شده کاهش‌یافته است. افزون بر این، زمین‌های زراعی به‌دلیل ضریب نفوذپذیری خاک و عملیات کشاورزی به‌طور ویژه بخشی از رواناب تشکیل‌شده از رخداد سیل را متوقف کرده و عاملی برای جلوگیری از شدت سیل است. بر پایهٔ نتایج این پژوهش مساحت این کاربری نیز کاهش‌یافته است (جدول ۳ و شکل۹).

جدول ۳- مساحت کاربری‌های منطقه مطالعه‌شده در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰.

Table 3- Land use area of the study area in 2017 and 2020.

Land use	Area-2017 (km^2)	Percent-2017	Area-2020 (km^2)	Percent-2020
Water	1.84	0.11	3.173	0.19
Forest	566.63	33.93	559.45	33.50
Crops	857.55	51.35	852.869	51.07
Built Area	110.22	6.60	117.067	7.01
Bare Ground	1.17	0.07	0.501	0.03
Rangeland	132.60	7.94	136.94	8.20



شکل ۹- توزیع کاربری‌های مختلف در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰.

Figure 9- Distribution of different land uses in 2017 and 2020.

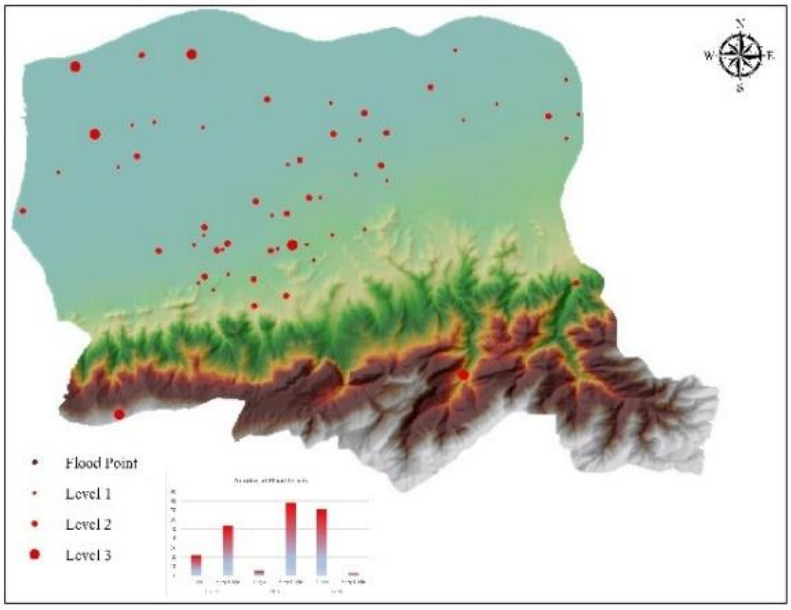
با توجه به دورهٔ ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۱۹) موقعیت نقاط سیلابی (۵۹ نقطه) در سال‌های مختلف بر مبنای تعداد رخداد سیل (مجموعاً ۹۵ رخداد) در جدول ۴، ارائه‌شده است. با همپوشانی نقشه‌های پهنه‌بندی به‌دست آمده از اجرای مدل‌ها و نقاط سیل مشخص شد در مدل TCN تعداد ۴۹ نقطه با تکرار مجموعاً ۷۸ رخداد (حدود ۸۲٪) در پهنه خطر خیلی‌زیاد و تعداد ۵ نقطه با تکرار ۵ رخداد در پهنهٔ خطر زیاد بودند.

در مدل GRU ۲ نقطه با تکرار مجموعاً ۳ رخداد در پهنه خطر خیلی‌زیاد و تعداد ۴۵ نقطه با تکرار مجموعاً ۷۱ رخداد (تقریبا ۷۵٪) در پهنه خطر زیاد بودند.

در مدل LSTM تعداد ۳۵ نقطه با تکرار مجموعاً ۵۳ رخداد (تقریبا ۵۶٪) در پهنه خطر خیلی‌زیاد و تعداد ۱۲ نقطه با تکرار مجموعاً ۲۲ رخداد (تقریبا ۲۳٪) در پهنه خطر زیاد بودند (جدول ۴ و شکل ۱۰).

بر پایهٔ نتایج مساحت زیر منحنی ROC، دقت هر سه مدل در مرحله آزمون یا اعتبارسنجی عالی (بیش از ۰/۹) بود.

ازاین‌رو، استفاده و بهره‌گیری از این مدل‌ها برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر رخداد سیل در عملیات‌های زیربنایی و توسعه‌ای پیشنهاد می‌شود. اما، در جایگاه مقایسه با یکدیگر، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌های مساحت زیر منحنی (AUC) در مدل TCN در هر دو مرحله آموزش و آزمون (۰/۹۶ و ۰/۹۲) بیانگر عملکرد خوب این مدل بود. این یافته نشان‌دهندهٔ همبستگی زیاد میان نقشه خطر رخداد سیل تهیه‌شده و نقشه پراکنش تعداد رخداد سیل است. از سوی دیگر، اندازه‌های مساحت زیر منحنی (AUC) دو مدل LSTM و GRU در مرحله آموزش بیشتر بود. اما، در مرحله آزمون این اندازه‌ها به‌ترتیب در مدل LSTM و GRU، ۰/۸۶ و ۰/۸۴ و کمتر از ۰/۹ بود (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- موقعیت نقاط سیلابی براساس تعداد رخداد.

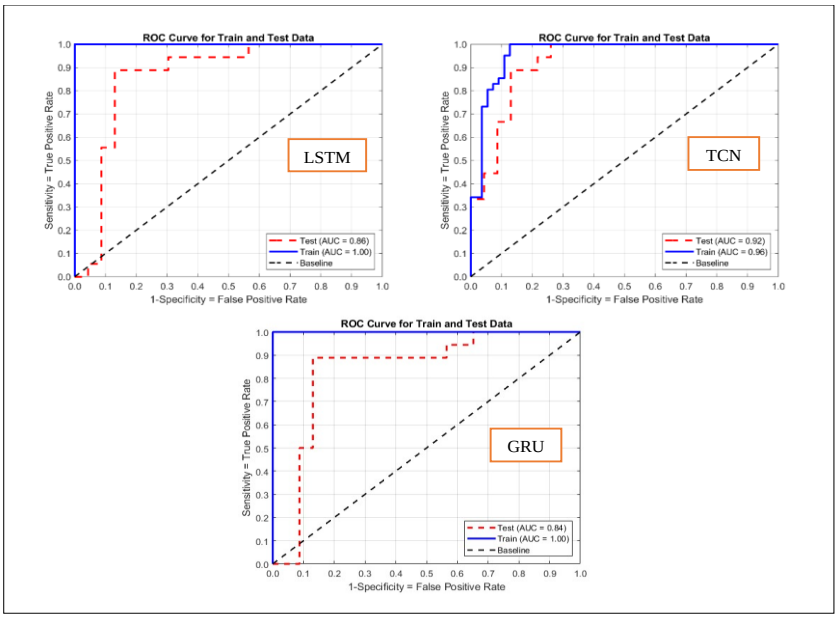
Figure 10- Location of flood points based on the number of events.

افزون بر این، هرچه شاخص مساحت زیر منحنی هزینه (CC) کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است. در این پژوهش، بر پایهٔ شاخص (CC) دقت مدل TCN در مقایسه با دو مدل دیگر بیشتر بود و این مدل کارآمدتر بود (شکل۱۲).

جدول ۴- مشخصات نقاط سیلابی (محدوده روستاها).

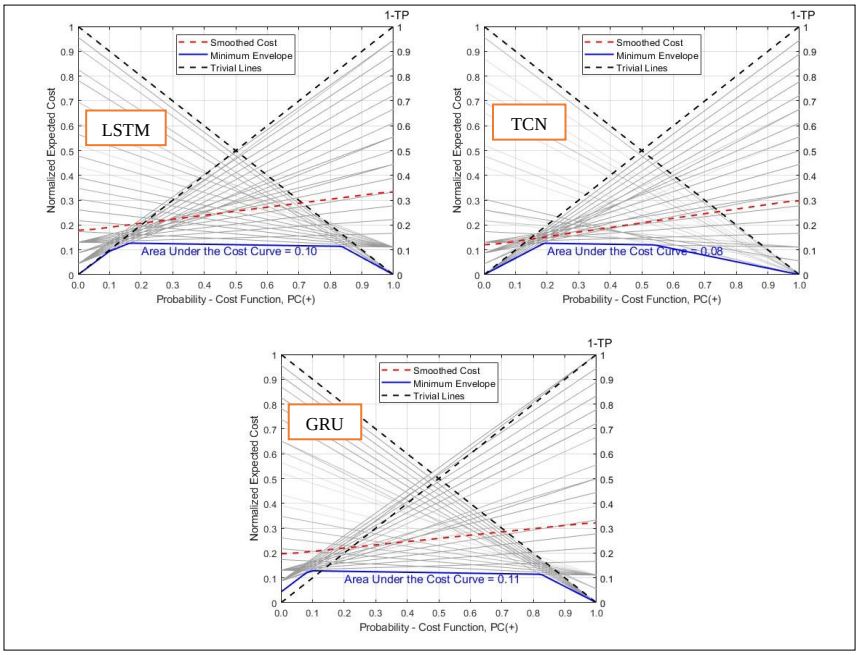
Table 4- Specifications of Flood points (Village boundaries).

Village	City	X Coordinates	Y Coordinates	Years of Event	Number of Flood Events	LSTM Class	TCN Class	GRU Class
Chapaghli	Turkaman	240343.4601	4094039.54	1992-2010-2016	3	Low	Very High	Moderate
Sejwal	Turkaman	242992.9336	4086180.688	2005-2010-2010	3	High	Very High	High
Deraznow	Kurdkoy	245089.9309	4062058.652	1991-2010-2012	3	Very Low	Very Low	Low
Khajehlor	Turkaman	251327.666	4093047.907	2010-2012-2019	3	High	Very High	High
Kelasingal	Gorgan	259997.249	4076636.17	2009-2010-2012	3	Very High	Very High	High
Ziarat	Gorgan	274752.8091	4065446.493	1992-2009-2016	3	Very Low	Very Low	Low
Gharesu	Turkaman	236788.7583	4079589.751	1996-2016	2	Very High	Very High	High
Zaboli Mahalleh Alia	Turkaman	246624.7537	4084286.727	2001-2015	2	Very High	Very High	High
Panjpeikar	Turkaman	247020.7155	4092993.221	2010-2019	2	Very High	Very High	High
Chahardeh	Kurdkoy	248483.9749	4076149.027	2008-2015	2	Very High	Very High	High
Gorji Mahalleh	Kurdkoy	252420.2122	4078186.303	1995-2015	2	High	Very High	High
Miander	Kurdkoy	252433.9407	4073938.937	1994-1995	2	High	Very High	Moderate
Dangalan Khajeh	Kurdkoy	253484.6607	4076200.621	1995-2009	2	Very High	Very High	High
Islamabad	Kurdkoy	254401.8022	4076780.802	1998-1998	2	Very High	Very High	High
Shamushk Sefli	Gorgan	256670.8215	4073715.1	1991-2008	2	Very High	Very High	High
Shamushk Alia	Gorgan	256721.6967	4071417.124	1991-2008	2	Moderate	Moderate	High
Nodije	Gorgan	256837.8233	4080410.933	2009-2010	2	Very High	Very High	High
Gamishlinezar	Turkaman	257825.4829	4089181.611	2012-2014	2	High	Very High	High
Kafshgiri	Gorgan	258137.6751	4076171.111	2012-2014	2	High	Very High	High
Nochman	Gorgan	259463.2838	4072287.414	2008-2009	2	Very High	Moderate	High
Qajar Kalajan	Gorgan	259513.7298	4079348.402	2009-2012	2	High	Very High	High
Laddwin	Gorgan	260632.8664	4083958.788	2012-2014	2	Very High	Very High	High
Versen	Gorgan	261439.5657	4080710.643	2012-2014	2	Very High	Very High	High
Hashemabad	Gorgan	263510.1259	4086210.227	2012-2014	2	Very High	Very High	Moderate
Sistani mahalleh	Gorgan	266184.178	4088004.824	2012-2014	2	High	Very High	Very High
Ojaben	Gorgan	267628.7135	4083503.844	2012-2012	2	Very High	Very High	High
Mamaee	Gorgan	268078.1848	4086307.586	2012-2014	2	Very High	Very High	High
Qurbanabad	Gorgan	271874.2084	4090241.602	2012-2014	2	Very High	Very High	High
Chaharchenar	Gorgan	282031.7223	4087738.507	2012-2015	2	Very High	Very High	High
Tuskastan	Gorgan	284428.6017	4073389.346	1999-2015	2	Moderate	Low	Moderate
Niazabad	Turkaman	239860.0426	4082916.471	2014	1	Low	Very High	Moderate
Zaboli Mahalleh Sefli	Turkaman	245003.2564	4083338.651	2014	1	Moderate	Very High	Moderate
Ivanabad	Turkaman	246223.9609	4086962.233	2016	1	Moderate	Very High	High
Ghareghashli	Turkaman	248120.2042	4087222.216	2016	1	Very High	Very High	High
Zera Mahalleh	Kurdkoy	251541.9095	4076670.823	1995	1	Very High	Very High	High
Khorramabad	Kurdkoy	251899.2717	4073370.745	2014	1	Very High	Very High	High
Gharetappeh	Turkaman	252299.1659	4086756.372	2014	1	Very High	Very High	High
Mofid Abad	Kurdkoy	252374.7581	4077491.216	2014	1	Very High	Very High	High
Chaqar	Kurdkoy	253186.597	4072782.776	2008	1	Very High	Very High	High
Dangalan Sadat	Kurdkoy	253982.8568	4076274.988	1995	1	Very High	Very High	High
Namen	Kurdkoy	254461.1587	4074132.877	1999	1	Very High	Very High	High
Kalajan Sadat	Gorgan	258241.1164	4079215.344	2012	1	High	Very High	High
Esbomahleh	Gorgan	258722.052	4076342.22	2012	1	Moderate	Very High	High
Takhshi mahalleh	Gorgan	259595.0915	4083575.394	2012	1	Very High	Very High	High
Seddon	Gorgan	261226.8251	4076702.61	2003	1	Low	High	Moderate
Seyed Miran	Gorgan	261820.7543	4075375.732	2008	1	Very Low	High	Moderate
Touch	Gorgan	262387.8743	4080731.359	2012	1	Very High	Very High	High
Suleiman Tepe	Gorgan	263296.6182	4088887.134	2010	1	Moderate	Very High	Moderate
Kalu	Gorgan	263415.7744	4077517.002	2002	1	Very High	High	Very High
Lamlang	Gorgan	265463.771	4082722.216	2009	1	Very High	Very High	High
Mahmud's Castle	Gorgan	265777.2645	4085685.087	2012	1	Very High	Very High	High
Saadabad	Gorgan	266222.0673	4077996.068	1998	1	High	High	High
Zangian	Gorgan	268113.7446	4082199.885	2014	1	Very High	Very High	High
Shourhayat	Gorgan	274005.5287	4093402.999	2012	1	High	Very High	High
Etrachal	Gorgan	274723.8306	4087406.148	2016	1	Very High	Very High	High
Sultanabad	Gorgan	277573.5456	4088809.55	2012	1	High	High	Moderate
Nodeh Sharif	Gorgan	283562.1783	4090871.566	2014	1	Very High	Very High	High
Sarkhankelate	Gorgan	283562.2087	4085835.689	2012	1	Very High	Very High	High
Shamsabad	Gorgan	285745.7945	4087952.288	2012	1	Very High	Very High	High



شکل ۱۱- منحنی ROC نقشه‌های خطر رخداد سیل به‌دست آمده از مدل‌های TCN، GRU و LSTM.

Figure 11 - ROC curve of hazard maps to flood events resulting from TCN, GRU, and LSTM models.



شکل ۱۲- منحنی ارزش یا هزینه نقشه‌های خطر رخداد سیل به‌دست آمده از مدل‌های TCN، GRU و LSTM.

Figure 12 - Cost curve of hazard maps to flood events resulting from TCN, GRU, and LSTM models.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سیل‌ها ویرانگرترین پدیده در سراسر جهان هستند. رخدادهای پیاپی سیل سبب خسارت‌های جانی و مالی می‌شود که باید تا حد امکان کاهش یابند. در ایران، استان گلستان نیز از این قاعده مستثنی نیست و در سال‌های گذشته در آبخیزهای این استان ازجمله

آبخیز قره‌سو سیل‌های زیادی رخداده است. ازاین‌رو، تهیه نقشه خطر رخداد سیل برای مدیریت یکپارچه آبخیزها برای پیشگیری و کاهش خطر سیل ضروری است. در این پژوهش، مناطق آسیب‌پذیر سیل با استفاده از مدل‌های TCN، GRU و LSTM شناسایی شدند. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر سیل، از ۵۹ نقطه سیلابی و ۱۶ عامل مؤثر بر رخداد سیل استفاده شد و مدل‌سازی در محیط GIS انجام شد. از ۵۹ نقطه سیل ۷۰٪ آن برای مرحله آموزش و ۳۰٪ آن برای مرحله آزمون درنظر گرفته شد. پس از اجرای مدل‌های TCN، GRU و LSTM، نتایج شاخص مساحت زیر منحنی ROC (AUC) در مرحله آموزش در هر سه مدل نشان‌دهندهٔ عملکرد عالی مدل‌های نامبرده (۱-۰/۹) در مدل‌سازی بود. اما برازش مدل TCN در مدل‌سازی در هر دو مرحله آموزش و آزمون عالی (بیش از ۰/۹) بود. ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد دو مدل TCN و LSTM با داشتن آستانه طبقات مناسب در طبقه‌بندی، اولویت کاربرد آنها برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر رخداد سیل بیشتر است. اندازه‌های مساحت زیر منحنی هزینه برای مدل‌های TCN، LSTM و GRU به‌ترتیب ۰/۰۸، ۰/۱۰ و ۰/۱۱ به‌دست آمد. این یافته بیانگر آن بود که مدل TCN با کمترین اندازه هزینه، کارامدترین مدل در مدل‌سازی است.

نتایج این پژوهش نشان داد بر پایهٔ مدل TCN، ۴۵٪ از مساحت منطقه در رده خطر خیلی‌زیاد در برگیرندهٔ ۸۳٪ از رخدادهای سیل بودند. همچنین، بر پایهٔ مدل LSTM، ۲۳٪ از مساحت منطقه در برگیرندهٔ ۶۰٪ از رخدادهای سیل و بر پایهٔ مدل GRU، ۱۰٪ از مساحت منطقه در برگیرندهٔ ۴٪ از رخدادهای سیل بودند.

سرانجام در این پژوهش، نتایج بررسی نقشه‌های کاربری زمین میان سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ نشان داد با افزایش مناطق مسکونی و کاهش پوشش گیاهی احتمال خطر رخداد سیل در آبخیز مطالعه‌شده افزایش یافت. در این راستا، نتایج رخداد سیل سال ۲۰۱۹ با میانگین بارش ۱۶۰ میلی‌متر در آبخیز قره‌سو مؤید آن است که رعایت نکردن حریم رود از سوی شهروندان و نبودن نظارت و مدیریت دقیق شهری بر ساخت و سازهای بدون مجوز سبب خسارت‌های فراوانی خواهد شد. ازاین‌رو، تجاوز نکردن به بستر رود و رعایت حریم آن در ساخت بناها، اصل اجتناب‌ناپذیری در کاهش مخاطره‌های سیل به‌ویژه در سکونتگاه‌های روستایی به‌شمار می‌آید. پیشنهاد می‌شود بر اساس اهمیت ویژگی‌های ریخت‌سنجی در پهنه‌بندی نقشه‌های خطر رخداد سیل، در پژوهش‌های آینده از این سنجه‌ها همراه با دیگر سنجه‌های متداول در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شود. افزون بر این، بر پایهٔ نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود از روش‌های یادگیری عمیق و ترکیب آن با یکدیگر استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی نوین (هیبریدی) و بهینه‌سازهای مناسب در دیگر آبخیزهای استان گلستان، بررسی و ارزیابی شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه‌شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، برنامه‌نویسی و توسعه مدل‌های یادگیری عمیق، تحلیل‌های آماری و اعتبارسنجی، نگارش و ویرایش مقاله

نویسنده دوم: تهیه نقشه‌ها و شکل‌ها، نگارش نسخه اولیه‌ی مقاله، بازبینی نتایج

فهرست منابع

Aboah A, Adu-Gyamfi Y, Gursoy SV, Merickel J, Rizzo M, Sharma A. 2023. Driver maneuver detection and analysis using time series segmentation and classification. Journal of Transportation Engineering. Part A, Systems. 149(3): 1–15. https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7312

GDNRWM- General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province, Iran. 2018.

Behera I, Jain N, Martha TR, Bose M. 2026. Optimizing sampling strategies for AI-based landslide susceptibility mapping: a case study of Idukki, Kerala. Nat Hazards. 122(1). https://doi.org/10.1007/s11069-025-07842-8

Bentivoglio R, Isufi E, Jonkman SN, Taormina R. 2022. Deep learning methods for flood mapping: a review of existing applications and future research directions. Hydrology and Earth System Sciences. 26(16): 4345–4378. https://doi.org/10.5194/hess

Chen H, Lu T, Huang J, He X, Yu K. 2023. An improved VMD-LSTM model for time-varying GNSS time series prediction with temporally correlated noise. Remote Sensing. 15: 3694. https://doi.org/10.3390/ rs15143694

Chen J, Li Q, Wang H, Deng M. 2020. A machine learning ensemble approach based on random forest and radial basis function neural network for risk evaluation of regional flood disaster: a case study of the Yangtze River Delta, China. International Journal of Environmental Research Public Health. 17(1): 49. https://doi.org/10.3390/ijerph17010049

Chen W, Panahi M, Tsangaratos P, Shahabi H, Ilia I, Panahi S, Ahmad BB. 2019. Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. Catena. 172: 212–231. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.025

Chen Y, He Y, Zhang LF. 2021. Prediction of InSAR deformation time-series using a long short-term memory neural network. International Journal of Remote Sensing. 42(18): 6921–6944. https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1947540

Choubin B, Moradi E, Golshan M, Adamowski J, Sajedi-Hosseini F, Mosavi A. 2019. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. Science of the Total Environment. 651: 2087–2096. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064

Convertino M, Annis A, Nardi F. 2019. Information-theoretic portfolio decision model for optimal flood management. Environmental Modelling and Software 119: 258–274. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.013

Costache R, Zaharia L. 2017. Flash-flood potential assessment and mapping by integrating the weights-of-evidence and frequency ratio statistical methods in GIS environment–case study: Bâsca Chiojdului River catchment (Romania). Journal of Earth System Science. 126(4): 1–19. https://doi.org/10.1007/s12040-017-0828-9

Dalu MT, Shackleton CM, Dalu T. 2018. Influence of land cover, proximity to streams and household topographical location on flooding impact in informal settlements in the Eastern Cape, South Africa. International Journal of Disaster Risk Reduction 28: 481–490. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.12.009

Dano UL, Balogun AL, Matori AN, Wan Yusouf K, Abubakar IR, Said Mohamed MA, Aina YA, Pradhan B. 2019. Flood susceptibility mapping using GIS-based analytic network process: A case study of Perlis, Malaysia. Water. 11(3): 615. https://doi.org/10.3390/w11030615

Dodangeh E, Choubin B, Eigdir AN, Nabipour N, Panahi M, Shamshirband S, Mosavi A. 2020a. Integrated machine learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. Science of the Total Environment. 705: 135983. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135983

Dodangeh E, Panahi M, Rezaie F, Lee S, Bui DT, Lee CW, Pradhan B. 2020b. Novel hybrid intelligence models for flood-susceptibility prediction: Meta optimization of the GMDH and SVR models with the genetic algorithm and harmony search. Journal of Hydrology. 590: 125423.
https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125423

Drummond C, Holte RC. 2006. Cost curves: An improved method for visualizing classifier performance. Machine Learning. 65: 95–130. https://doi.org/10.1007/s10994-006-8199-5

Eslaminezhad SA, Eftekhari M, Akbari M. 2020. GIS-based flood risk zoning based on data-driven models. Journal of Hydraulic Structures. 6(4): 75–98. https://doi.org/10.22055/jhs.2021.36629.1163

Gebrehiwot A, Hashemi-Beni L, Thompson G, Kordjamshidi P, Langan T. 2019. Deep convolutional neural nNetwork for flood extent mapping using unmanned aerial vehicles data. Sensors. 19(7): 1486. https://doi.org/10.3390/s19071486

Islam ARMT, Talukdar S, Mahato S, Kundu S, Eibek KU, Pham QB, Linh NTT. 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. Geoscience Frontiers. 12(3): 101075. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.006

Kaur S, Kaur A, Kumar M. 2026. Recent Advances in Computational Methods in Science and Technology: Volume 1 (1st ed.). CRC Chemical Rubber Company Press. https://doi.org/10.1201/9781003662839

Khosravi K, Shahabi H, Pham BT, Adamowski J, Shirzadi A, Pradhan B, Dou J, Ly HB, Gróf G, Ho HL. 2019. A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi-Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. J. Hydrol Journal of Hydrology. 573: 311–323. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073

Kia MB, Pirasteh S, Pradhan B, Mahmud A R, Sulaiman WNA, Moradi A. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. Environ. Earth Science. 67: 251–264. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1504-z

Kratzert F, Herrnegger M, Klotz D, Hochreiter S, Klambauer G. 2019. Neural hydrology–interpreting LSTMs in hydrology. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 11700 Lecture Notes in Computer Science. pp. 347–362. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28954-6

LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. 2015. Deep learning. Nature. 521(7553): 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Li J, Fan C, Zhao K, Zhang Z, Duan P. 2025. Landslide displacement prediction using time series InSAR with combined LSTM and TCN. Application to the Xiao Andong landslide, Yunnan Province, China. Natural Hazards. 121(4): 3857–3884. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06937-y

Maier HR, Jain A, Dandy GC, Sudheer KP. 2010. Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. Environmental Modelling and Software. 25: 891–909. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.003

Malekian A, Khozani AO, Ashoornejad Gh. 2012. Zoning of flooding potential of Akhtarabad watershed using fuzzy hierarchical analysis method. Natural Geography Research. 4(44):162–191. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jphgr.2012.30246

Mosavi A, Ozturk P, Chau KW. 2018. Flood prediction using machine learning models: Literature Review. Water. 10(11): 1536. https://doi.org/10.3390/w10111536

Nachappa TG, Piralilou ST, Gholamnia K, Ghorbanzadeh O, Rahmati O, Blaschke T. 2020. Flood Susceptibility Mapping with Machine Learning, Multi-Criteria Decision Analysis and Ensemble Using Dempster Shafer Theory. Journal of Hydrology. 590: 125275. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125275

Nhu VH, Mohammadi A, Shahabi H, Ahmad BB, Al-Ansari N, Shirzadi A, Clague JJ, Jafari A, Chen W, Nguyen H. 2020. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and remote sensing data in a tropical environment. International Journal of Environmental Research and Public Health 17(14): 4933. https://doi.org/10.3390/ijerph17144933

Pham BT, Avand M, Janizadeh S, Phong T V, Al-Ansari N, Ho LS, Das S, Le HV, Amini A, Bozchaloei SK, Jafari F, Prakash, I. 2020. GIS based hybrid computational approaches for flash flood susceptibility assessment. Water. 12(3):683. https://doi.org/10.3390/w12030683

Pourghasemi HR, Moradi HR, Aghda SMF, Gokceoglu C, Pradhan B. 2014. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). Arabian Journal of Geosciences. 7: 1857–1878. https://doi.org/10.1007/s12517-012-0825-x

Pourtaghi ZS, Pourghasemi HR. 2015. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township. Southern Khorasan Province, Iran. Hydrogeology Journal. 22: 643–662. https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6

Pradhan B. 2009. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. Journal of Spatial Hydrology. 9(2): 1–18. https://scholarsarchive.byu.edu/josh/vol9/iss2/4

Rahmati O, Darabi H, Panahi M, Kalantari Z, Naghibi SA, Ferreira CS, Kornejady A, Karimidastenaei Z, Mohammadi F, Stefanidis S, Tien Bui D. 2020. Development of novel hybridized models for urban flood susceptibility mapping. Scientific Reports. Jul 31. 10(1): 12937. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69703-7

Rahmati O, Haghizadeh A, Stefanidis S. 2016a. Assessing the accuracy of GIS-based analytical hierarchy process for watershed prioritization. Gorganrood River Basin, Iran.

Water Resources Management. 30(3): 1131–1150. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1215-4

Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H. 2016b. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. Geocarto International. 31(1): 42–70. https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1041559

Rozalis S, Morin E, Yair Y, Price C. 2010. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. Journal of Hydrology. 394: 245–255. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.021

Sajedi-Hosseini F, Malekian A, Choubin B, Rahmati O, Cipullo S, Coulon F, Pradhan B. 2018. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination. Science of the Total Environment. 644: 954–962. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.054

Saleh A, Tan ML, Nazri FM, Yaseen ZM, Zhang F. 2025. Advancing tropical flood susceptibility mapping with multi-head attention mechanism and deep learning models. Advances in Space Research. https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.07.022

Shahabi H, Shirzadi A, Ghaderi K, Omidvar E, Al-Ansari N, Clague JJ, Geertsema M, Khosravi K, Amini A, Bahrami S, Rahmati O. 2020. Flood detection and susceptibility mapping using sentinel-1 remote sensing data and a machine learning approach: Hybrid intelligence of bagging ensemble based on k-nearest neighbor classifier. Remote Sensing. 12 (2): 266. https://doi.org/10.3390/rs12020266

Shirani K, Sadri MA. 2023. Prioritizing effective factors and zoning of flood events using probabilistic models and GIS in the Gorganrood watershed of Golestan province. Watershed Management Research. 36(1): 111–131. (In Persian). https://doi.10.22092/wmrj.2022.358648.1473

Shirani K, Pasandi M, Arabameri A. 2018. Landslide susceptibility assessment by dempster–shafer and index of entropy models, Sarkhoun basin, southwestern Iran. Natural Hazards. 93: 1379–1418. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3356-2

Shirani K, Peyrowan HR, Naderi Samani R. 2024. Applied principles of zonation and prediction landslide susceptibility (Machine Learning and Programming in MATLAB). Soil Conservation and Watershed Management Institute. 259 p. (In Persian).

Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology. 512: 332–343. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.03.008

Vafakhah M, Loor SMH, Pourghasemi HR, Katebikord A. 2020. Comparing performance of random forest and adaptive neuro-fuzzy inference system data mining models for flood susceptibility mapping. Arabian Journal of Geosciences. 13: 417. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05363-1

Wang Y, Fang Z, Wang M. 2020. Comparative study of landslide susceptibility mapping with different recurrent neural networks. Computers and Geosciences. 138: 104445. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104445

Zhang D, Yang J, Li F, Han S, Qin L. 2022. Landslide risk prediction model using an attention-based temporal convolutional network connected to a recurrent neural network. IEEE Access. 10: 37635–37645. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165051

Zhang YG, Tang J, He ZY. 2021. A novel displacement prediction method using gated recurrent unit model with time series analysis in the Erdaohe landslide. Nat Hazards. 105: 783–813. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04337-6

Zhao ZA, He Y, Yao S, Yang W, Wang W, Zhang L, Sun Q. 2022. A comparative study of different neural network models for landslide susceptibility mapping. Advances in Space Research. 70(2): 383–401. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.055

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Flood Hazard Zonation and Prediction using Deep Learning Models in the Qarasu Watershed, Golestan Province

Kourosh Shirani[1*], **Mohammad Ali Sadri**[2]

1- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

2- M.Sc., Islamic Azad University, Lenjan, Isfahan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Flooding is one of the most destructive natural disasters with social, economic and environmental consequences. Therefore, machine learning methods have been developed to model and predict it. The purpose of this research was to zone and predict flood hazard using three deep learning models, including Gated Recurrent Unit (GRU), Long Short-Term Memory (LSTM) and Temporal Convolutional Network (TCN) models, and to introduce the most suitable ones in the Qarasu watershed of Golestan Province. The most important innovation of this research was comparing its results with the results of other research related to susceptibility zonation within the country, using new deep learning models, and considering the most flood factors to determine the most efficient model and increase the accuracy of flood prediction maps.

Materials and Methods

The research area of the Qarasu watershed in Gorganwas was selected. Then maps of the effective factors were collected and prepared. In this study, 16 factors were selected as independent variables and information received from the Ministry of Energy and field visits were selected as dependent variable. Then, a flood event distribution map was prepared. To model and predict flood susceptibility, the flood event distribution map was divided into two groups of experimental points (30%) and training points (70%). After running the TCN, LSTM and GRU models, the maps obtained from flood hazard zonation maps were classified into five classes: very low, low, moderate, high and very high. Finally, the classification accuracy and validation of the zonation and prediction maps were evaluated the flood susceptibility was predicted, and the most appropriate model was selected.

Results and Discussion

To prepare a flood event zonation map, spatial data of 59 flood occurrence points (dependent variable) were collected using available information and by analyzing radar images acquired before and after flood events in Google Earth. Each of these locations experienced 10 recorded and documented flood events during the 20- year study period (2004–2024).

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** Kouroshshirani@gmail.com

Citation: Shirani, K., Sadri, M.A. 2026. Flood Hazard Zonation and Prediction Using Deep Learning Models in the Qarasu Watershed, Golestan Province. Watershed Management Research. 39(3): 22-44.

DOI: 10.22092/WMRJ.2026.371561.1648

Received: 09 December 2025, **Received in revised form:** 18 February 2026, **Accepted:** 21 June 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 22-44.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

Of the total dataset, 70% were randomly selected and divided as training data and 30% as test data for model implementation and validation, respectively. In the next step, 16 factors in the form of environmental groups, hydrology, watershed topography along with climatic data (as independent variables) for zonation and modeling. The classification accuracy of the models was evaluated using two indices, frequency ratio (FR) and kernel cell area (SCAI). The results showed that most flood areas were in the high-hazard class (high and very high) and the largest share of the area of the region was also related to these areas. In addition, based on the area under the relative operator curves and cost, it was determined that the most efficient, appropriate, and cost-effective model was the TCN model compared to the LSTM and GRU models. Among the models studied, the highest and lowest areas under the relative operator and cost curves of the TCN model were 0.92 and 0.08, respectively. The results of this study showed that, based on the TCN model, 45% of the area of the region was in the very high susceptibility class, containing 83% oflood events. Also, based on the LSTM model, 23% of the region contained 60% of the flood events, and based on the GRU model, 10% of the region contained 4% of the flood events. The flood hazard zonation maps obtained in this study can be the basis for planning and crisis management caused by flood events, reducing flood hazard, and managing it. Furthermore, based on the excellent performance of all three TCN, LSTM, and GRU models, the results of this research are necessary and essential for the development of future projects of various organizations operating in many developing countries.

Conclusion and Suggestions

After running all three TCN, LSTM, and GRU models, the AUC-ROC index results in both training and testing step showed excellent performance of the mentioned models. The maps prepared from flood hazard zonation using all three models indicated high accuracy in zone classification and appropriate distribution of flood points in high and very high class. The fit of the TCN model in predicting flood occurrence in the test phase was better compared to the other two models. The evaluation of classification accuracy and validation of the models showed that two TCN and LSTM models, having the appropriate thresholds for classification, are the priority of their application for zonation and predicting the hazard of flooding. Finally, in this study, the area under the value or cost curve index values for TCN, LSTM, and GRU models were obtained as 0.08, 0.10, and 0.11, respectively. Based on the importance of morphometric features in the zoning of flood hazard maps, it is suggested that future research should use these metrics along with other common metrics in the preparation of zoning maps. Furthermore, based on the findings of this study, the application of deep learning methods and their combinations is recommended. It is also suggested that novel hybrid approaches and suitable optimization algorithms be investigated and evaluated in other watersheds of Golestan Province.

Keywords: Deep learning models, floods, hazard, prediction, Qarasu, zonation

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, Programming and development of deep learning models, Statistical analyses and validation, writing, and manuscript editing

Author 2: Preparing maps and figures, drafting the original manuscript, and review of the results

پژوهش‌های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی

کیوان کاظمی‌حسنوند[۱]، حجت‌اله یونسی*[۲]، امیرحمزه حقی‌آبی[۳]، رسول دانشفراز[۴]، بابک شاهی‌نژاد[۵]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۴- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۵- استادیار گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

سازهٔ شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، به‌عنوان یکی از سازه‌های نوین آبی به‌طور گسترده در طرح‌های آبخیزداری و عملیات سازه‌ای، کاربرد دارد. این سازه ترکیبی از واحدهای توری‌سنگی نفوذپذیر است که با ایجاد اختلاف تراز آبی میان بالادست و پایین‌دست، سبب کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. عبور جریان از حفرات متخلخل سازه، شدت تنش‌های برشی بستر را کاهش و اوج آب‌دهی‌های لحظه‌ای را تعدیل می‌کند، در نتیجه نرخ فرسایش آبراهه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به محدودیت پژوهش‌های پیشین در مقایسه کارایی سازه‌های توری‌سنگی و ساده، در این پژوهش با رویکرد آزمایشگاهی رفتار جریان و اندازهٔ اتلاف انرژی، و تحلیل تفاوت‌های کارکردی آن‌ها در مدیریت سیلاب و مهار فرسایش موضعی بررسی شد. اهمیت این سازه‌ها در بستر رودهای ناپایدار و محیط‌های آسیب‌پذیر جریان فوق بحرانی، در ارتقای پایداری آبی و زیست‌محیطی سامانه‌ها دوچندان است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لرستان، در بازه زمانی سال‌های ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۴، در فلومی با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۶ متر و بلندی ۰/۵ متر انجام شد. به‌منظور تحلیل جامع رفتار آبی، در مجموع تعداد ۶۰ آزمایش روی دو گونه سازهٔ شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی طراحی و اجرا شد. در این آزمایش‌ها سه ضخامت سازه‌ای (X_g) در اندازهٔ ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، در ترکیب با پنج آبدهی جریان در اندازهٔ ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، برای نمونه شاهد سازه، بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** yonesi.h@lu.ac.ir
استناد: کاظمی‌حسنوند، ک.، یونسی، ح.، حقی‌آبی، ا. ح.، دانشفراز، ر.، شاهی‌نژاد، ب. ۱۴۰۵. بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۶۳-۴۵.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.371743.1653

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۲/۰۷، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۴۵ تا ۶۳.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان

افزون بر این، در نمونه‌های توری‌سنگی، سه اندازه تخلخل مؤثر ۳۰، ۳۵ و ۴۰٪ با بهره‌گیری از سه دسته مصالح سنگریزه با ابعاد ریزدانه، میان‌دانه و درشت‌دانه که به‌ترتیب قطر میانگین (d_{50}) آنها برابر با ۲۱، ۳۰/۵ و ۴۲ میلی‌متر بود، به‌کار گرفته شد. همچنین، در تمام مدل‌ها بلندی سازه در اندازهٔ ۳۲ سانتی‌متر ثابت در نظر گرفته شد تا بتوان شرایط را با یکدیگر مقایسه کرد.

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده نشان داد که در تمام مدل‌ها، رابطه میان سنجهٔ اتلاف انرژی جریان و ژرفای بحرانی نسبی معکوس بود؛ به‌طوری که با افزایش راندمان اتلاف انرژی، ژرفای بحرانی نسبی کاهش یافت و این روند در تمام سناریوهای آزمایشی مشاهده شد. یافته‌ها نشان داد که ترکیب شیب‌شکن با بستر توری‌سنگی موجب افزایش چشمگیر راندمان اتلاف انرژی جریان (۶۰٪) در مقایسه با شیب‌شکن ساده شد. جریان عبوری از مدل‌های توری‌سنگی به دو حالت روگذر و درون‌گذر تفکیک شد که در حالت درون‌گذر، جریان شبه‌غیردارسی و غیرخطی از محیط متخلخل عبور کرد و سهم اصلی اتلاف انرژی مربوط به این وضعیت بود. افزون بر این، افزایش اندازه ذرات هسته توری‌سنگی و عرض مؤثر سازه موجب افزایش فرآیند اتلاف انرژی شد. سرانجام، اندازه‌های آبدهی روگذر و درون‌گذر برای تمام سناریوها محاسبه شد که می‌توان از این داده‌ها به‌عنوان الگوی ارزشمندی برای مدل‌سازی آبی و بهبود طراحی سازه‌های مشابه بهره برد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، همکنش آبی جریان و اتلاف انرژی در دو گونه سازهٔ شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی به‌شکل آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که می‌توان با کاربرد گونه توری‌سنگی و با ایجاد محیطی متخلخل و نفوذپذیر، انرژی جریان را کاهش داد، در نتیجه نیاز به سازه‌های الحاقی مانند حوضچه‌های آرامش و صفحات مشبک نیز کاهش خواهد یافت. افزون بر این، اثر سنجه‌هایی مانند اندازه ذرات سنگدانه، تخلخل توری‌سنگی و ضخامت سازه بر کارایی اتلاف انرژی و سهم آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر قابل توجه بود. یافته‌ها بیانگر آن بود که استفاده از شیب‌شکن قائم توری‌سنگی در طرح‌های انتقال آب در مناطق شیب‌دار و کوهستانی، از دیدگاه فنی و اقتصادی کارآمدتر و پایدارتر از نمونه ساده است. افزون بر این، از نتایج این پژوهش می‌توان در بهبود طراحی شیب‌شکن‌های توری‌سنگی در طرح‌های آبخیزداری بهره برد.

واژگان کلیدی

آبدهی درون‌گذر، آبدهی روگذر، جریان آشفته، ژرفای بحرانی، مدل فیزیکی، مقاومت آبی

مقدمه

شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی از سازه‌های مهم مهندسی آب به‌شمار می‌آیند که با کاهش انرژی جریان، مهار آشفتگی، جلوگیری از فرسایش بستر و تثبیت آبراهه‌ها، در پایداری رودها و طرح‌های آبخیزداری نقش اساسی دارند. با وجود کارایی زیاد این سازه‌ها در کاهش انرژی جریان، آبشستگی موضعی در پای سازه همچنان یکی از چالش‌های اصلی است که به‌شکل حفره‌هایی با ژرفا و طول مشخص در پایین‌دست ظاهر می‌شود؛ این پدیده عمدتاً ناشی از تمرکز تنش‌های برشی، افزایش آشفتگی جریان و تشکیل گردابه‌ها در ناحیه برخورد جریان با سازه است. نتایج پژوهش‌های پیشین بیانگر آن است که این نوع آبشستگی در شرایط جریان فوق بحرانی و اندازه‌های زیاد عدد فرود، تشدید می‌شود و تحت تأثیر عامل‌هایی مانند شدت و ژرفای جریان و ویژگی‌های مصالح بستر، است. با این حال، وابستگی راهکارهای ارائه‌شده در پژوهش‌های گذشته به شرایط آزمایشگاهی خاص، سبب ایجاد محدودیت‌هایی در

کارایی و قابلیت تعمیم آن‌ها شده است. اگرچه کارایی کلی شیب‌شکن‌های قائم در پژوهش‌های مختلف بررسی‌شده، اما نقش سازه‌های قائم توری‌سنگی در اتلاف انرژی جریان و اثر همزمان شرایط آبی بر رفتار همکنشی جریان-سازه، به‌ویژه در شرایط فوق بحرانی، کمتر به‌شکل نظام‌مند بررسی‌شده است. نتایج پژوهش‌های مرتبط با ترکیب شیب‌شکن‌های قائم با سازه‌های الحاقی مانند حوضچه‌های آرامش و موانع تلف‌کنندهٔ جریان نشان داده‌اند که این ترکیبات بازدهی انرژی و پایداری سازه را افزایش داده‌اند. سازه‌های توری‌سنگی، با تخلخل زیاد و قابلیت عبور جریان، افزون بر بهبود اتلاف انرژی، فشار ایستابی را کاهش داده و پایداری موضعی را بهبود می‌بخشند، و ترکیب آن‌ها با سازه‌های آبی رویکردی مؤثر در مدیریت جریان و مهار انرژی مازاد است.

نخستین بار بخمتف (۱۹۳۲) جریان عبوری از سازه شیب‌شکن قائم را با جریان زیر بحرانی در بالادست سازه را بررسی کرد. این پژوهشگر با فرض توزیع ایستابی فشار و توزیع یکنواخت سرعت، رابطه ۱ را با در نظر گرفتن یک حجم مهارشدهٔ مشخص و با استفاده از معادله انرژی ارائه داد.

$$V_1 = C\sqrt{2g(E_0 - y_1)} \qquad (1)$$

پیراس و همکاران (۱۹۹۲) به‌منظور محاسبه اتلاف انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه، مدل سرریزهای توری‌سنگی پلکانی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بندهای توری‌سنگی پلکانی می‌توانند تا ۳ مترمکعب در ثانیه آبدهی را تحمل کنند. از سوی دیگر، مشاهده کردند که با ریختن یک لایه بتن روی پله‌ها و معکوس کردن شیب، اتلاف انرژی افزایش یافت. نتایج بررسی آزمایشگاهی جریان در استخر زیر جت در حال سقوط به‌وسیلهٔ راجارتنام و چمنی (۱۹۹۵) نشان داد تلاطم جریان در استخر عامل اصلی اتلاف انرژی در سازه‌های شیب‌شکن قائم است. این پژوهشگران با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی خود و داده‌های مور (۱۹۴۳) و رند (۱۹۵۵)، روابطی را برای پیش‌بینی ژرفای استخر و اندازهٔ اتلاف انرژی ارائه دادند. به‌رغم ارزشمند بودن نتایج پژوهش نامبرده عمدتاً سازه‌های ساده و شرایط آبی محدود بررسی‌شده و اثر تخلخل مصالح توری‌سنگی، همکنش هم‌زمان جریان و سازه نفوذپذیر، و تغییرات شرایط جریان در تحلیل اتلاف انرژی لحاظ‌نشده است؛ ازاین‌رو، بررسی آزمایشگاهی رفتار آبی و اتلاف انرژی در شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی به منزلهٔ یک خلأ پژوهشی مطرح است. اسن و همکاران (۲۰۰۴) با در نظر گرفتن یک پله با ابعاد مربعی با نسبت محدوده بلندی نسبی پله به بلندی شیب‌شکن ۰/۱۱ تا ۰/۶۱ در پایاب سازه شیب‌شکن قائم و چسبیده به آن در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم، اتلاف انرژی کل جریان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش بلندی پله، اتلاف انرژی و ژرفای پایین‌دست شیب‌شکن قائم نیز افزایش یافت. باگلیارا و چیواچینی (۲۰۰۶) کاهش انرژی روی شیب‌های نسبتاً کم سنگی را بررسی کردند و دریافتند با افزایش اندازهٔ زبری، مقاومت جریان زیاد و کاهش انرژی نیز افزایش یافت. علاسوند و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D جریان در شیب‌شکن‌های پله‌ای توری‌سنگی را بررسی کردند و نشان دادند که هندسه پله‌ها و زبری سطح، بر توزیع انرژی و ایجاد گردابه‌ها تأثیر قابل توجهی دارد. نتایج آنها نشان داد که با افزایش آبدهی، وضعیت جریان از ناپه به روگذر تغییر یافت و اندازهٔ اتلاف انرژی نیز وابسته به نرخ جریان و ابعاد پله‌ها بود. وسریچ و چنسون (۲۰۱۴) با بررسی سرریزهای پلکانی توری‌سنگی دریافتند که در این سرریزها رابطه میان جریان درون‌گذر و روگذر تابعی از آبدهی، شکل توری‌سنگی، وضعیت جریان و الگوی چرخش است. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن چهار اندازهٔ بلندی شیب‌شکن و سه اندازهٔ شیب (دو، چهار و شش درصد) آزمایش‌هایی بر اساس شیب بالادست انجام دادند و دریافتند که با افزایش شیب بالادست شیب‌شکن، ژرفای آب درون استخر، زاویه برخورد جت، ژرفای لبه، ژرفای پایین‌دست و اتلاف انرژی کاهش یافت. یارمحمدی و احدیان (۲۰۱۶) اثر دیواره‌های پاراپت با و بدون شیب را بر کارایی سرریزهای کلیدپیانویی بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد استفاده از دیواره پاراپت بدون

شیب بازده سرریز را حدوداً ۲۰٪ افزایش داد و در مقایسه با سرریزهای خطی، ظرفیت تخلیه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید، به‌طوری که در برخی حالت‌ها افزایش آبدهی تا چند برابر بود. افضلیان و احدیان (۲۰۱۶) سرریزهای کلید پیانویی و تأثیر دیواره‌های جانبی مثبت را بررسی کردند و دریافتند که نقش طراحی هندسی دیواره‌ها و تخلخل موثر، در توزیع جریان، مهار انرژی و کاهش فشار ایستابی، مهم است. نتایج این پژوهش مؤید اهمیت سنجه‌های هندسی در بهبود راندمان کارایی آبی سرریزهای کلید پیانویی است. کبیری‌سامانی و همکاران (۲۰۱۷) اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به کاهنده‌های افقی شبکه‌ای و شیاری را بررسی آزمایشگاهی کردند و گزارش کردند که استفاده از کاهنده شبکه‌ای و شیاری در لبه شیب‌شکن، اتلاف انرژی و ژرفای نسبی پایین‌دست را افزایش داد. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۹) اتلاف انرژی جریان شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با سه نسبت بازشدگی دریچه و دو نسبت تخلخل در شرایط جریان فوق بحرانی را بررسی آزمایشگاهی کردند و دریافتند که به‌کارگیری صفحات مشبک باعث افزایش اتلاف انرژی جریان، ژرفای نسبی استخر و ژرفای نسبی پایین‌دست شد. افزون بر این، با افزایش عدد فرود بالادست و کاهش ژرفای بحرانی نسبی، اتلاف انرژی نیز افزایش یافت. سرکمریان و احدیان (۲۰۲۰) نشان دادند که شیب‌شکن‌های پله‌ای با افزایش اتلاف انرژی سبب کاهش ژرفا و طول حوضچه پایین‌دست شده و ازاین‌رو، اقتصادی هستند. با استفاده از مدل عددی CFX می‌توان امکان تحلیل جریان پیچیده و بررسی همزمان سنجه‌های هندسی و آبی را با دقت زیاد فراهم آورد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۰) سنجه‌های آبی شیب‌شکن قائم را با استفاده از صفحات مشبک افقی دوبل و جریان زیر بحرانی در بالادست بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد که فاصله نسبی صفحات مشبک اثری بر ژرفای نسبی و انرژی باقی‌مانده پایاب ندارد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱) اثر صفحات مشبک افقی بر سنجه‌های آبی شیب‌شکن قائم را بررسی آزمایشگاهی کردند. این پژوهشگران در مجموع تعداد ۱۰۵ آزمایش برای دو نسبت تخلخل و سه بلندی شیب‌شکن انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن قائم در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده می‌توان ژرفای نسبی استخر، ژرفای نسبی پایین‌دست و اتلاف انرژی نسبی را افزایش داد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱) اثر قطر صفحات مشبک افقی بر اتلاف انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم را بررسی آزمایشگاهی کردند و دریافتند که با افزایش قطر روزنه، اندازهٔ اتلاف انرژی جریان تغییر نکرد و بر آن بی‌اثر بود. میرزایی و همکاران (۲۰۲۱) اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای افقی در مقایسه با نمونه ساده، اتلاف انرژی، ژرفای پایین‌دست، طول ریزش جت و شدت آشفتگی را افزایش داد. افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن نیز اتلاف انرژی را بیشتر و محدوده عدد فرود پایاب را کاهش داد. ماجدی‌اصل و همکاران (۲۰۲۱) کارایی سازه‌های توری‌سنگی در اتلاف انرژی نسبی پایین‌دست سرریز اوجی در شرایط مختلف آبی را به‌شکل آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که طول پرش آبی نسبی و اندازهٔ اتلاف انرژی نسبی با افزایش بلندی آب‌پایه تورسنگی، افزایش یافت. افزون بر این، با ایجاد یک بازشدگی و افزایش آن در عرض آب‌پایه دریافتند که انرژی نسبی کاهش یافت. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱) رفتار سنجه‌های آبی شیب‌شکن‌های مایل توری‌سنگی و ساده را بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اندازهٔ اتلاف انرژی نسبی جریان، با افزایش ژرفای بحرانی نسبی، کاهش یافت. افزون بر این، دریافتند که با استفاده از توری‌سنگی در قسمت شیب‌دار شیب‌شکن مایل می‌توان اندازهٔ اتلاف انرژی جریان را به‌طور میانگین ۸۲٪ در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده افزایش داد. باقرزاده و همکاران (۲۰۲۱) سنجه‌های آبی شیب‌شکن مایل توری‌سنگی و ساده به‌همراه حوضچه آرامش در پایاب سازه را به‌شکل آزمایشگاهی مقایسه کردند و دریافتند که شیب‌شکن مایل توری‌سنگی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نوع یک

تا چهار، انرژی نسبی باقی‌مانده پایاب را به‌ترتیب ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ ٪ کاهش داد. این یافته‌ها در بهبود ایمنی سازه‌ها و کاهش فرسایش مؤثر است.

خیبر و همکاران (۲۰۲۱) اثر انقباض ناگهانی مقطع کانال بر راندمان آبی دریچه سالونی بیضوی را بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد که انقباض کانال موجب کاهش قابل توجه ضریب آبدهی دریچه شد و این کاهش بسته به شرایط جریان از ۱۴ تا ۷۳٪ متغیر بود. افزون بر این، ضریب اتلاف انرژی دریچه بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آوردند. این پژوهشگران با ارائه روابط تجربی توانستند آبدهی عبوری را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند. حاجی‌علی‌گل و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که اگرچه انبساط مقطع کانال موجب افزایش اتلاف انرژی شد، اما در برخی شرایط باعث ناپایداری و ناتقارنی جریان در پایین‌دست شد. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که به‌کارگیری کاهنده‌های عرضی می‌توان با بهبود یکنواختی جریان و کاهش تمرکز سرعت، ضمن حفظ مزایای انبساط مقطع، از بروز اثرات نامطلوب آبی جلوگیری کرد. خیبر و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که تغییر زاویه کانال جانبی و ابعاد سازه بر کارایی سرریزهای جانبی و ضریب آبدهی اثرگذار بود و میان آبدهی و ضریب انرژی رابطه تقریبی ارائه دادند که با داده‌های تجربی صحت‌سنجی شد. نتایج پژوهش خیبر و همکاران (۲۰۲۵) مؤید اهمیت هندسی کانال و سنجه‌های هندسی در بهبود راندمان اتلاف انرژی بود.

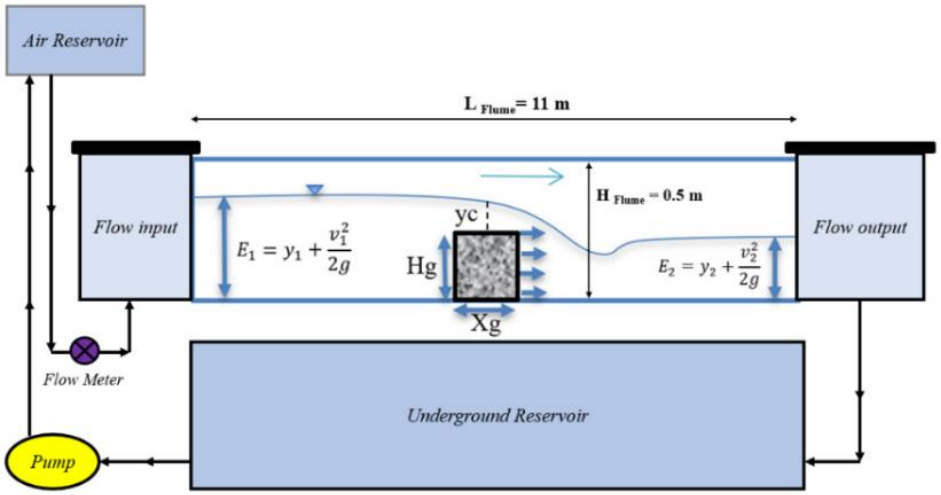
در این پژوهش، با هدف کمی‌سازی اندازهٔ اتلاف انرژی و تغییرات ژرفای بحرانی جریان، اثر تلفیق شیب‌شکن قائم با سازه توری‌سنگی و تغییرات هندسی آن شامل اندازهٔ تخلخل و ابعاد توری‌سنگی، تحت شرایط مختلف آبی (آبدهی و عدد فرود) به‌شکل آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج آن با شیب‌شکن قائم ساده مقایسه شد. این پژوهش با تأکید بر تحلیل سازوکار عبور درون‌گذر جریان و تضعیف تلاطم در پایین‌دست سازه که در پژوهش‌های پیشین کمتر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری و تحلیل شده بود، اجرا شد. افزون بر این، همکنش آبی و اتلاف انرژی در سازه‌های شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و ساده در شرایط آزمایشگاهی به‌شکل نظام‌مند تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لرستان و با استفاده از فلومی با طول مؤثر ۱۱ متر انجام شد. کف و بدنه فلوم از پلکسی‌گلاس شفاف (برای به حداقل رساندن اثر زبری بر جریان) با عرض ۰/۶ متر، بلندی ۰/۵ متر و شیب طولی بستر ۰/۰۰۰۸۸ ساخته شد. در انتهای کانال، دریچه‌ای لولایی برای تنظیم ژرفای جریان نصب شد و به‌منظور برداشت دقیق داده‌های آبی، ریل‌هایی موازی روی دیواره‌های کانال تعبیه شد تا اندازه‌گیری ژرفای جریان و برداشت نیم‌رخ جریان در موقعیت‌های مشخص امکان‌پذیر باشد. به‌منظور یکنواخت‌سازی جریان ورودی و کاهش اثر اغتشاشات اولیه، در بالادست کانال از یک توری‌سنگی با ابعاد ۶۰×۵۰×۳۵ سانتی‌متر پرشده با قلوه‌سنگ‌هایی با میانگین اندازهٔ قطر ۹ سانتی‌متر و تخلخل در بازه ۳۰ تا ۴۰٪ به همراه سه لایه توری مشبک استفاده شد. به‌کارگیری توری‌سنگی به‌دلیل نفوذپذیری زیاد و افزایش زبری مؤثر، موجب کاهش تدریجی تلاطم جریان، تضعیف گردابه‌های ورودی و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر سرعت پیش از ورود جریان به ناحیه مدل شیب‌شکن قائم شد. به این ترتیب از شکل‌گیری شرایط جریان غیرواقعی در ناحیه آزمایش جلوگیری شد. سامانهٔ تأمین آب شامل یک پمپ گریز از مرکز با آبدهی ظرفیت نامی ۵۳ لیتر بر ثانیه بود که آب را از مخزن زیرزمینی به مخزن هوایی با هد ثابت منتقل کرد. سپس با دو خط لوله مجهز به شیر فلکه و آبدهی‌سنج الکترومغناطیسی واسنجی یا پایدارسازی و وارد فلوم شد. آبدهی جریان قبل از ورود به فلوم مهار و ثابت نگه‌داشته شد تا شرایط پایدار برای انجام آزمایش‌ها فراهم آید. جریان پس از خروج از کانال مجدداً به مخزن زیرزمینی بازگشت‌داده شد و این چرخه بسته، شرایط جریان پایدار و یکنواخت در بالادست مدل را فراهم آورد. برای هر آزمایش، آبدهی جریان بالادست با آبدهی‌سنج ثابت نگه‌داشته شد. در

پایین‌دست، ژرفای آب با استفاده از دریچه تنظیم و بر اساس رابطه مانینگ مهار شد تا شرایط پایدار شود. عدد فرود پایین‌دست در اثر تعامل جریان با شیب‌شکن قائم و اتلاف انرژی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شد. نمای فلوم استفاده‌شده در شکل ۱ نشان‌داده شده است.



شکل ۱- نمودار کلی تجهیزات آزمایشگاهی.

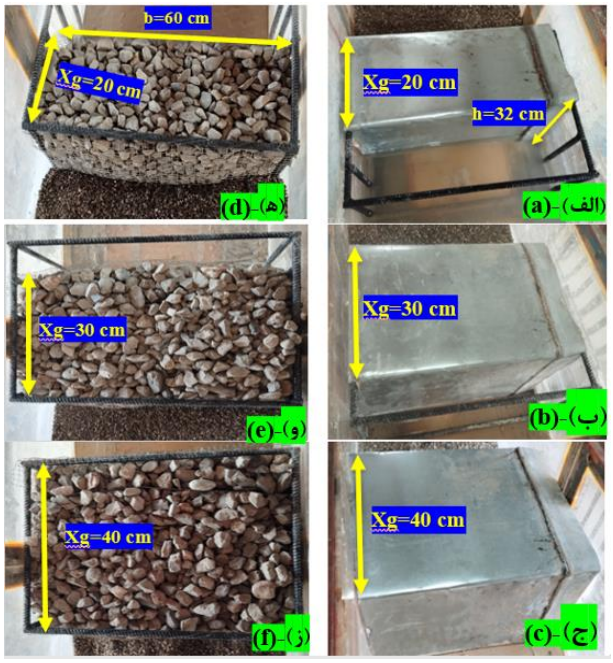
Figure 1- General schematic of laboratory equipment.



شکل ۲- نمای فلوم آزمایشگاهی.

Figure 2- View of laboratory flume.

نمای فلوم آزمایشگاهی که سازه در آن نصب شد در شکل ۲ و انواع مدل‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و سازه شیب‌شکن ساده در شکل ۳ نشان‌داده شده است.



شکل ۳- مدل‌های آزمایشگاهی شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی
(الف)، (ب) و (ج): نمونه شاهد سازه برای اندازه‌های به‌ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر
(ه)، (و) و (ز): مدل توری‌سنگی سازه برای اندازه‌های به‌ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر.

Figure 3- Experimental models of simple and gabion vertical drop
(a), (b) and (c): Control sample of the structure for the cases of 20, 30 and 40 cm, respectively
(d), (e) and (f): Gabion model of the structure for the cases of 20, 30 and 40 cm, respectively.

روش پژوهش

در این پژوهش، آزمایش‌ها در پنج آبدهی ورودی ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه انجام شد و عدد فرود بالادست جریان در تمام آزمایش‌ها حدود ۰/۲۷ تا ۰/۳ بود تا شرایط جریان پایدار و یکنواختی برای مدل آزمایشگاهی فراهم آید. برای ساخت مدل، یک چارچوب فلزی با عرض‌های قابل تغییر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، بلندی ثابت ۳۲ سانتی‌متر و طول ۵۸ سانتی‌متر استفاده شد. به‌منظور حفظ نسبت هندسی جریان و امکان مقایسه میان نمونه‌ها در تمام آزمایش‌ها، بلندی ثابت در نظرگرفته شد. نمونه شاهد، یعنی شیب‌شکن قائم ساده، از ورق گالوانیزه با همان ابعاد ساخته شد تا سازه کاملاً ساده باشد و جریان صرفاً از روی آن عبور کند. سپس، سازه شیب‌شکن با توری‌سنگی تلفیق شد. برای ساخت سازه توری‌سنگی، از سه نوع اندازه ریزدانه، میان‌دانه و درشت‌دانه استفاده شد که میانگین اندازهٔ قطر آنها (D_{50}) به‌ترتیب ۲۱، ۳۰/۵ و ۴۲ میلی‌متر بود؛ این سنگریزه‌ها درون جعبه‌ای ساخته‌شده از میلگرد شماره ۱۴ ریخته شد و با تور مخصوص مهار شد تا تخلخل‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۰٪ ایجاد شود. در حالت توری‌سنگی نیز با همان بلندی، سه ضخامت، سه دانه‌بندی و پنج آبدهی ورودی، مجموعاً ۴۵ آزمایش انجام شد تا اثر هندسه و دانه‌بندی مصالح بر جریان و اتلاف انرژی بررسی شود. دانه‌بندی مصالح مستقیماً بر تخلخل سازه و اندازهٔ تمرکز تلاطم اثرگذار است، به طوری که سنگریزه‌های درشت‌تر باعث افزایش تخلخل و کاهش تمرکز تلاطم می‌شوند. نمایی از جریان روی سازه در شکل ۴ نشان‌داده شده است.



(a) (الف)



(b) (ب)

شکل ۴- نمایی از جریان روگذر در سازه: الف) دید از بالا، ب) دید از جلو.

Figure 4- View of the overpass flow in the structure: a) Top view, b) Front view.

تجزیه و تحلیل ابعادی

به‌منظور بررسی اندازهٔ اتلاف انرژی در شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی، سنجه‌های موثر به‌شکل رابطه ۲ تعریف شد.

$$f_1 = (Q, \Delta E, \rho, \mu, g, h_g, X_g, d_{50}, y_1, y_2) = 0 \quad (۲)$$

Q: آبدهی جریان، ΔE: اتلاف انرژی، ρ: جرم مخصوص آب، μ: لزجت پویایی، g: شتاب گرانش زمین، h_g: بلندی شیب‌شکن، X_g: ضخامت شیب‌شکن، d_{50}: میانگین قطر ذرات توری‌سنگی، y_1: ژرفای بالادست سازه، y_2: ژرفای پایین‌دست سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی است.

با تجزیه و تحلیل ابعادی با روش پی باکینگهام و با انتخاب سه متغیر تکراری ρ، g و X_g و با تشابه عددی به‌دست آمده رابطهٔ ۲ به‌شکل رابطهٔ ۳ تغییر یافت.

$$f_2\left(\frac{\Delta E}{X_g}, \frac{Q}{\sqrt{g}X_g^{\frac{3}{2}}}, \frac{\mu}{\rho\sqrt{g}X_g^{\frac{3}{2}}}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g}, \frac{y_1}{X_g}, \frac{y_2}{X_g}\right) = 0 \quad (۳)$$

با توجه به متلاطم بودن جریان در تمام مدل‌های شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و ساده ($Re_u \geq 2000$) از سنجه بی‌بعد عدد رینولدز بالادست $\frac{\mu}{\rho\sqrt{g}X_g^{\frac{3}{2}}}$ صرف‌نظر شد. به‌دلیل جریان زیربحرانی، پایدار و مهارشده در بالادست سازه، در تمام مدل‌ها، از برخی سنجه‌هایی که وابستگی زیادی به عدد فرود داشتند، در تحلیل پایانی صرف‌نظر شد. این شرایط جریان، امکان بررسی دقیق اثر هندسه سازه و دانه‌بندی مصالح بر اتلاف انرژی را فراهم آورد و سبب شد تا نتایج مقایسه نمونه‌ها قابل اطمینان باشد. در این پژوهش، برای تحلیل نهایی ابعادی از رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده شد.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f_3\left(\frac{y_c}{X_g}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g}\right) \quad (۴)$$

$$\frac{y_1}{X_g} = f_4\left(\frac{y_c}{X_g}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g}\right) \quad (۵)$$

y_c: ژرفای بحرانی یک سنجه وابسته است که از آبدهی (Q) و هندسه کانال محاسبه شد.

بر پایهٔ رابطه‌های ۴ و ۵ اندازه‌های بدون بعد افت نسبی انرژی و ژرفای نسبی جریان برای تمام آزمایش‌ها محاسبه شد. نمودارهای مربوطه به‌منظور بررسی اثر سنجه‌های هندسی و دانه‌بندی مصالح بر اتلاف انرژی توری‌سنگی رسم و تحلیل شدند. ازاین‌رو، در رابطه‌های ۴ و ۵ ژرفای بحرانی به‌عنوان سنجه محاسبه‌ای لحاظ شد و متغیر مستقل نیست.

بر پایهٔ تجزیه و تحلیل ابعادی مشخص شد که اتلاف انرژی و ژرفای نسبی در بالادست شیب‌شکن قائم توری‌سنگی تابعی از ژرفای بحرانی نسبی، بلندی نسبی سازه و دانه‌بندی مصالح توری‌سنگی است.

روابط محاسبه اتلاف انرژی

در این پژوهش اتلاف انرژی در بالادست و پایین‌دست سازه به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شد.

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (۶)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (۷)$$

E_1 و E_2: به‌ترتیب انرژی در بالادست و پایین‌دست، y_1 و y_2: به‌ترتیب ژرفای بالادست و پایین‌دست، V_1 و V_2: به‌ترتیب میانگین سرعت در بالادست و پایین‌دست سازه و g: شتاب گرانش زمین است.

در این پژوهش اتلاف انرژی و اتلاف انرژی نسبی به‌ترتیب از رابطه‌های ۸ و ۹ محاسبه شد.

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (۸)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (۹)$$

سرانجام رابطه ۹ به‌شکل رابطه ۱۰ تغییر یافت.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \xi \quad (۱۰)$$

ξ: جایگزین نسبت $\frac{E_2}{E_1}$ است.

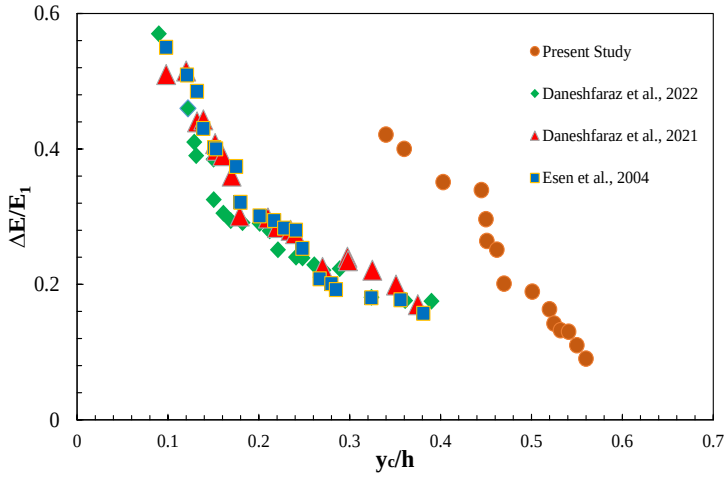
نتایج و بحث

در این پژوهش نتایج تمام آزمایش‌ها نشان‌دهندهٔ برخورد جریان با سازه توری‌سنگی و تشکیل همزمان جریان درون‌گذر و جریان روگذر بود، به‌طوری که فضای متخلخل توری‌سنگی پر از آب شد و جریان غیردارسی قابل‌توجهی از میان دانه‌های سنگی عبور کرد. با افزایش آبدهی ورودی، سهم جریان روگذر در مقایسه با جریان درون‌گذر افزایش یافت، به‌طوری که بخش بزرگی از جریان افزون بر عبور از فضای دانه‌ها، از روی سطح سازه نیز عبور کرد و به پایاب ریخت. فرآیند جریان در تمام آزمایش‌ها شامل دو مرحله بود. ابتدا غرق‌شدن تدریجی فضای متخلخل سازه و سپس ریزش متعادل و پایدار جریان به پایاب، که در آب‌دهی‌های بیشتر شدت بیشتری داشت و منجر به افزایش سهم جریان روگذر شد. این رفتار نشان‌دهندهٔ نقش پویای سازه توری‌سنگی در مهارکنندگی تلاطم و تقسیم جریان میان فضای متخلخل و سطح سازه بود. از سوی دیگر، راندمان آبی آن نیز به‌طور مستقیم تحت تأثیر آبدهی جریان بود. اثر دانه‌بندی مصالح نیز کاملاً قابل مشاهده بود؛ هرچه میانگین قطر دانه‌ها کمتر و مصالح ریزتر انتخاب شده بود، فضای متخلخل سریع‌تر پر شد و سازه زودتر به حالت غرقابی رسید. این موضوع باعث کاهش تمرکز تلاطم و کاهش اتلاف انرژی شد. از سوی دیگر، استفاده از مصالح درشت‌تر سرعت پر شدن فضای متخلخل را کاهش و سهم جریان درون‌گذر را افزایش داد. این موضوع باعث افزایش تمرکز تلاطم و اتلاف انرژی شد. افزون بر این، ترکیب دانه‌بندی مصالح، بلندی و ضخامت سازه و آبدهی جریان تعیین‌کننده نسبت جریان درون‌گذر و روگذر و رفتار پویایی جریان در پایاب بود و امکان مهار راندمان آبی سازه با تنظیم این سنجه‌ها فراهم شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد با انتخاب مناسب دانه‌بندی مصالح و هندسه سازه توری‌سنگی می‌توان سبب بهبود راندمان آبی، کاهش تلاطم و کاهش اتلاف انرژی شد و بررسی همزمان جریان درون‌گذر و روگذر، الگوی ارزشمندی برای بهبود طراحی این نوع سازه‌ها ارائه داد.

صحت‌سنجی نمونه شاهد با نتایج پژوهش‌های پیشین

در سازه شیب‌شکن قائم، هنگامی که جریان در بالادست زیر بحرانی باشد، اتلاف انرژی عمدتاً به‌دلیل برخورد مستقیم جت با کف استخر پایین‌دست و ایجاد تلاطم و گردابه‌های محلی در استخر زیر جت رخ می‌دهد. این برخورد باعث می‌شود که انرژی جنبشی جریان به آرامی در محیط آب کاهش و شدت جریان نیز در پایاب، کاهش یابد. روند تغییرات اتلاف انرژی نسبی در برابر ژرفای بحرانی نسبی برای سازه شیب‌شکن قائم ساده در شکل ۵ نشان‌داده شده است. نتایج نشان داد که رابطه میان اتلاف انرژی نسبی و ژرفای بحرانی نسبی معکوس است؛ یعنی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی (محور افقی نمودار)، اندازهٔ اتلاف انرژی (محور عمودی نمودار) کاهش یافت. این رفتار نشان داد با افزایش ژرفای بحرانی، تلاطم شدیدی ایجادنشده و انرژی جنبشی به کف نیز انتقال نیافته است در نتیجه اندازهٔ اتلاف انرژی کاهش یافت. تحلیل

این روند بیانگر آن است که نقش ژرفای بحرانی در توزیع انرژی جریان و شدت تلاطم در پایاب سازه، مهم است و تغییرات آن به‌طور مستقیم بر اندازهٔ اتلاف انرژی اثرگذار است. به‌بیان دیگر، سازه شیب‌شکن قائم در شرایط جریان زیربحرانی، با تغییر ژرفای بحرانی جریان سبب مهار تلاطم و کاهش انرژی جنبشی جریان در پایاب شد. این روند معکوس میان ژرفای بحرانی نسبی و اتلاف انرژی، شاخص قابل فهم و ملموسی برای تحلیل راندمان آبی سازه‌ها به‌شمار می‌آید. برای صحت‌سنجی، نتایج به‌دست آمده از نمونه شاهد با داده‌های آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۲) و اسن و همکاران (۲۰۰۴) مقایسه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که روند کلی کاهش اتلاف انرژی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی در هر سه مجموعه داده مشابه است و این تطابق هم از نظر شیب تغییرات و هم از نظر دامنه اندازه‌های تجربی قابل مشاهده بود. در این راستا نمودارها بیانگر رفتار معکوس میان ژرفای بحرانی نسبی و اندازهٔ اتلاف انرژی در تمام داده‌ها بودند. نتایج این پژوهش با یافته‌های پیشین هم‌راستا است، به طوری که می‌توان آن را به‌عنوان یک الگوی کیفی و کمی برای اعتبار مدل آزمایشگاهی در نظر گرفت.



شکل ۵- مقایسه روند تغییرات اتلاف انرژی نسبی نمونه شاهد با دیگر پژوهشگران.

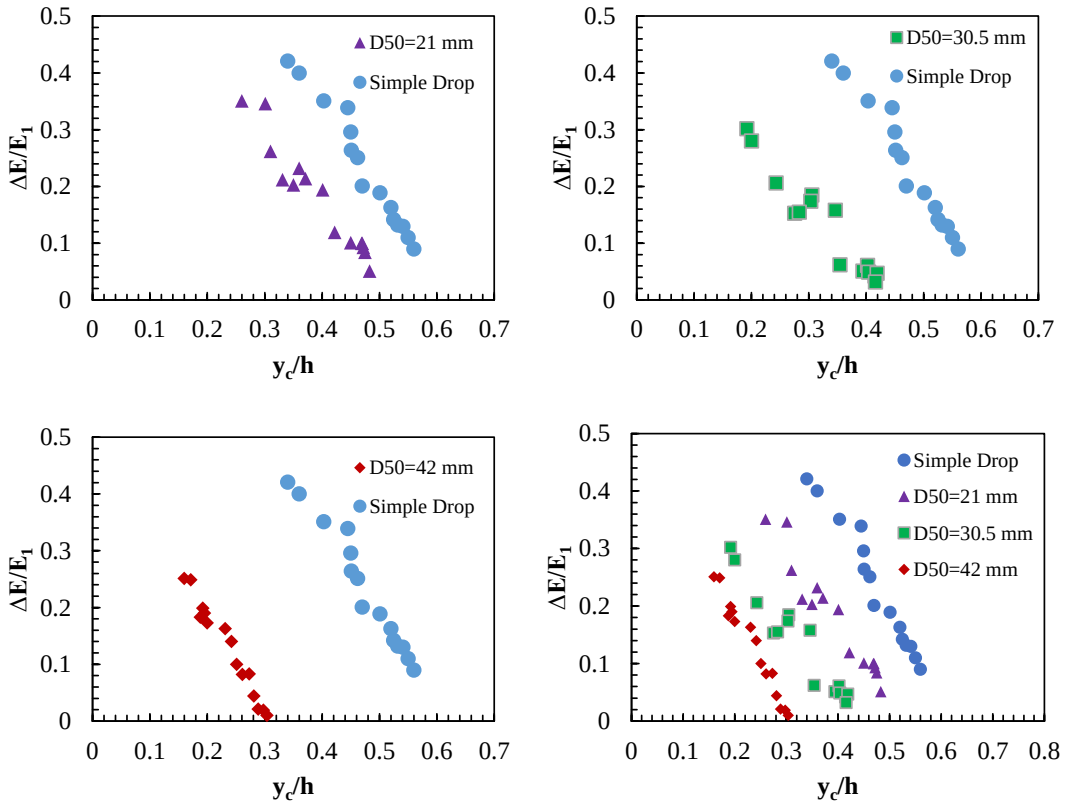
Figure 5- Comparing the trend of changes in relative energy consumption of the control sample with other researchers.

اتلاف انرژی نسبی در شیب‌شکن قائم توری‌سنگی

یکی از سنجه‌های مهم در طراحی سازه شیب‌شکن اتلاف انرژی است. در این پژوهش نتایج بررسی و مقایسه اتلاف انرژی نسبی کل برای سه ضخامت شیب‌شکن قائم برای هر دو سازه توری‌سنگی و ساده و همچنین سه نوع دانه‌بندی مختلف برای سازه توری‌سنگی در مقابل ژرفای بحرانی نسبی در شکل ۶ نشان‌داده شده است. بر پایهٔ شکل ۶، روند نمودار اتلاف انرژی نسبی در برابر ژرفای بحرانی نسبی در هر دو نمونه شیب‌شکن ساده و توری‌سنگی نزولی بود و با افزایش ژرفای بحرانی نسبی، اندازهٔ اتلاف انرژی کاهش یافت. با به‌کارگیری توری‌سنگی به جای نمونه سازه ساده مشاهده شد که اتلاف انرژی به‌طور چشمگیری افزایش یافت. بر پایهٔ شکل ۶، برای یک اندازه ذرات توری‌سنگی ثابت با افزایش ضخامت توری‌سنگی (X_g) اندازهٔ اتلاف انرژی افزایش یافت. افزون بر این، به ازای یک ضخامت ثابت (X_g)، با افزایش اندازه ذرات توری‌سنگی، اندازهٔ اتلاف انرژی افزایش یافت. ازاین‌رو، هرچه ذرات توری‌سنگی ریزتر باشند، اندازهٔ اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. یعنی برای یک مدل سازه توری‌سنگی با ضخامت ثابت، مدل با اندازه میانگین ذرات ۴۲ میلی‌متر در مقایسه با مدل‌های با اندازه میانگین ذرات ۳۰/۵ و ۲۱ میلی‌متر به‌دلیل این که

اندازهٔ جریان درون‌گذر در مقایسه با جریان روگذر بیشتر است و سازه در بازه زمانی بیشتری مستغرق است در نتیجه اندازهٔ اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت، با کاهش اندازه ذرات توری‌سنگی وضعیت جریان خیلی سریع به حالت روگذری تغییر می‌یابد. این موضوع با استغراق سازه توری‌سنگی و کاهش اتلاف انرژی همراه است.

از دیدگاه مهندسی و اقتصادی، اندازه ذرات توری‌سنگی و اندازهٔ تخلخل سازه توری‌سنگی و کاهش یا بی‌اثر بودن و دخالت فضای متخلخل در اتلاف انرژی ویرانگر ناشی از آن، می‌تواند مدنظر مهندسان و طراحان باشد. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که هرچه ذرات توری‌سنگی درشت‌تر باشد، عبور جریان از فضای داخلی سازه آسان‌تر است و مقاومت جریان کمتر است و اندازهٔ اتلاف انرژی در مقایسه با اندازه‌های ریزتر بهتر است. ازاین‌رو، گزینه مناسبی برای طراحی و ساخت است. نتایج نشان داد با افزایش ضخامت سازه توری‌سنگی، اندازهٔ اتلاف انرژی افزایش یافت. یعنی مدل با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر (X_g=40 cm) و میانگین اندازه ذرات برابر با ۴۲ میلی‌متر (D_{50}=42 mm) در مقایسه با ضخامت‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر انرژی بیشتری را کاهش داد. افزون بر این، از دیدگاه مهندسی با افزایش ضخامت سازه، اندازهٔ پایداری سازه و مهار کردن آن و هزینه اجرا و نگهداری آن نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی از میان مدل‌های بررسی‌شده در این پژوهش بهترین مدل سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی برای اتلاف انرژی، شیب‌شکن با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر (X_g=40 cm) بود. در مقایسه با نمونه ساده شیب‌شکن ۶۰٪ انرژی جریان را بیشتر کاهش داد و این مزیت مهمی در مقایسه با نمونه ساده بود که بسته به اندازهٔ حساسیت طرح از دیدگاه فنی و اقتصادی، سنجه‌های نامبرده را می‌توان تغییر داد و سازه با ابعاد دیگری انتخاب کرد.



شکل ۶- نمودار روند تغییرات اتلاف انرژی و ژرفای بحرانی نسبی برای ضخامت و دانه‌بندی‌های مختلف سازه شیب‌شکن توری‌سنگی.

Figure 6- Trend chart of changes in energy dissipation and relative critical depth for different thicknesses and grain sizes of gabion drop structures.

آب‌دهی‌های درون‌گذر (Q_{in}) و روگذر (Q_{over})

در سازه‌های توری‌سنگی، خصوصاً سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، محاسبه آبدهی عبوری از سازه موضوع بسیار مهمی در طراحی است. افزون بر این، اندازهٔ اتلاف انرژی نیز بسیار اثرگذار است. نتایج نشان داد در سازه نامبرده، جریان هم به‌شکل روگذر و هم به‌شکل درون‌گذر از سازه عبور کرد.

در این پژوهش به‌منظور محاسبه اندازه‌های هر دو آبدهی روگذر و درون‌گذر ابتدا در محدوده روی سازه به‌وسیلهٔ میکرومولینه فرآیند سرعت‌سنجی انجام شد. بر اساس عرض فلوم ۶۰ سانتی‌متری، روی سازه، در یک ژرفای مشخص، در فاصله عرضی فلوم در بازه‌های ۵ سانتی‌متری (در ابتدا و انتهای فاصله عرضی این اندازهٔ برابر ۷/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد) و در ژرفایی در بازه ۵ میلی‌متری سرعت به‌وسیله میکرومولینه برداشت شد. سرانجام، میانگین سرعت‌ها محاسبه شد. سپس، بر اساس اندازه‌های میانگین سرعت و سطح مقطع (A=by) مشخص‌شده و با استفاده از رابطه ۱۱ اندازهٔ آبدهی روگذر محاسبه شد. سرانجام، با کم‌کردن اندازهٔ آبدهی روگذر از آبدهی کل، اندازهٔ آبدهی درون‌گذر با استفاده از رابطهٔ ۱۳ محاسبه شد.

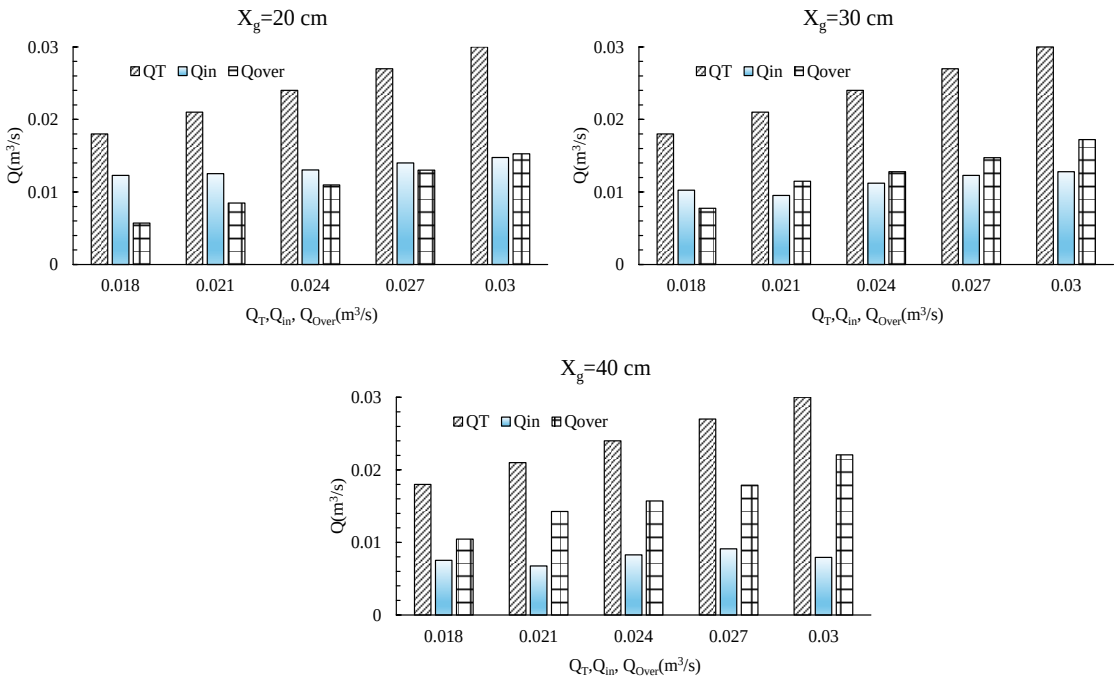
$$Q = A.V \quad (۱۱)$$

$$Q_T = Q_{in} + Q_{over} \quad (۱۲)$$

$$Q_{in} = Q_T - Q_{over} \quad (۱۳)$$

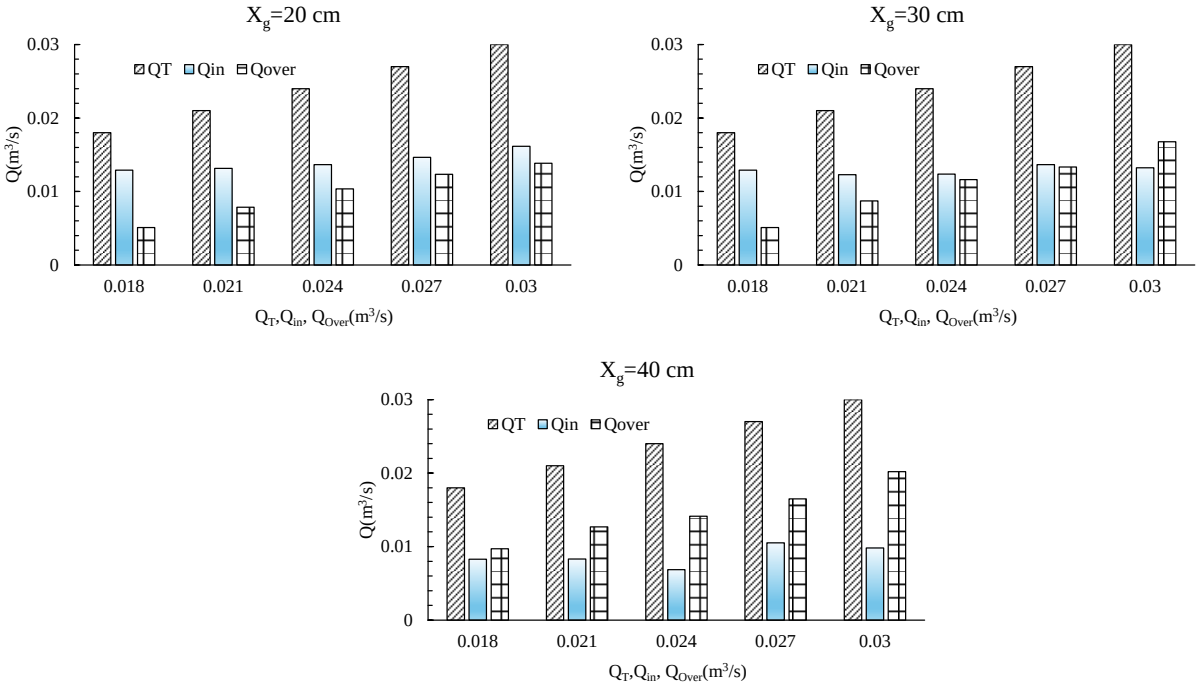
Q_T: آبدهی کل جریان، Q_{in}: آبدهی درون‌گذر از سازه و Q_{over}: آبدهی روگذر است.

نمودارهای مربوط به آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت‌ها و شرایط مختلف در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان‌داده شده است.



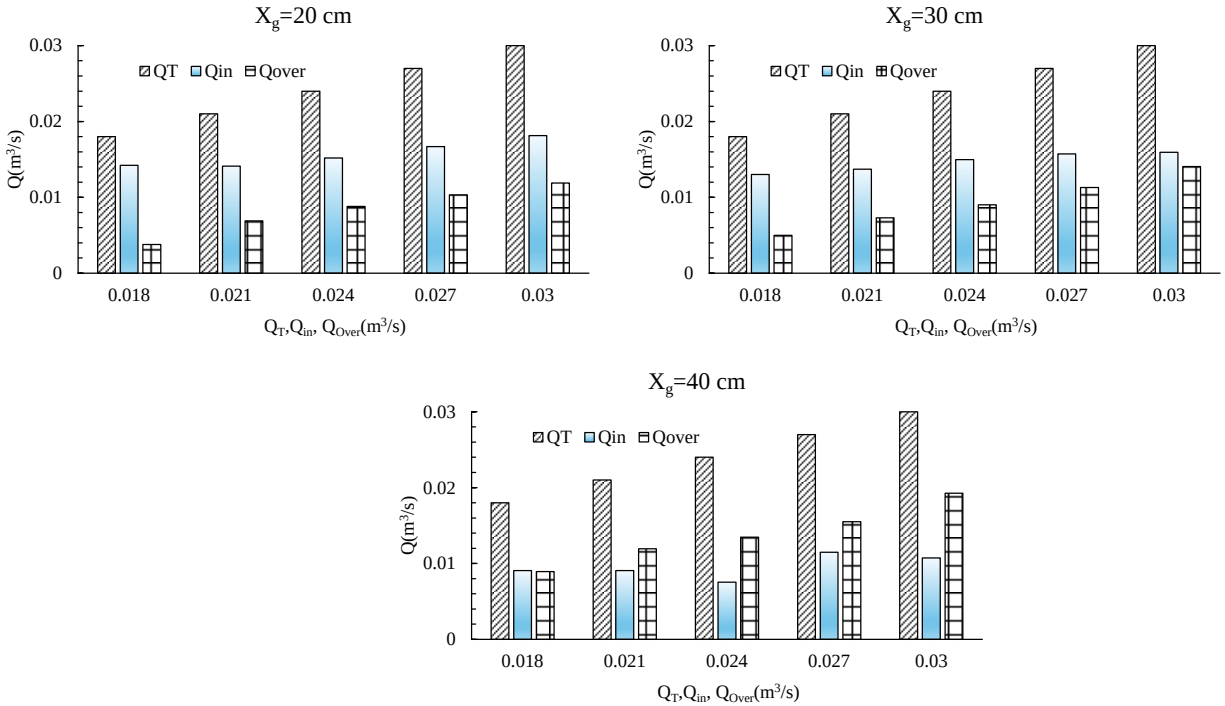
شکل ۷- نمودار مقایسه آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت D_{50}=21 mm.

Figure 7- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of D_{50}=21 mm.



شکل ۸- نمودار مقایسه آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت D_{50}=30.5 mm.

Figure 8- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of D_{50}=30.5 mm.



شکل ۹- نمودار مقایسه آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت D_{50}=42 mm.

Figure 9- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of D_{50}=42 mm.

بر پایهٔ نمودارها، مشخص شد که هرچه اندازه ذرات توری‌سنگی درشت‌تر باشد، اندازهٔ آبدهی روگذر کاهش یافته و اندازهٔ آبدهی درون‌گذر افزایش می‌یابد. به‌بیان دیگر، جریان بیشتری از فضای متخلخل توری‌سنگی عبور کرد و سهم جریان روی سطح سازه کاهش یافت. برای نمونه، اندازهٔ آبدهی روگذر در حالت توری‌سنگی ریزدانه با میانگین قطر ۲۱ میلی‌متر بیشتر از حالت میان‌دانه ۳۰/۵ میلی‌متر بود و این حالت نیز از آبدهی روگذر در حالت درشت‌دانه ۴۲ میلی‌متر بیشتر بود. این روند نشان داد که نقش اندازه ذرات و تخلخل مصالح در توزیع جریان روگذر و درون‌گذر مهم است و بر اتلاف انرژی و رفتار آبی سازه به‌طور مستقیم اثرگذار است. این موضوع در ارتباط با آبدهی درون‌گذر بر اساس اندازه ذرات، برعکس است. زیرا، هرچه ذرات درشت‌تر باشند، فضای خالی داخلی توری‌سنگی افزایش یافته و مدت زمان بیشتری لازم است تا سازه مستغرق شود، در نتیجه جریان بیشتری از داخل سازه عبور می‌کند. ازاین‌رو، سهم جریان روگذر در این حالت در مقایسه با حالت مشابه با ذرات ریزتر، کمتر شد. افزون بر این، با افزایش ضخامت توری‌سنگی (Xg)، آبدهی درون‌گذر کاهش و آبدهی روگذر افزایش یافت. یعنی، برای حالت توری‌سنگی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر اندازهٔ آبدهی روگذر از حالت ۳۰ و ۲۰ سانتی‌متر بیشتر بود و حالت ۳۰ سانتی‌متر از حالت ۲۰ سانتی‌متر نیز بیشتر بود. زیرا، در این حالت، سازه در مدت زمان کمتری مستغرق است و سهم آبدهی روگذر در مقایسه با مدل مشابه با ضخامت کمتر، بیشتر بود و در نتیجه جریان درون‌گذر در مقایسه با روگذر کمتر شد.

افزون بر این، بدیهی است که با افزایش آبدهی نیز آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر افزایش یافت. شایان ذکر است که در حالت نمونه شاهد یا سازه ساده، کل جریان عبوری به‌شکل روگذر بود. آبدهی جریان درون‌گذر در این حالت به‌دلیل عایق‌سازی کامل سازه و نبودن مسیر عبور برای جریان درون‌گذر، عملاً برابر با صفر در نظر گرفته شد. افزون بر این، این اندازهٔ به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد و به‌دلیل طراحی و شرایط آزمایشگاهی بود که جریان از داخل سازه عبور نکرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش همکنش جریان و اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم ساده و سپس تلفیق آن با توری‌سنگی با مدل‌سازی فیزیکی بررسی شد. در این راستا، روی سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و نمونه شاهد آزمایش‌هایی انجام و نتایج با هم مقایسه شد. در این پژوهش، نتایج تجزیه و تحلیل ابعادی نشان داد که سنجه‌های آبی، ازجمله اتلاف انرژی نسبی و ژرفای بالادست، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، به‌شکل تابعی از ژرفای بحرانی نسبی، بلندی نسبی سازه، ضخامت سازه و میانگین قطر ذرات توری‌سنگی بودند. این رابطه‌ها نشان‌دهنده وابستگی ابعادی و روند کلی اثر سنجه‌ها بر پاسخ آبی بودند و رابطه‌های فیزیکی دقیقی نیستند، بلکه می‌توان آنها را به‌عنوان چارچوبی برای تحلیل و تعمیم نتایج آزمایشگاهی در مقیاس مدل به‌کار گرفت.

نتایج این پژوهش نشان داد در تمام مدل‌های سازه شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی، رابطه اندازهٔ اتلاف انرژی نسبی با ژرفای بحرانی نسبی، معکوس است. یعنی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی اندازهٔ اتلاف انرژی نسبی کاهش یافت. از سوی دیگر، با افزایش اندازه ذرات توری‌سنگی، حجم آب عبوری از محیط متخلخل سازه و به‌دنبال آن اندازهٔ اتلاف انرژی افزایش یافت. یعنی، هرچه ذرات توری‌سنگی ریزتر بودند، اندازهٔ اتلاف انرژی نیز کاهش یافت.

رابطه اندازه ذرات توری‌سنگی با زمان مستغرق شدن سازه و شروع جریان روگذر مستقیم بود. رابطه ضخامت شیب‌شکن نیز با اندازهٔ اتلاف انرژی نیز مستقیم بود و مشاهده شد هرچه ضخامت سازه بیشتر باشد، اتلاف انرژی در مقایسه با ضخامت‌های کمتر به‌وسیلهٔ سازه، بیشتر است.

افزایش ضخامت شیب‌شکن باعث شد که سازه در مدت زمان کمتری مستغرق شود. ازاین‌رو، اتلاف انرژی افزایش یافت.

در میان مدل‌های بررسی‌شده در این پژوهش، بهترین مدل در اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، مدل با ضخامت (X_g=40 cm) و میانگین اندازه ذرات (d50=42 mm) بود.

در تمام آزمایش‌ها، هنگام عبور جریان از روی سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، هم جریان درون‌گذر از فضای متخلخل توری‌سنگی و هم جریان روگذر از روی سطح سازه شکل گرفت. با افزایش آبدهی جریان و پرشدن فضای متخلخل، سازه تقریباً مستغرق شد، اما با این حال بخش قابل توجهی از جریان همچنان به‌شکل روگذر از روی سازه عبور کرد. ازاین‌رو، حتی در شرایطی که سازه کاملاً غرقابی به نظر می‌رسید، جریان درون‌گذر و روگذر به‌طور همزمان برقرار بود و سهم هر یک از این جریان‌ها بسته به آبدهی ورودی و تخلخل مصالح متفاوت بود.

تلفیق سازه توری‌سنگی با شیب‌شکن قائم در مقایسه با شیب‌شکن ساده، سبب افزایش قابل توجه اتلاف انرژی شد. در این راستا، مدل شیب‌شکن قائم توری‌سنگی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و میانگین قطر ذرات ۴۲ میلی‌متر، اتلاف انرژی جریان را تا ۶۰٪ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد.

در حالت کلی، ژرفای آب بالادست سازه در نمونه شیب‌شکن ساده بیشتر از نمونه توری‌سنگی بود. افزون بر این، ژرفای آب بالادست سازه توری‌سنگی به‌طور مستقیم به میانگین اندازه قطر ذرات توری‌سنگی، ضخامت سازه و آبدهی جریان ورودی بستگی داشت، به‌طوری که این رفتار در تمام آب‌دهی‌های بررسی‌شده ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، بود.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، انواع دیگر شیب‌شکن (شیب‌شکن‌های مایل و لوله‌ای) و اثر تلفیق توری‌سنگی با سازه شیب‌شکن و بر اندازهٔ آبشستگی پایین‌دست، به‌شکل عددی و آزمایشگاهی بررسی شوند. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از نتایج این پژوهش در طراحی و اجرای شیب‌شکن‌های توری‌سنگی در طرح‌های آبخیزداری استفاده شود. زیرا، با بهره‌گیری از این نتایج می‌توان پایداری سازه‌های آبخیزداری را افزایش داد و ویرانی در پایین‌دست را کاهش داد. این موضوع سبب افزایش عمر مفید سازه خواهد شد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

نویسندهٔ سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

نویسندهٔ چهارم و پنجم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

فهرست منابع

Afzalian A, Ahadian J. 2016. Piano key weirs with positive parapet wall. Water and Soil Science. 25(4/2): 97-107. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4630.html?lang=en

Alasvand K, Ahadian J, Fathian H. 2012. Modeling of pattern and dissipating energy in the gabion stepped spillway using the Flow-3D model. Journal of Water Science and Engineering. 1(3): 89-97. https://sid.ir/paper/235537/en

Bagherzadeh M, Mohammadi M, Daneshfaraz R, Dasineh M. 2021. Comparison of hydraulic parameters of simple and Gabion inclined drops with stilling basin in the downstream of the structure. International Science and Innovation Congress. pp. 39-45.

Bakhmeteff MW. 1932. Hydraulics of open channels, New York and London, McGraw-Hill book com pany, Inc.

Castejon M, Romero–Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of Orobanche cornea in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. Parasitic flowering plants. Marburg, F.R.G. Civil Infrastracture Research pp. 121–126.

Daneshfaraz R, Majedi-Asl M, Mortazavi AS, Bagherzadeh M. 2022. Laboratory evaluation of energy dissipation in the combined structure of the vertical drop with gabion. Civil Infrastructure Researches. 8(1): 45-157.
https://doi.org/10.22091/cer.2022.7720.1344

Daneshfaraz R, Asl MM, Razmi S, Norouzi R, Abraham J. 2020. Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. International Journal of Environmental Science and Technology. pp. 1-10.

Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Ghaderi A, Di Francesco S, Asl MM. 2021. Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. Ain Shams Engineering Journal. 12(4): 3451-3459.

Daneshfaraz R, Ghaderi A, Di Francesco S, Khajei N. 2021. Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop. Water Supply. Volume 21, Issue 5 August 2021. https://doi.org/10.2166/ws.2021.077

Daneshfaraz, R, Hasannia V, Norouzi R, Sihag P, Sadeghfam S, Abraham J. 2021. Investigating the effect of horizontal screen on hydraulic parameters of vertical drop. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. pp. 1-9.

Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2020. Experimental analysis of inclined Gabion drop behavior in comparison to the standard stilling basins (USBR). Iranian Journal of Soil and Water Research. 51(10): 2531-2541. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.303078.668625

Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2021. Experimental investigation of the energy dissipation and the downstream relative depth of pool in the sloped Gabion drop and the sloped simple drop. Amirkabir Journal. Civil Engineering. 53(9): 3665-3678.

Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2021. Experimental investigation of the performance of inclined Gabion drop equipped with a horizontal screen. Iranian Journal of Soil and Water Research. 52(1): 81-93. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.308412.668705

Daneshfaraz R, Sadeghfam S, Hasanniya V. 2019. Experimental investigation of energy dissipation in vertical drops equipped with a horizontal screen under supercritical flow. Iranian Journal of Soil and Water Research. 50(6): 1421-1436.

Esen II, Alhumoud JM, Hannan KA. 2004. Energy loss at a drop structure with a step at the base. Water International. 29(4): 523-529.

Hager WH, Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. Journal of Hydraulic Research. 27(5): 565-585.

Hajialigol S, Ahadiyan J, Sajjadi M, Rita Scorzini A, Di Bacco M, Shafai Bejestan M, 2021. Cross-beam dissipators in abruptly expanding channels: experimental analysis of flow patterns. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 147(11): 06021012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622

Kabiri-Samani AR, Bakhshian E, Chamani MR. 2017. Flow characteristics of grid drop-type dissipators. Flow Measurement and Instrumentation. 54: 298-306.

Liu SI, Chen JY, Hong YM, Huang HS, Raikar RV. 2014. Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. Journal of Marine Science and Technology. 22(4): 476-486.

Majedi Asl M, Daneshfaraz R, Chabokpour J, Ghorbani B. 2021. Laboratory study of the performance of Gabion sill on the energy dissipation of downstream of ogee weirs. Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(1): 67-80. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.309322.668725

Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Esmaeeli R, Norouzi R, Abraham J. 2021. Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. Water Supply. 21(1): 217-231.

Kheybar H, Sajjadi SM, Ahadiyan J. 2021. Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. Irrigation and Drainage. 70(5): 1145-1154. https://doi.org/10.1002/ird.2622

Kheybar H, Sajjadi SM, Ahadiyan J, Ghomeshi M. 2025. Investigating the discharge coefficient and efficiency of the pivot side weirs with threshold. Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment. 3(2): 72-88. https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096

Mirzaee R, Hosseini K, mousavi F. 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. Journal of Hydraulics. 16(1): 23-36. https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.256774.1486

Moore WL. 1943. Energy loss at the base of a free overfall. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 108(1): 1343-1360.

Pagliara S, Chiavaccini P. 2006. Energy dissipation on block ramps. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 132(1): 41-48.

Peyras LA, Royet P, Degoutte G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. Journal of hydraulic Engineering. 118(5): 707-717.

Rajaratnam N, Chamani MR. 1995. Energy loss at drops. Journal of Hydraulic Research. 33: 373-384.

Rand W. 1955. Flow geometry at straight drop spillways. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 81(9): 1-13.

Sarkamaryan S, Ahadiyan J. 2020. Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model. Irrigation Sciences and Engineering. 43(1): 43-56. https://doi.org/10.22055/jise.2017.22269.1593

USDA–National Agricultural Statistics Service. 2000. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at http://www.nass.usda.gov:81/ipedb/ (accessed 15 May 2001; verified 24 Aug. 2001. USDA–NASS, Washington, DC. USA.

White MP. 1943. Discussion of "Energy Loss at the Base of a Free Overfall" by W. L. Moore. Transactions of the American Society of Civil Engineers (Transactions, ASCE). 108: 1361–1364.

Wüthrich D, Chanson H. 2014. Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir. Journal of Hydraulic Engineering. 140(9): 04014046.

Yarmohammadi B, Ahadian J. 2016. Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. Irrigation Sciences and Engineering. 39(4): 47-58. https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Laboratory Investigation of Water Flow Interaction and Energy Dissipation Phenomenon in a Vertical Gabion Drop Structure

Keyvan Kazemi Hasanvand[1], Hojatollah Younesi*[2], Amir Hamzeh Haghiabi[3], Rasoul Daneshfaraz[4], Babak Shahinezhad[5]

1- Ph.D., Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Associate Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

4- Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Maragheh University, Maragheh, Iran

5- Assistant Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The gabion vertical drop structure, as one of the modern hydraulic structures, is widely used in watershed management projects and structural operations. The structure is a combination of permeable rock mesh units that dissipate fluid kinetic energy by creating a water level difference between upstream and downstream. The passage of flow through the porous pores of the structure reduces the intensity of bed shear stresses and moderates the peak instantaneous discharges, thereby reducing the rate of channel erosion. Due to the limitations of previous research in comparing the performance of gabion and rigid structures, this researcch investigated the flow behavior and energy dissipation amount using a laboratory approach, and analyzed their functional differences in flood management and local erosion control. The importance of these structures in unstable riverbeds and vulnerable supercritical flow environments is twofold in promoting the hydrological and environmental sustainability of systems.

Materials and Methods

This research was conducted in the Hydraulic Laboratory of Lorestan University, in 2024-2025, using a flume with a length of 11 m, a width of 0.6 m, and a height of 0.5 m. To comprehensively analyze the hydraulic behavior, a total of 60 experiments were designed and conducted on two types of vertical drop structures: rigid and gabion.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** yonesi.h@lu.ac.ir

Citation: Kazemi Hasanvand, K., Younesi, H., Haghiabi, A.H., Daneshfaraz, R., Shahinezhad, B. 2026. Laboratory Investigation of Water Flow Interaction and Energy Dissipation Phenomenon in a Vertical Gabion Drop Structure. Watershed Management Research. 39(3): 45-63.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.371743.1653

Received: 02 January 2026, **Received in revised form:** 26 February 2026, **Accepted:** 19 March 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 45-63.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

In these experiments, three structural thicknesses (Xg) of 20, 30, and 40 cm were investigated in combination with five flow rates of 18, 21, 24, 27, and 30 $L.s^{-1}$ for the control sample. For the gabion samples, three effective porosity levels of 30, 35, and 40 percent were employed, using three categories of gravel materials—fine, moderate, and coarse—with average diameters (D_{50}) of 21, 30.5, and 42 mm, respectively. Also, in all models, the structure height was kept constant at 32 cm to ensure comparision of conditions.

Results and Discussion

Analysis of the obtained data showed that in all models, the relationship between the flow energy dissipation parameter and the relative critical depth was inverse; so that with increasing energy dissipation efficiency, the relative critical depth decreases, and this trend was observed in all experimental scenarios.The findings showed that the combining of the drop structure with a gabion bed significantly increased the energy dissipation of the flow, such that the use of gabions improved energy dissipation efficiency by approximately 60% compared to the rigid drop. The flow passing through the gabion models was divided into two modes: overpass and throughpass, ın the throughpass state, the quasi-non-Darcy and nonlinear flow passed through the porous moderate, and the main contribution of energy dissipation was related to this state. Furthermore, increasing the size of the gabion core particles and the effective width of the structure enhanced the energy dissipation process. Finally, the overpass and throughpass discharge values were calculated for all scenarios, and these data can be used as a valuable template for hydraulic modeling and improving the design of similar structures.

Conclusion and Suggestions

In this study, the interaction of water flow and energy dissipation in two types of vertical drop structures: rigid and gabion, were investigated experimentally. The results showed that by using a gabions type and creating a porous and permeable environment, the flow energy can be reduced, thus reducing the need for additional structures such as stilling basins or mesh plates. Furthermore, the effect of parameters such as aggregate particle size, gabion porosity, and structure thickness on energy dissipation efficiency and the share of inflow and overflow was significant. The findings indicate that the use of vertical gabion drops in water transfer projects in steep and mountainous areas is more efficient and sustainable than the rigid model from a technical and economic perspective. In addition, the results of this research can be used to improve the design of vertical gabion drops in watershed management plans.

Keywords: Critical depth, hydraulic resistance, inpass flow, overpass flow, physical model, turbulent flow

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available to the audience by correspondence with the responsible author.

Authors' Contribution

First Author: Conceptualization, software/statistical analyses, writing the first version of the article

Second Author: Guidance, editing and reviewing the article, controlling the results

Third Author: Conceptualization, consultation, manuscript review, statistical analyses

Fourth and Fifth Authors: Conceptualization, consultation, manuscript review, statistical analyses

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

یادگیری تقویتی چارچوبی به‌منظور پهنه‌بندی سیل در مناطق کوهستانی با استفاده از مدل Deep Q-Learning

صالح یوسفی*[۱]، سارا مردانیان[۲] احمدرضا کریمی‌پور[۳]

۱- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

۲- محقق بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

۳- مربی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

درک خطر سیلاب‌ها و تلاش برای کاهش آن از اولویت‌های اصلی پژوهشگران و سیاست‌گذاران است. پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب ابزار مهمی برای مدیریت خطر در مناطق کوهستانی به‌شمار می‌آید. زیرا، می‌توان مناطق آسیب‌پذیر را شناسایی کرد و بستر برنامه‌ریزی مکانی، آمادگی و اقدامات پیشگیرانه را فراهم آورد. رویکردهای سنتی نقشه‌برداری سیلاب مانند مدل‌سازی آب‌شناختی و تحلیل داده‌های تاریخی اغلب با محدودیت‌هایی چون کمبود داده، پیچیدگی محاسباتی و پویایی ساختارهای محیطی روبه‌رو هستند. ازاین‌رو، روش‌های نوین هوش مصنوعی به‌ویژه یادگیری ماشین و یادگیری تقویتی برای پردازش داده‌های گوناگون و شناسایی الگوهای پیچیده به‌کار گرفته شده‌اند. در میان رویکردهای هوش مصنوعی، یادگیری تقویتی به‌دلیل قابلیت تعامل با محیط و بهبود تدریجی تصمیم‌گیری، نویدبخش است. با به‌کارگیری مدل Deep Q-Learning (DQL) به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته یادگیری تقویتی، می‌توان امکان کار با فضاهای حالت پیوسته و ابعاد بزرگ بدون نیاز به گسسته‌سازی را فراهم آرود. این پژوهش با هدف بهره‌گیری از مدل DQL برای تهیه نقشه حساسیت به سیلاب در استان چهارمحال و بختیاری با مناطق کوهستانی نیمه‌خشک و آسیب‌پذیر از سیلاب‌های ناگهانی ناشی از ذوب برف و بارش‌های شدید، انجام شد. هدف اصلی، ارزیابی خطر سیلاب و ارائه چارچوبی دقیق برای سیاست‌گذاران به‌منظور مدیریت بحران، کاهش خطر و بهبود تاب‌آوری به‌ویژه در شهرستان‌های آسیب‌پذیر همچون اردل و لردگان بود.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** ssaleh.yousefi@gmail.com
استناد: یوسفی، ص.، مردانیان، س.، کریمی‌پور، ا.ر. ۱۴۰۵. یادگیری تقویتی چارچوبی به‌منظور پهنه‌بندی سیل در مناطق کوهستانی با استفاده از مدل Deep Q-Learning. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۷۸-۶۴.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.371991.1656

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۹، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۶۴ تا ۷۸.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، فهرست رخدادهای سیل شامل ۵۴۵ نقطه مکانی (۳۴۶ نقطه با سیلاب و ۱۹۹ نقطه بدون سیلاب) در بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳ گردآوری شد. به‌طور تصادفی و لایه‌ای، ۷۱٪ از داده‌ها برای آموزش (۳۸۹ نقطه) و ۲۹٪ آن برای آزمون (۱۵۶ نقطه) استفاده شد. ابتدا ۲۱ متغیر محیطی از منابع مختلف شامل مدل رقومی ارتفاع، سری زمانی اقلیمی، تصویرهای لندست ۹ و پایگاه SoilGrid استخراج شد. پس از انجام تحلیل هم‌خطی، چهار متغیر حذف و ۱۷ متغیر نهایی (بلندی، تجمع جریان، جهت جریان، پیوستگی جریان، جهت جغرافیایی، طول شیب، انحنای افقی، نیم‌رخ، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، ژرفا تا بستر سنگی، بیشینه بارش ۲۴ ساعته، دماهای میانگین و بیشینه، ژرفای برف، NDVI، درصد ماسه سطحی و فاصله از مناطق مسکونی) انتخاب شد. از مدل Deep Q-Learning برای پردازش متغیرهای پیوسته و تولید نقشه حساسیت به سیلاب استفاده شد. این نقشه به پنج رده (خیلی‌کم تا خیلی‌زیاد) طبقه‌بندی شد. دقت مدل به‌وسیلهٔ شاخص‌هایی مانند AUC، Kappa، Recall، Precision، Specificity و LogLoss ارزیابی شد.

نتایج و بحث

نقشه طبقه‌بندی با استفاده از مدل Deep Q-Learning (DQL) و بر اساس روش Natural break تهیه شد. در این نقشه، سطح منطقه مطالعه‌شده (۱۶۵۵۳۰۰ هکتار) به پنج طبقهٔ حساسیت به سیلاب شامل خیلی‌کم (۶٪، برابر با ۹۷۲۲۱ هکتار)، کم (۲۰٪، برابر با ۳۳۶۱۹۰ هکتار)، متوسط (۲۶٪، برابر با ۴۲۹۴۵۳ هکتار)، زیاد (۲۶٪، برابر با ۴۳۵۲۹۳ هکتار) و خیلی‌زیاد (۲۲٪، برابر با ۳۵۷۱۴۰ هکتار) تقسیم شد. شاخص‌های ارزیابی دقت، نشان‌دهنده کارایی بسیارخوب مدل بودند. نتایج شاخص AUC (۰/۹۳) بیانگر توانایی تفکیک عالی، شاخص Kappa (۰/۷۲) بیانگر توافق قابل‌قبول میان پیش‌بینی و واقعیت، شاخص Recall (۰/۸۷) بیانگر شناسایی زیاد نقاط سیلابی، بود. شاخص Precision برابر با ۰/۹۰ ، Specificity برابر با ۰/۸۵ و LogLoss برابر ۰/۶۵، محاسبه شد. تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد بیشترین اثر مربوط به ژرفای برف بود که بر ذوب برف در سیلاب‌های بهاره بسیار اثرگذار است. پس از آن تجمع جریان (ویژگی‌های پستی‌بلندی)، فاصله از مناطق مسکونی (اثرات انسانی و توسعه شهری)، شاخص NDVI (پوشش گیاهی و نفوذپذیری)، دمای میانگین (شرایط اقلیمی) و طول شیب بودند. مناطق با حساسیت خیلی‌زیاد عمدتاً در نواحی پست، دره‌ها و امتداد رودهای اصلی مانند کارون و زاینده‌رود به‌ویژه در شهرستان‌های اردل و لردگان بودند. مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده نشان داد که با کاربرد مدل DQL می‌توان خطر سیلاب در محیط‌های ناهمگن کوهستانی را به‌طور قابل قبول‌تری پیش‌بینی کرد و خطر سیلاب را با دقت بیشتری مدیریت کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که مدل Deep Q-Learning (DQL) به‌عنوان یک روش یادگیری تقویتی عمیق، کارایی زیادی در پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب به‌ویژه در مناطق پیچیده کوهستانی مانند استان چهارمحال و بختیاری دارد. با بهره‌گیری از این مدل و با پردازش متغیرهای محیطی پیوسته و شناسایی دقیق روابط غیرخطی، نقشه‌های معتبر و کاربردی تولید شد و بر اساس آن مناطق پرخطر به‌طور دقیق شناسایی شد. نتایج این پژوهش مؤید آن است که عامل‌های اصلی سیلاب در منطقه مطالعه‌شده شامل ذوب برف، ویژگی‌های پستی‌بلندی، توسعه انسانی و کاهش پوشش گیاهی است. این یافته‌ها با واقعیت‌های میدانی منطقه نیز هم‌راستا بود. از نقشه‌های تولیدشده می‌توان به‌عنوان الگوی عملی برای برنامه‌ریزی کاربری زمین، بهبود زیرساخت‌های دفع آب باران، حفاظت از مناطق مسکونی در برابر سیلاب‌های ناگهانی و بازسازی بوم‌سازگان‌های گیاهی به‌منظور افزایش نفوذپذیری خاک استفاده کرد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش رویکرد نوین و چارچوب دقیقی برای مدیریت پایدار خطر سیلاب در مناطق مشابه ایران و جهان ارائه داد که سیاست‌گذاران می‌توانند در بهبود تاب‌آوری جوامع محلی از آن بهره ببرند. برای بهبود دقت مدل در

پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود فهرست گسترده‌تری از رخدادهای سیلاب با داده‌های فصلی و زمانی دقیق‌تر گردآوری شود و متغیرهای پویا مانند تغییرات روزانه دما و چرخه‌های ذوب برف نیز بررسی شوند. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود اعتبارسنجی میدانی گسترده‌تری به‌ویژه در بلندی‌های زیاد و مناطق شهری انجام شود. همچنین، ترکیب DQL با دیگر روش‌های یادگیری تقویتی یا مدل‌های ترکیبی به‌منظور افزایش کارایی آن پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی
ارزیابی خطر سیل، بلندی‌های ایران، یادگیری تقویتی، یادگیری ماشین

مقدمه

درک خطر سیلاب‌ها و تلاش برای کاهش آن از اولویت‌های اصلی پژوهشگران و سیاست‌گذاران است (خارزمی و همکاران ۲۰۱۸، کوندولف و همکاران ۲۰۰۷، محمدی و همکاران ۲۰۲۵ و یال و تالوکدار ۲۰۱۸). بررسی سیلاب‌ها افزون بر کمی‌سازی اثرات آنها، برای توسعه راهبردهای کاهش خطر، سازگاری و تاب‌آوری اهمیت دارد (باری و همکاران ۲۰۲۳). نقشه‌برداری حساسیت به سیلاب ابزار مهمی در مدیریت خطر است. زیرا، می‌توان مناطق آسیب‌پذیر را شناسایی کرد و بستر برنامه‌ریزی مکانی، آمادگی و اقدامات پیشگیرانه فراهم آورد (عربامری و همکاران ۲۰۲۲، دوان ۲۰۱۳، حسین و مومو ۲۰۲۴). افزون بر این، نقشه‌برداری حساسیت به سیلاب پشتوانهٔ راهبردهای سازگاری با اقلیم است. زیرا، با شناسایی مناطقی با زیرساخت‌های سبز مانند تالاب‌ها یا حوضچه‌های ذخیره، می‌توان اثرات سیلاب را کاهش داد (باتزر ساریتز ۲۰۰۷، چن ۲۰۲۰). رویکردهای سنتی نقشه‌برداری سیلاب مانند مدل‌سازی آب‌شناختی و تحلیل داده‌های تاریخی سیلاب غالباً با محدودیت‌هایی مانند کمبود داده، پیچیدگی محاسباتی و پویایی ساختارهای محیطی، روبه‌رو هستند (هال و همکاران ۲۰۱۴). ازاین‌رو، روش‌های نوین مانند هوش مصنوعی[1](AI) و به‌ویژه یادگیری ماشین[2] (ML) و یادگیری عمیق[3] (DL) به‌کار گرفته شده‌اند تا بتوان داده‌های گوناگون را با دقت زیاد پردازش و الگوهای پیچیده را شناسایی کرد (آلسومایت و همکاران ۲۰۲۴، زو و همکاران ۲۰۲۴،۲۰۱۹ و خان و همکاران ۲۰۲۳). در میان رویکردهای AI، یادگیری تقویتی (RL)[4] به‌دلیل قابلیت تعامل با محیط و بهبود تدریجی تصمیم‌گیری، نویدبخش است و امکان سازگاری با شرایط پویا و نامطمئن را دارد (بواس و همکاران ۲۰۲۱، کویین و همکاران ۲۰۲۴). مدل‌های یادگیری تقویتی مبتنی بر یادگیری عمیق (DL-based RL) برای بهبود تاب‌آوری در سامانه‌های زهکشی شهری توسعه‌داده شدند و مشخص شد که این مدل‌ها با کاهش سیلاب و سرریز فاضلاب‌های ترکیبی، موجب بهبود تاب‌آوری می‌شوند (تیان و همکاران ۲۰۲۵). بویاس و همکاران (۲۰۲۱) کارایی RL را برای مهار بلادرنگ آب‌های سطحی در نورفولک، ویرجینیا ارزیابی کردند و دریافتند که در مقایسه با سامانه‌های غیرفعال و مبتنی بر قواعد که با وجود بهبود کیفیت آب موجب افزایش سیلاب می‌شوند، با کاربرد RL چهار درصد سیلاب و ۵۲٪ خروجی TSS کاهش یافت که موضوع نشان‌دهندهٔ کارایی زیاد آن در سطح ساختار بود. بر اساس پژوهش‌های تیان و همکاران (۲۰۲۳)، RL مدیریت زهکشی شهری را برای کاهش سیلاب بهبود بخشید. با یادگیری ایمن، سطح آب کاهش یافت و دفعات باز و بسته‌شدن دریچه‌ها نیز کمتر شد. در پژوهشی، فنگ و همکاران (۲۰۲۶) کارایی روش یادگیری تقویتی در

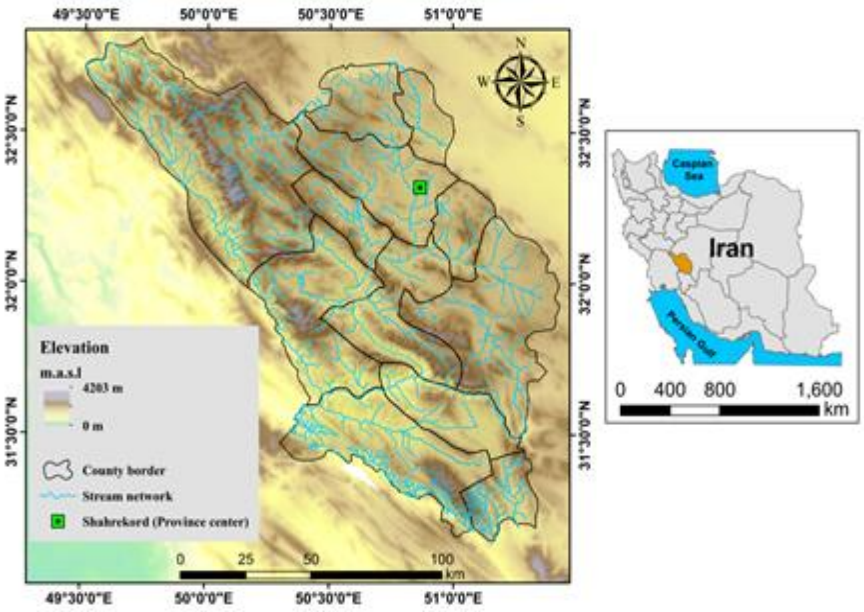
1- Artificial Intelligence
2- Machine Learning
3- Deep Learning
4- Reinforcement Learning

مدل‌سازی و اطلاع‌رسانی در تصمیم‌گیری‌های اقلیمی تطبیقی به‌منظور کاهش خطر سیل در شهر منهتن در ایالات متحده آمریکا را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که هنگام طراحی دیوارهای ساحلی تطبیقی برای محافظت از نیویورک، راهبرد برگرفته از RL به‌طور قابل توجهی هزینه خالص مد نظر را تا ۷۷٪ کاهش داد. لی و وانگ (۲۰۲۵) مسیر نجات برای سیل شهری تحت یک رویکرد مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق را برنامه‌ریزی و بررسی کردند. در پژوهش نامبرده با گسترش مقیاس سناریوها به سطوح بی‌سابقه، پیشرفت نظری در برنامه‌ریزی مسیر نجات سیل شهری، بهبود یافت. بر اساس نتایج پژوهش‌ها تاکنون از مدل DQL و یادگیری تقویتی برای پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی و به‌ویژه سیلاب در داخل کشور استفاده‌نشده است. ازاین‌رو، این پژوهش در این زمینه برای اولین بار با هدف بهره‌گیری از روش یادگیری تقویتی و مدل DQL برای توسعه چارچوب نقشه‌برداری حساسیت سیلاب در استان چهارمحال و بختیاری ایران انجام شد. این منطقه کوهستانی و آسیب‌پذیر از سیلاب‌های ناگهانی بود. در این پژوهش، با ترکیب داده‌های آموزشی دقیق و RL، نقشه‌های کاربردی تولید شد که سیاست‌گذاران می‌توانند از آنها در مدیریت بحران، کاهش خطر و بهبود تاب‌آوری، بهره ببرند.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

منطقه پژوهشی، استان چهارمحال و بختیاری در جنوب‌غربی ایران است (شکل ۱). این استان کوهستانی با مساحت حدود ۱۶۵۵۳ کیلومترمربع در برگیرندهٔ یک درصد از مساحت کل ایران است (یوسفی و همکاران ۲۰۲۲). موقعیت استان در گستره کوه‌های زاگرس به دامنه‌های تند، دره‌های ژرف و شبکه‌های زهکشی گسترده‌ای منجرشده که در پویایی‌های آب‌شناختی منطقه نقش قابل‌توجهی دارد (یوسفی و همکاران ۲۰۲۰).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان چهارمحال و بختیاری در ایران.

Figure 1- Geographic location of Chaharmahal and Bakhtiari Province in Iran.

در استان نامبرده، رخدادهای بارشی شدید در اواخر زمستان و اوایل بهار اغلب موجب سیلاب‌های ناگهانی و سیلاب‌های رودخانه‌ای می‌شوند (آردالی و همکاران ۲۰۱۵؛ (نقیبی و پورقاسمی ۲۰۱۵). رخدادهای سالانه سیلاب در استان باعث خسارت‌های قابل‌توجهی به زیرساخت‌ها، زمین‌های کشاورزی و جوامع محلی

می‌شوند که اثرات بارزی بر نواحی پست همچون شهرستان‌های لردگان و اردل دارند. نمایی از خسارت‌های واردشده ناشی از سیلاب در منطقه بارده در سال ۱۳۹۹ در شکل ۲ نشان‌داده شده است.



شکل ۲- خسارت سیلاب در روستای بارده فروردین ۱۳۹۹.
Figure 2- Flood damage in Barde Village, Farvardin 2020.

روش پژوهش

متغیرهای شرطی

در این پژوهش، برای تهیه نقشه‌های حساسیت به سیلاب استان چهارمحال و بختیاری، از ۲۱ متغیر محیطی استفاده شد. متغیرها از منابع داده پرشماری گردآوری شدند. این منابع شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)[5] تولیدشده از نقشه‌های پستی‌بلندی (مقیاس ۱:۲۵،۰۰۰)، سری زمانی اقلیمی ۴۰ ساله (۱۹۸۳-۲۰۲۳) از ایستگاه‌های اقلیمی منطقه‌ای، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجارشده (NDVI)[6] از تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۹ و داده‌های خاک از پایگاه SoilGrid (شبکه۳۰×۳۰ متر) بودند (اینی و همکاران ۲۰۲۰ف پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۹ و رمضانی و همکاران ۲۰۰۹). متغیرها در چهار دسته پستی‌بلندی، اقلیمی، پوشش زمین و انسانی سازماندهی شدند تا تحلیل و تفسیر آسان شود.

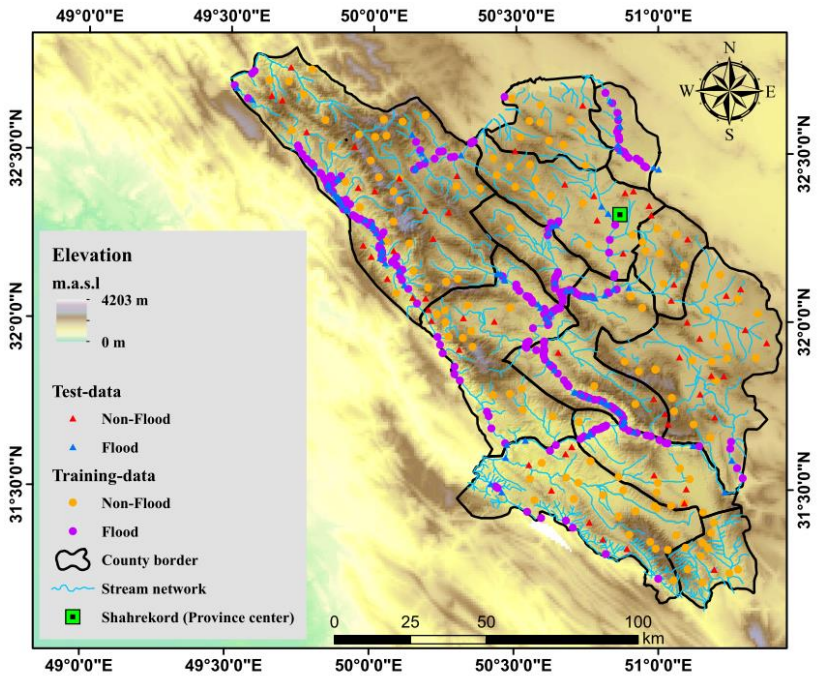
داده‌های موجودی سیلاب

داده‌های استفاده‌شده برای آموزش و ارزیابی مدل شامل ۵۴۵ نقطه مکانی در استان چهارمحال و بختیاری بود. از این تعداد، ۳۴۶ نقطه با سیلاب (برگرفته از رخدادهای مستند سیلاب در نواحی پست و در امتداد رودهایی چون زاینده‌رود و کارون) و ۱۹۹ نقطه بدون سیلاب (مناطق مشابه از نظر شرایط محیطی اما بدون سابقه سیلاب) بود. این داده‌ها در بازه زمانی ۲۰۲۳-۱۹۸۳ از منابع مختلف شامل سوابق شرکت آب منطقه‌ای، گزارش‌های مدیریت بحران و بازدیدهای میدانی گردآوری شدند (پورقاسمی و همکاران ۲۰۲۱ و سلطانی و همکاران ۲۰۲۱). برای مدل‌سازی، داده‌ها به‌طور تصادفی و با رویکرد لایه‌ای در پایتون به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند. بخش آموزش شامل ۳۸۹ نقطه (۲۵۲ نقطه با سیلاب، ۱۳۷ نقطه بدون سیلاب؛ برابر با ۷۱٪ کل داده‌ها) برای آموزش

5- Digital Elevation Model
6- Normalized Difference Vegetation Index

الگوریتم DQL و بخش آزمون ۱۵۶ نقطه (۹۴ نقطه با سیلاب، ۶۲ نقطه بدون سیلاب؛ برابر با ۲۹٪ کل داده‌ها) برای ارزیابی مدل تقسیم شدند.

این روش موجب شد نسبت نقاط با سیلاب و بدون سیلاب حفظ شده و سوگیری کاهش یابد. توزیع مکانی نقاط در شکل ۳ نشان‌داده شده است.



شکل ۳- توزیع مکانی نقاط با سیلاب و بدون سیلاب.

Figure 3- Spatial distribution of flood and non-flood points.

کاربرد مدل‌های یادگیری تقویتی

در این پژوهش از مدل یادگیری تقویتی (RL) و یادگیری عمیق Deep Q-Learning برای تهیه نقشه‌های حساسیت به سیلاب استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. یادگیری تقویتی یک الگوی یادگیری ماشین است که در آن یک عامل با تعامل با محیط و دریافت پاداش‌ها یا تنبیه‌ها بر اساس اقدام‌هایش می‌آموزد تصمیم‌های بهینه اتخاذ کند (سمید و همکاران ۲۰۰۹).

یادگیری عمیق (DQL)

در روش یادگیری تقویتی برای مدل DQL، می‌توان اندازهٔ Q را در QL با استفاده از یک شبکه عصبی عمیق به‌منظور تقریب تابع، گسترش داد و امکان کار با فضاهای حالت پیوسته و ابعاد بزرگ را فراهم آورد (داسیلوا ۲۰۲۲، تان ۲۰۲۱).

در نقشه‌برداری حساسیت سیل، DQL محدوده کامل متغیرهای شرطی را بدون گسسته‌سازی پردازش می‌کند و دقت پیش‌بینی را در محیط‌های ناهمگن بهبود می‌بخشد. از رابطهٔ ۱ برای به‌روزرسانی DQL با کمینه‌سازی تابع زیان استفاده شد (فوی ۲۰۱۹).

(θ): سنجه‌های شبکه Q، (θ^{-}): سنجه‌های شبکه

$$\left[L(\theta) = E\left[\left(r_t + \gamma \max_{a'} Q\left(s_{t+1}, a'; \theta^{-}\right) - Q(s_t, a_t; \theta)\right)^2\right]\right]$$

هدف که به‌طور دوره‌ای به‌روزرسانی می‌شوند، $(Q(s_t,a_t))$: اندازهٔ Q برای حالت (s_t) و عمل (a_t) در زمان (t)، (α): نرخ یادگیری (برابر با ۰/۱)، که اندازه گام به‌روزرسانی را مهار می‌کند، (r_t): پاداش دریافت‌شده پس از انجام عمل (a_t) در حالت (s_t) (برای مثال ۱+ برای طبقه‌بندی درست و ۱- برای طبقه‌بندی نادرست)، (γ): ضریب تنزیل (برابر با ۰/۹)، که تعادل میان پاداش‌های آنی و پاداش‌های آتی را برقرار می‌کند، (S_{t+1}): حالت بعدی پس از انجام عمل (at)، $\max_{(a')} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t)$: بیشینه اندازهٔ Q

برای حالت بعدی در میان تمام اعمال ممکن منهای اندازهٔ Q حالت فعلی و عمل انتخاب‌شده است. سیاست اکتشاف از راهبرد ε-greedy (رابطهٔ ۲) استفاده می‌کند.

$$a_t = \begin{cases} random\ action, & with\ probability\ \epsilon \\ arg\ max_a\ Q(s_t, a; \theta), & with\ probability\ 1-\epsilon' \end{cases}$$

ارزیابی دقت

برای ارزیابی کارایی یادگیری تقویتی (RL) در تولید نقشه‌های حساسیت سیل، از پنج شاخص مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد (AUC)، کاپا، بازیابی (Recall)، دقت مثبت پیش‌بینی‌شده (Precision)، و نرخ منفیِ درست (Specificity) و (LogLoss)، استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از داده‌های آزمون شامل ۱۵۶ نقطه (۹۴ محل با سیل و ۶۲ محل بدون سیل از فهرست سیل) محاسبه شدند تا ارزیابی کارایی مدل‌ها بی‌طرفانه باشد. برای اطمینان از قابلیت اطمینان مدل‌های RL، تحلیل هم‌خطی روی ۲۱ متغیر طبقه‌بندی‌شده اولیه (رزولوشن ۳۰×۳۰ متر) انجام شد. بر اساس نتایج، چهار متغیر از فرایند مدل‌سازی حذف شدند. سرانجام، ۱۷ متغیر برای آموزش و آزمون مدل‌های تقویتی استفاده شد. این متغیرها شامل مدل رقومی ارتفاع ، تجمع جریان[۷]، جهت جریان [۸]، پیوستگی جریان[۹]، جهت جغرافیایی[۱۰]، طول شیب[۱۱]، انحنای افقی[۱۲]، انحنای نیم‌رخ[۱۳]، شاخص رطوبت پستی‌بلندی[۱۴]، ژرفا تا بستر سنگی[۱۵]، بیشینه بارش ۲۴ ساعته[۱۶]، دمای میانگین[۱۷]، دمای بیشینه[۱۸]، ژرفای برف[۱۹]، شاخص NDVI، درصد ماسه سطحی[۲۰]، فاصله از مناطق مسکونی[۲۱]، بودند. از این متغیرها برای آموزش و آزمون مدل‌های RL استفاده شد تا مشارکت‌های ویژگی مستقل و قوی باشد.

نتایج و بحث

نقشه‌برداری حساسیت به سیلاب

در این پژوهش، از مدل یادگیری عمیق (DQL) برای تولید نقشه‌های حساسیت به سیلاب استان چهارمحال و بختیاری، استفاده شد (شکل ۴).

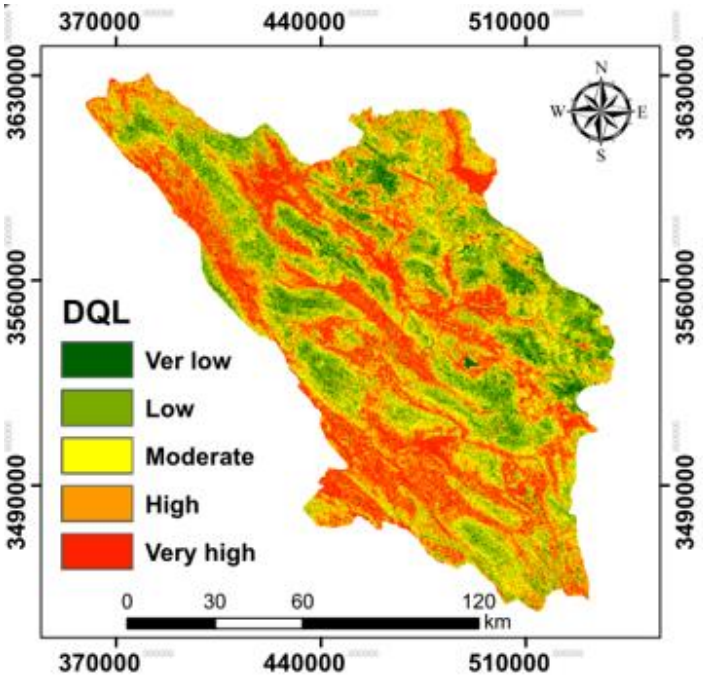
در این نقشه‌ها مساحت منطقه مطالعه‌شده (۱۶۵۵۳۰۰ هکتار) به پنج طبقه حساسیت بسیارکم، کم، متوسط، زیاد و بسیارزیاد، بر اساس الگوریتم شکست طبیعی (natural break) تفکیک شد (جعفری و همکاران ۲۰۲۴).

در مدل DQL، مساحت طبقه بسیارکم ۹۷۲۲۱ هکتار (۶٪)، طبقهٔ کم ۳۳۶۱۹۰ هکتار (۲۰٪)، طبقهٔ متوسط ۴۲۹۴۵۳ هکتار (۲۲٪)، طبقهٔ زیاد ۴۳۵۲۹۳ هکتار (۲۶٪) و طبقهٔ بسیارزیاد ۳۵۷۱۴۰ هکتار (۲۶٪) بود. در این پژوهش بر اساس نتایج پهنه‌بندی سیلاب بر پایهٔ مدل DQL بیشترین خطر رخداد سیلاب مربوط به مناطق جنوبی و غربی استان در آبخیز کارون بود. این مناطق به‌دلیل بارش بیشتر و فرایند ذوب برف در بلندی‌ها به‌ویژه در فصل بهار نیازمند مدیریت رواناب با استفاده از اقدامات آبخیزداری زیست-سازه‌ای هستند. از سوی دیگر، خطر رخداد سیلاب در مناطق شرقی استان به‌ویژه شهرستان بروجن کمتر بود.

ارزیابی دقت

دقت مدل با پنج شاخص ارزیابی شد. نتایج AUC (۰/۹۳) بیانگر قدرت خوب مدل در تفکیک بود. اندازه‌های Kappa (۰/۷۲) و LogLoss (۰/۶۵) نشان‌دهنده توافق بسیار زیاد و قابلیت اطمینان در مدل‌سازی بود. منحنی مشخصه عملکرد (ROC)[۲۲] مدل DQL در شکل ۵ نشان‌داده شده است.

7- Flow Accumulation
8- Flow Direction
9- Flow Connectivity
10- Aspect
11- Slope Lengt
12- Plan Curvature
13- Profile Curvature
14- Topographic Wetness Index
15- Depth to Bedrock
16- Maximum 24-Hour Rainfall
17- Average Temperature
18- Maximum Temperature
19- Snow Depth
20- Percent of Surface Sand
21- Distance from Residential Areas
22- Receiver operating characteristic



شکل۴- نقشه حساسیت به سیلاب در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از الگوریتم‌های DQL.

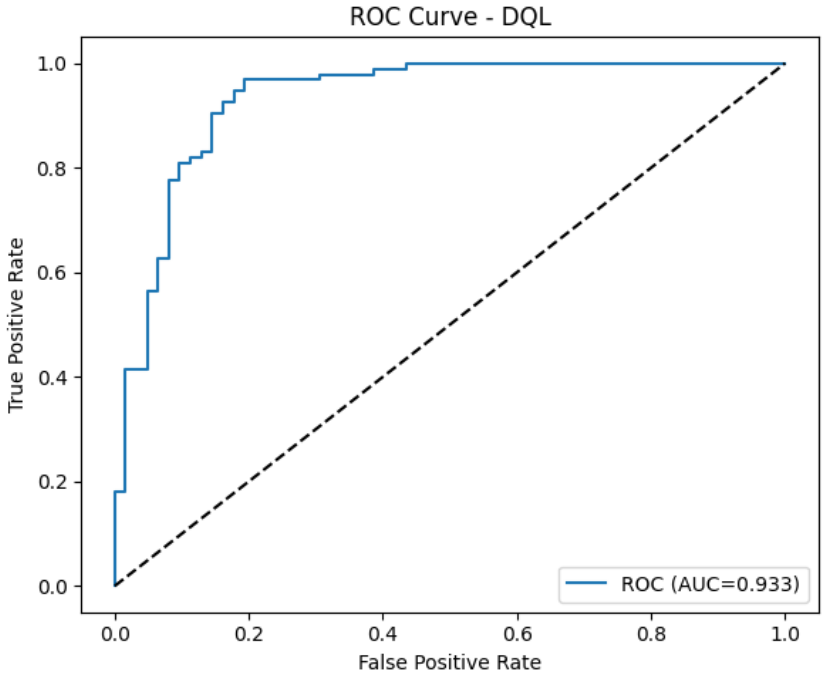
Figure 4- Flood susceptibility map of Chaharmahal and Bakhtiari Province using the DQL algorithm.

منحنی ROC با رسم نسبت یا نرخ مثبت صحیح (TPR)[۲۳] برحسب نرخ مثبت کاذب (FPR)[۲۴] ایجاد شد. اندازه‌های زیاد در این منحنی نشان‌دهنده دقت زیاد مدل در پیش‌بینی مناطق سیلابی در سطح استان چهار محال و بختیاری بود.

شاخص بازیابی برای مدل DQL برابر ۰/۸۷ بود که نشان‌دهنده یک مبادله کوچک در شناسایی مکان‌های سیلابی است. اندازه شاخص Precision برابر ۰/۹۰ و Specificity برابر با ۰/۸۵ محاسبه شدند که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل در پهنه‌بندی سیلاب در سطح استان چهارمحال و بختیاری بود. افزون بر این، اندازه‌های کم Kappa برابر ۰/۷۲ و LogLoss برابر ۰/۶۵ نشان‌دهنده خطاهای پیش‌بینی متوسط و قدرت تبیینی مناسب مدل بود، که ممکن است به‌دلیل چالش‌ها در بهینه‌سازی برای مقیاس داده‌ها باشد.

نتایج ارزیابی نشان‌دهندهٔ کارایی نسبتاً خوب مدل DQL بود. کارآیی ساختاری DQL در ترکیب QL با شبکه‌های DL پنهان است. درنتیجه، می‌توان اندازه‌های Q را در فضاهای با ابعاد بزرگ برآورد کرد (مینه و همکاران۲۰۱۵). با این متغیر و به‌وسیلهٔ DQL می‌توان روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای محیطی و آب‌شناختی را به‌طور دقیق‌تر در مقایسه با QL ثبت کرد. نتایج بسیارخوب بررسی شاخص‌های طبقه‌بندی مؤید کارایی بازنمایی مدل بود و از محدودیت‌ها، می‌توان به سوگیری بیش برآورد در پیش‌بینی‌های اندازهٔ Q و بی‌ثباتی در آموزش به‌دلیل وابستگی مکانی در داده‌های متوالی اشاره کرد. نتایج پژوهش‌های کدنکو و خوسلا (۲۰۲۵) نیز با نتایج این پژوهش هم‌راستا است.

23- True Positive Rate
24- False Positive Rate



شکل ۵- منحنی مشخصه عملکرد مدل DQL در مدل‌سازی سیلاب در منطقه مطالعه‌شده.

Figure 5- Receiver Operating Characteristic curve of the DQL model on flood modeling in the study area.

این مشکلات با ماهیت هم‌بستگی مکانی داده‌های حساسیت به سیل، در مناطق همسایه که اغلب ویژگی‌های مشابهی دارند، تشدید شدند. اگرچه روش‌هایی مانند بازپخش تجربه و شبکه‌های هدف برای تثبیت DQL طراحی شده‌اند، اما کاربرد آن‌ها به‌طور کامل ناپایداری را برطرف نمی‌کند. با استفاده از داده‌های بیشتر و گوناگون سیلاب و بدون سیلاب و همراه با پراکنش مکانی آنها در پهنهٔ سطح منطقه مطالعه‌شده میتوان این محدودیت را در مدل DQL به حداقل رساند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، از (DQL) برای نقشه‌برداری حساسیت به سیل در استان چهارمحال و بختیاری، ایران، رابطه‌های پیچیده میان طراحی الگوریتم، پویایی‌های محیطی و روش‌شناختی در شکل‌دهی پهنه‌بندی حساسیت، استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد کارایی یادگیری تقویتی، به‌ویژه مدل Deep Q-Learning (DQL)، در نقشه‌برداری حساسیت به سیلاب در شرایط پیچیده و متغیر استان چهارمحال و بختیاری بسیارخوب بود. با گردآوری فهرست جامع سیلاب‌ها، تحلیل هم‌خطی برای حذف متغیرهای تکراری و استفاده از ۱۷ متغیر محیطی و آموزش و اعتبارسنجی دقیق مدل‌ها، نقشه‌های حساسیت قابل اطمینان تولید شد. با کاربرد DQL می‌توان نواحی پرخطر را به‌طور دقیق شناسایی کرد و ارتباط این خطرات را با واقعیت‌های زیست‌محیطی منطقه مانند ذوب برف در کوهرنگ، شیب‌های تند و توسعه شهری در لردگان آشکار ساخت. با این نتایج می‌توان الگوی عملی مانند بهبود شبکه‌های دفع آب، بهبود زیرساخت‌های شهری در برابر سیلاب ناشی از ذوب برف، و بازسازی پوشش گیاهی برای افزایش نفوذ آب برای مدیریت سیلاب فراهم آورد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد با بهره‌وری از RL و به‌ویژه DQL می‌توان چارچوب دقیقی برای درک ساز و کارهای سیلاب به‌منظور پشتیبانی از برنامه‌ریزی پایدار کاربری زمین و مدیریت خطر در مناطق آسیب‌پذیر، ارائه داد.

بر اساس نتایج این پژوهش و به‌منظور ارتقای مدل‌ها گسترش موجودی سیلاب با داده‌های فصلی، افزودن داده‌های زمانی مانند چرخه‌های ذوب برف و تغییرات دما، و انجام اعتبارسنجی میدانی به‌ویژه در مناطق مسکونی و بلندی‌های زیاد، پیشنهاد می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

نویسندهٔ سوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

فهرست منابع

AD. 2023. Floods and debris flows in Ladakh: Past history and future hazards, in: Advances in Asian Human-Environmental Research. Springer. pp. 31–52. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42494-6_3

Chen W, Li Y, Xue W, Shahabi H, Li S, Hong H, Wang X, Bian H, Zhang S, Pradhan B, Ahmad B, Bin H. 2020. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. Sci. Total Environ. 701: 134979. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134979

da Silva AR. 2022. Double Q-Learning for citizen relocation during natural hazards. arXiv Prepr. arXiv2209.03800.

Dewan AM. 2013. Floods in a megacity: Geospatial techniques in assessing hazards, risk and vulnerability, Floods in a Megacity: Geospatial Techniques in Assessing Hazards, Risk and Vulnerability. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5875-9

Eini M, Kaboli HS, Rashidian M, Hedayat H. 2020. Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts. International Journal of Disaster Risk Reduction. 50: 101687. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101687

Feng K, Lin N, Kopp RE, Xian S, Oppenheimer M. 2025. Reinforcement learning–based adaptive strategies for climate change adaptation: An application for coastal flood risk management. Proceedings of the

Alsumayt A, El-Haggar N, Amouri L, Alfawaer ZM, Aljameel SS. 2023. Smart flood detection with AI and Blockchain integration in Saudi Arabia using drones. Sensors. 23: 5148. https://doi.org/10.3390/s23115148

Arabameri A, Seyed Danesh A, Santosh M, Cerda A, Chandra Pal S, Ghorbanzadeh O, Roy P, Chowdhuri I. 2022. Flood susceptibility mapping using meta-heuristic algorithms. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 13: 949–974. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2060138

Ardali EO, Tahmasebi P, Bonte D, Milotić T, Pordanjani IR, Hoffmann M. 2015. Ecological sustainability in rangelands: The contribution of dung beetles in secondary seed dispersal (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). European Journal of Sustainable Development. 5: 133. https://doi.org/10.14207/ejsd.2016.v5n3p133

Batzer DP, Sharitz RR. 2007. Ecology of freshwater and estuarine wetlands, Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands. Univ of California Press. 375 p. https://doi.org/10.1525/california/9780520247772.003.0001

Bowes BD, Tavakoli A, Wang C, Heydarian A, Behl M, Beling PA, Goodall JL. 2021. Flood mitigation in coastal urban catchments using real-time stormwater infrastructure control and reinforcement learning. Journal of Hydroinformaticss. 23: 529–547. https://doi.org/10.2166/HYDRO.2020.080

Bray J, Wasson RJ, Srivastava P, Ziegler

National Academy of Sciences, 122(12), e2402826122.

Foy, P., 2019. Deep Reinforcement Learning: Guide to Deep Q-Learning, in: Mlq. Springer. pp. 475–483

Jaafari A, Mafi-Gholami D, Yousefi S. 2024. A spatiotemporal analysis using expert-weighted indicators for assessing social resilience to natural hazards. Sustainable Cities and Society. 100: 105051

Hall J, Arheimer B, Borga M, Brazdil R, Claps P, Kiss A, Kjeldsen TR, Kriauciuniene J, Kundzewicz ZW, Lang M, Llasat MC, Macdonald N, McIntyre N, Mediero L, Merz B, Merz R, Molnar P, Montanari A, Neuhold C, Parajka J, Perdigao RAP, Plavcova L, Rogger M, Salinas JL, Sauquet E, Schar C, Szolgay J, Viglione A, Bloschl G. 2014. Understanding flood regime changes in Europe: A state-of-the-art assessment. Hydrology and Earth System Sciences. 18: 2735–2772. https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014

Hossain MN, Mumu UH. 2024. Flood susceptibility modelling of the Teesta River Basin through the AHP-MCDA process using GIS and remote sensing. Natural Hazards. 120: 12137–12161. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06677-z

Khan TA, Shahid Z, Alam M, Su'ud MM, Kadir K. 2019. Early flood risk assessment using Machine Learning: A Comparative study of SVM, Q-SVM, K-NN and LDA, in: MACS 2019 - 13th International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics, Proceedings. IEEE, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/MACS48846.2019.9024796

Kharazmi R, Tavili A, Rahdari MR, Chaban L, Panidi E, Rodrigo-Comino J. 2018. Monitoring and assessment of seasonal land cover changes using remote sensing: A 30-year (1987–2016) case study of Hamoun Wetland, Iran. Environmental Monitoring and Assessment. 190: 1–23. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6726-z

Kondolf GM, Piégay H, Landon N. 2007. Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. Landscape Ecology. 22: 367–384. https://doi.org/10.1007/s10980-006-9033-y

Li XY, Wang X. 2025. Rescue path planning for urban flood: A deep reinforcement learning–based approach. Risk Analysis. 45(4): 928-943.

Mohammadi M, Abdi Y, Rahimian FP. 2025. Blockchain for water management, in: Digital Twin and Blockchain for Sensor Networks in Smart Cities. Elsevier. pp. 229–242. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-30076-9.00011-X

Naghibi SA, Pourghasemi HR. 2015. A comparative assessment between three machine learning models and their performance comparison by bivariate and multivariate statistical methods in groundwater potential mapping. Water Resources Management. 29: 5217–5236. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1114-8

Pal S, Talukdar S. 2018. Application of frequency ratio and logistic regression models for assessing physical wetland vulnerability in Punarbhaba river basin of Indo-Bangladesh. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 24: 1291–1311. https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1411781

Pourghasemi HR, Gayen A, Edalat M, Zarafshar M, Tiefenbacher JP. 2019. Is multi-hazard mapping effective in assessing natural hazards and integrated watershed management? Geoscience Frontiers. 11(4): 1203-1217. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.008

Qin H, Liang Q, Chen H, De Silva V. 2024. A coupled human and natural systems (CHANS) framework integrated with reinforcement learning for urban flood mitigation. Journal of Hydrology. 643: 131918. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131918

Remesan R, Bray M, Shamim MA, Han D. 2009. Rainfall-runoff modelling using a wavelet-based hybrid SVM scheme, in: IAHS-AISH Publication. IAHS Press. pp. 41–50.

Schmid U, Rösch P, Krause M, Harz M, Popp J, Baumann K. 2009. Gaussian mixture discriminant analysis for the single-cell differentiation of bacteria using micro-Raman spectroscopy. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 96: 159–171. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2009.01.008

Soltani K, Ebtehaj I, Amiri A, Azari A, Gharabaghi B, Bonakdari H. 2021. Mapping the spatial and temporal variability of flood susceptibility using remotely sensed normalized difference vegetation index and the forecasted changes in the future. Science of the Total Environment. 770: 145288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145288

Tan H. 2021. Reinforcement learning with deep deterministic policy gradient, in: Proceedings - 2021 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms, CAIBDA 2021. IEEE, pp. 82–85. https://doi.org/10.1109/CAIBDA53561.2021.00025

Tian W, Xin K, Zhang Z, Zhao M, Liao Z, Tao T. 2023. Flooding mitigation through safe and trustworthy reinforcement learning. Journal

Yousefi S, Pourghasemi HR, Emami SN, Pouyan S, Eskandari S, Tiefenbacher JP. 2020. A machine learning framework for multi-hazards modeling and mapping in a mountainous area. Scientific Reports. 10: 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69233-2

Zhu X, Guo H, Huang JJ. 2024. Urban flood susceptibility mapping using remote sensing, social sensing and an ensemble machine learning model. Sustainable Cities and Society. 108: 105508. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105508

of Hydrology 620: 129435. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129435

Tian W, Zhang Z, Xin K, Liao Z, Yuan Z. 2025. Enhancing the resilience of urban drainage system using deep reinforcement learning. Water Research. 281: 123681.

Yousefi S, Jaafari A, Valjarević A, Gomez C, Keesstra S. 2022. Vulnerability assessment of road networks to landslide hazards in a dry-mountainous region. Environmental Earth Sciences. 81: 521. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10650-z

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

A Reinforcement Learning Framework for Flood Zoning in Mountainous Areas using the Deep Q-Learning Model

Saleh Yousefi[1*], Sara Mardanian[2], Ahmad Reza Karimipour[3]

1- Assistant Professor in Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

2- Scholar in Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

3- Instructor in Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Understanding flood risk efforts to reduce it are top priorities for researchers and policymakers. Flood susceptibility mapping is an important tool for risk management in mountainous regions. Because, it is possible to identify prone areas and provide a platform for spatial planning, preparedness, and preventive measures. Traditional flood mapping approaches, such as hydrological modeling and historical data analysis, often face limitations including data scarcity, computational complexity, and the dynamic of environmental systems. Therefore, modern artificial intelligence (AI) methods—particularly machine learning (ML) and reinforcement learning (RL)—have been employed to process diverse datasets and identify complex patterns. Among AI approaches, reinforcement learning is promising due to its capacity to interact with the environment and progressively improve decision-making. The Deep Q-Learning (DQL) model, as an advanced reinforcement learning technique, enables operation in continuous and high-dimensional state spaces without requiring discretization. This study aims to apply the DQL model to produce a flood susceptibility map in the Chaharmahal and Bakhtiari Province, a mountainous and semi-arid region prone to flash floods caused by snowmelt and intense rainfall. The main objective is to provide a precise framework for flood hazard assessment and to support policymakers and crisis managers in reducing risk and enhancing resilience, particularly in vulnerable counties such as Ardal and Lordegan.

Materials and Methods

To conduct this research, a list of flood events including 545 spatial points (346 flood and 199 non-flood locations) from 1983 to 2023 was compiled. In a random and stratified manner, 71% of the data was used for training (389 points) and 29% for testing (156 points). Initially, 21 environmental variables were extracted from multiple sources, including a Digital Elevation Model (DEM), climatic time series, Landsat 9 imagery, and the SoilGrid database.

Article Type: Research Article
***Corresponding Authors' E-mail:** ssaleh.yousefi@gmail.com
Citation: Yousefi, S., Mardanian, S., Karimipour. A.R. 2026. A Reinforcement Learning Framework for Flood Zoning in Mountainous Areas using the Deep Q-Learning Model. Watershed Management Research. 39(3): 64-78.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.371991.1656

Received: 07 January 2026, **Received in revised form:** 18 February 2026, **Accepted:** 19 March 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 64-78.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

After multicollinearity analysis, four variables were removed, and 17 final variables (elevation, flow accumulation, flow direction, stream connectivity, aspect, slope length, plan and profile curvature, Topographic Wetness Index (TWI), depth to bedrock, maximum 24-hour precipitation, mean and maximum temperature, snow depth, NDVI, surface sand percentage, and distance from residential areas) were selected. The Deep Q-Learning model was applied to process continuous variables and generate a flood susceptibility map. This map was classified into five categories (very low to very high). The accuracy of the model was evaluated by indicators such as AUC, Kappa, Recall, Precision, Specificity, and LogLoss metrics.

Results and Discussion

The classification map was prepared using the Deep Q-Learning (DQL) model and based on the Natural break method. In this map, the area of the study area (1,655,300 hectares) was divided into five flood susceptibility classes: very low (6%, 97,221 ha), low (20%, 336,190 ha), moderate (26%, 429,453 ha), high (26%, 435,293 ha), and very high (22%, 357,140 ha). Accuracy assessment indicated very good model performance. The results of the AUC index (0.93) indicated excellent discriminative ability, the Kappa coefficient index (0.72) indicating acceptable agreement between predictions and observations, and the Recall index (0.87) indicated high identification of flood points. The Precision index and was calculated to be 0.90, Specificity was 0.85, and LogLoss was 0.65. Analysis of the significance of the variables showed that the greatest effect was related to snow depth, which has a significant impact on snowmelt in spring floods. This was followed by flow accumulation (topographic characteristics), distance from residential areas (human and urban development impacts), NDVI (vegetation cover and soil permeability), mean temperature (climatic conditions), and slope length. Areas classified as very high susceptibility were mainly concentrated in low-lying areas, valleys, and along major rivers such as the Karoon and Zayandeh-Rud Rivers, particularly within Ardal and Lordegan counties. Comparison the results of this study with similar studies based on supervised machine learning models showed that using the DQL model, flood risk in heterogeneous mountainous environments can be predicted more reliably and flood risk can be managed more accurately.

Conclusion and Suggestions

The results of this study demonstrated that the Deep Q-Learning (DQL) model, as a deep reinforcement learning approach, has high capability for flood susceptibility mapping, especially in complex mountainous regions such as Chaharmahal and Bakhtiari Province. By utilizing this model, processing continuous environmental variables and accurately identifying nonlinear relationships, valid and practical maps were produced, and based on that, high-risk areas were accurately identified. The findings of this study confirm that the main flood drivers in the region include snowmelt, topographic characteristics, human development, and vegetation degradation. These findings were also consistent with the field realities of the region. The generated maps can serve as a practical basis for land-use planning, strengthening stormwater infrastructure, protecting residential areas against flash floods, and restoring vegetation ecosystems to enhance soil permeability. Overall, the results of this study provided a novel approach and a detailed framework for sustainable flood risk management in similar regions in Iran and the world, which policymakers can benefit from in improving the resilience of local communities. To improve the accuracy of the model in future research, it is recommended that a broader list of flood events be compiled with more accurate seasonal and temporal data, and that dynamic variables such as daily temperature changes and snowmelt cycles be examined. Additionally, it is recommended to conduct more extensive field validation, especially in high altitudes and urban areas. It is also suggested to combine DQL with other reinforcement learning methods or hybrid models to increase its efficiency.

Keywords: **Flood risk assessment, Iranian highlands, machine learning, reinforcement learning**

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest
The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement
The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution
Author 1: Conceptualization, software/statistical analyses, writing the first draft of the manuscript
Author 2: Guidance, editing and revision of the manuscript, review of results
Author 3: Guidance, editing and revision of the manuscript, review of results

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

مقایسه رواناب و فرسایش خاک در توده‌های طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) و جنگل‌کاری‌شده با زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) در بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس

سمیه حیدری[۱]، نورالدین رستمی*[۲]، مهدی حیدری[۳]، مرتضی قیصوری[۴]

۱- کارشناس‌ارشد مدیریت و کنترل بیابان، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع‌طبیعی، دانشگاه ایلام، ایران
۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع‌طبیعی، دانشگاه ایلام، ایران
۳- استاد گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع‌طبیعی، دانشگاه ایلام، ایران
۴- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

بررسی عامل‌های مؤثر بر رواناب و فرسایش خاک از اقدامات اصلی برای مدیریت صحیح خاک در عرصه‌های طبیعی است. منابع آب و خاک در نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان شالوده حیات و پایداری جوامع انسانی اهمیت ویژه‌ای دارند. از سوی دیگر، محدودیت این منابع در این نواحی، بهره‌برداری ناپایدار و بدون توجه به اصول علمی مدیریت آن‌ها باعث ویرانی روز افزون و افزایش خطر بیابان‌زایی شده است. به‌طوری که فرسایش خاک در این مناطق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی، چالش‌های جدی برای مدیریت منابع‌طبیعی ایجادکرده است؛ ازاین‌رو، شناسایی عامل‌های مؤثر در فرسایش خاک و تدوین برنامه‌های حفاظت خاک لازم و ضروری است. به‌دلیل کمبود داده‌های آماری مناسب، شرایط سخت کار فیزیکی در آبخیزها و نیز نوسانات غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی مانند خشک‌سالی‌های بلندمدت، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فرآیندهای اثرگذار بر هدررفت خاک در عرصه‌های طبیعی دشوار است. بر این اساس، در بسیاری از پژوهش‌های فرسایش و رسوب، از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش اثر جنگل‌کاری بر تغییرات رواناب و رسوب در مقایسه با جنگل‌های طبیعی بلوط و عرصه‌های خارج از تاج‌پوشش، بررسی شد. هدف این پژوهش، بررسی حجم رواناب و فرسایش خاک در زیراشکوب توده‌های جنگلی طبیعی شاخه‌زاد بلوط (*Quercus brantii* Lindl.) و جنگل‌کاری‌شده با زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) بعد از شبیه‌سازی بارش باران بود.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** n.rostami@ilam.ac.ir
استناد: حیدری، س.، رستمی، ن.، حیدری، م.، قیصوری، م. ۱۴۰۵. مقایسه رواناب و فرسایش خاک در توده‌های طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) و جنگل‌کاری‌شده با زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) در بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۹۶-۷۹.
شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.372152.1658
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۲/۰۳، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۷۹ تا ۹۶.
ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس
© نویسندگان

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده پارک جنگلی چغاسبز، جزو آبخیز شهر ایلام در استان ایلام بود. ویژگی‌های اقلیمی و تنوع پوشش گیاهی، شرایط منحصر به فردی را برای بررسی روابط میان پوشش گیاهی، رواناب و فرسایش خاک در این منطقه فراهم‌آورده است. به‌منظور مقایسه اثر جنگل‌کاری گونه زربین و جنگل طبیعی شاخه‌زاد بلوط بر اندازهٔ رواناب و رسوب، از دستگاه شبیه‌ساز باران پرتابل، استفاده شد. در این پژوهش، بارش با شدت و مدت زمان مشخص بر اساس نمودارهای شدت-مدت-فراوانی، شدت و پایه زمانی بارش تعیین شد و از رسوب و رواناب زیرآشکوب این توده‌ها با استفاده از قطعات دو مترمربعی (۱×۲ متر)، نمونه‌برداری شد. بارش در دو مدت زمان ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای و با شدت بارش ۸۰ میلی‌متر بر ساعت شبیه‌سازی شد. سپس، دستگاه شبیه‌ساز باران در سه تکرار تصادفی در هر دو توده جنگل‌کاری‌شده و طبیعی و قطعه شاهد در موقعیت خارج از تاج‌پوشش و مجاور توده‌ها مستقر شد و نمونه رواناب و رسوب و خاک در هر توده و منطقه شاهد جمع‌آوری شد. سپس، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ انجام شد. تفاوت‌ها با روش تجزیه پراکنش یک‌طرفه بررسی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد. افزون بر این، مقایسه میانگین داده‌ها در زمان‌های بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای با استفاده از آزمون T انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه پراکنش نشان داد که اثر پوشش‌های گیاهی گوناگون بر برخی از خصوصیات فیزیکی خاک معنی‌دار بود. در جنگل‌کاری زربین، هیچ رواناب و رسوبی مشاهده نشد، که ممکن است دلیل آن پوشش گیاهی متراکم و نفوذپذیری زیاد خاک باشد. بیشترین اندازهٔ رواناب و رسوب در منطقه خارج تاج‌پوشش، مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مثبت پوشش‌های گیاهی در کاهش رواناب و رسوب است. تفاوت اندازه‌های رسوب در منطقه جنگل‌کاری زربین با دو منطقه دیگر معنی‌دار نبود، اما تفاوت‌های این متغیر در میان توده طبیعی بلوط و منطقه خارج تاج‌پوشش از دیدگاه آماری معنی‌دار بود. بر اساس نتایج این پژوهش، با افزایش زمان بارش، ضریب رواناب افزایش یافت. اما، نرخ افزایش ضریب رواناب در مدت بارش ۳۰ دقیقه به ۱۵ دقیقه در منطقه شاهد (۱/۸۲ برابر) در مقایسه با منطقه جنگل‌کاری بلوط (۱/۳۶ برابر) بیشتر بود. این یافته بیانگر اهمیت پوشش گیاهی است و نشان‌دهندهٔ آن است که در شرایط تداوم بارش، اندازهٔ رواناب و هدررفت خاک در مناطق بدون پوشش افزایش خواهد یافت. بر پایهٔ نتایج این پژوهش، وجود تاج‌پوشش درختی دلیل کاهش سرعت تجزیه لاشبرگ، افزایش حجم و ژرفای لاشبرگ در سطح زمین بود، و به‌طور معنی‌داری سبب کاهش رواناب در زیر اشکوب این گونه درختی شد. از سوی دیگر، نفوذپذیری ضعیف خاک در مناطق بدون تاج‌پوشش به‌دلیل اندازهٔ کم ماده آلی و لاشبرگ و جرم مخصوص ظاهری زیاد و فشردگی ساختار خاک، موجب افزایش رواناب در این مناطق شد. از ویژگی‌های مهم تاج‌پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، ایجاد بستری مناسب در سطح زمین و توسعه شبکه ریشه است که سبب بهبود دانه‌بندی خاک، حفظ ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. در چنین شرایطی، رواناب و اندازهٔ رسوب نیز کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که پوشش گیاهی در تنظیم ویژگی‌های آب‌شناختی خاک، کاهش فرسایش و رسوب اهمیت زیادی دارد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که حفظ و احیای پوشش گیاهی در توده‌های جنگلی، به‌ویژه در مناطق زاگرس، سبب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و کاهش مشکلات ناشی از فرسایش می‌شود. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود که برای حفاظت از منابع آب و خاک، اقدامات مدیریتی مناسب مانند کاشت درختان و درختچه‌های بومی در مناطق ویران‌شده یا با پوشش گیاهی کم، انجام شود. به‌طور کلی، این اقدامات منجر به کاهش رواناب و فرسایش خاک در آبخیزها، مدیریت پایدار منابع‌طبیعی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی خواهند شد. پیشنهاد می‌شود به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش فرسایش و حفظ منابع‌طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به توسعه جنگل‌کاری و حفظ پوشش گیاهی توجه بیشتری شود.

واژگان کلیدی
تاج‌پوشش، چغاسبز ایلام، خاک، رواناب، شبیه‌ساز باران، هدررفت خاک

مقدمه

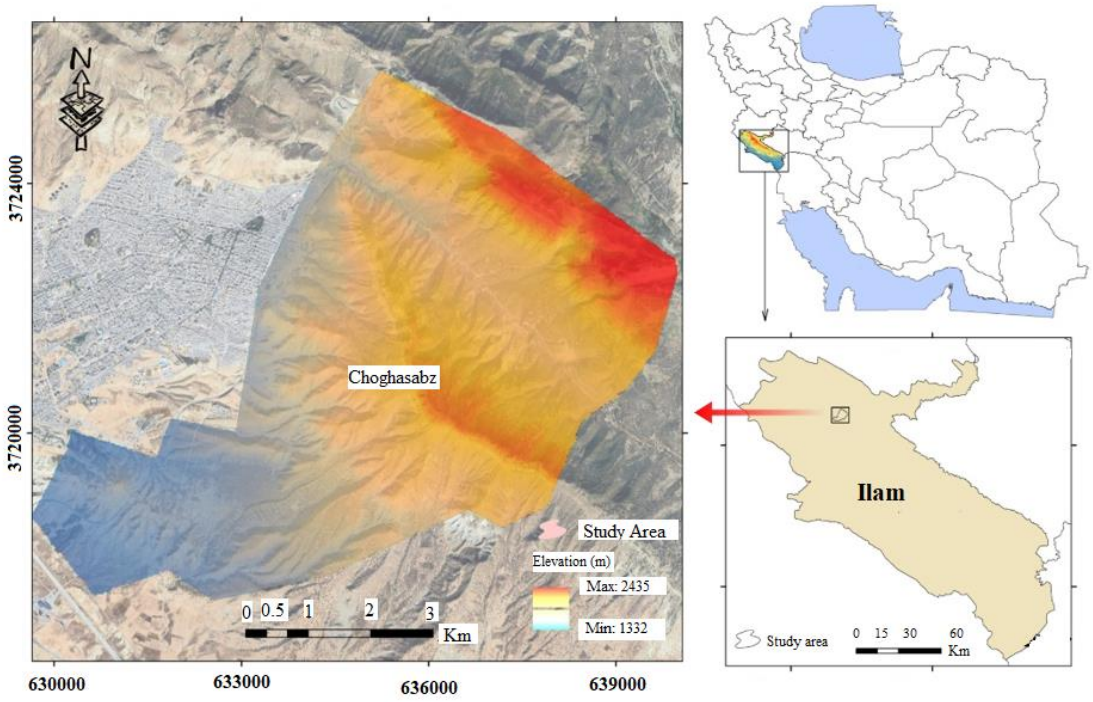
منابع آب و خاک در نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان زیربنای حیات و پایداری جوامع انسانی اهمیت ویژه‌ای دارند. به‌رغم محدودیت این منابع در این نواحی، بهره‌برداری ناپایدار و بدون توجه به اصول علمی مدیریت آن‌ها باعث ویرانی روز افزون و افزایش هدررفت منابع آب و خاک شده است. در نتیجه، بخش گسترده‌ای از زمین‌ها در این مناطق در معرض کاهش عملکرد و نابودی منابع‌طبیعی هستند. بهره‌برداری بهینه از چرخه آب در این نواحی نیازمند شناخت دقیق ویژگی‌های محیطی و سرمایه‌گذاری علمی و عملی در راستای مدیریت پایدار است (سلیمانی ۲۰۱۶). فرسایش خاک در این مناطق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی، چالش‌های جدی برای مدیریت منابع طبیعی ایجادکرده است. ازاین‌رو، برای برآورد و مهار فرسایش، شناسایی عامل‌های مؤثر و تدوین برنامه‌های حفاظت خاک و همچنین انتخاب گونه‌های مناسب و اثر آنها در کاهش اندازۀ رواناب و رسوب برای احیای مناطق ویران‌شده لازم و ضروری است. ازاین‌رو، در سال‌های پیشین پژوهش‌های بیشتری برای بررسی رابطه میان تغییرات پوشش گیاهی و رواناب و رسوب انجام شده است (آراگاو و همکاران ۲۰۲۱، دینگ و همکاران ۲۰۲۲، دینگ و همکاران ۲۰۲۴، ژانگ و همکاران ۲۰۲۵). یکی از عامل‌های موثر در کاهش فرسایش و هدررفت خاک، تاج‌پوشش درختان و چگونگی توزیع مکانی آن‌ها است. نقش پوشش گیاهی و جنگلی در بخشی از چرخه آب‌شناختی با گیرش هوایی بارش‌ها، توزیع زمانی و مکانی آن‌ها، کاهش سرعت برخورد قطرات باران بر سطح زمین، تبخیر و تعرق، کاهش رواناب و افزایش نفوذ آن، از دیدگاه حفاظت آب و خاک، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. پوشش گیاهی، با کاهش تولید رواناب و افزایش نفوذپذیری خاک، آن را در برابر فرسایش حفظ می‌کند (وینرایت و همکاران ۲۰۰۲) و سبب تثبیت ریشه‌ها در خاک شده و انرژی قطرات باران را به‌وسیله اندام هوایی به‌ویژه تاج‌پوشش، کاهش می‌دهد؛ ازاین‌رو، پوشش گیاهی می‌تواند به‌عنوان یک مانع فیزیکی در رخداد فرسایش عمل کرده و روند فرسایش و رسوب را در سطح زمین تغییر دهد (نگی و همکاران ۲۰۱۰). از سوی دیگر، پوشش گیاهی به‌وسیله تاج‌پوشش، ساختار ریشه‌ای و لایه لاشبرگی، باعث مهار فرسایش خاک می‌شود، ازاین‌رو، کاهش پوشش گیاهی، باعث افزایش اندازۀ رواناب و فرسایش خاک می‌شود (صادقی و همکاران ۲۰۱۴). جریان رواناب ایجادشده با انتقال ذرات خاک موجب هدررفت عناصر غذایی مؤثر در خاک می‌شود؛ تعیین زمان شروع و حجم رواناب در مدیریت پاسخ آبخیزها در برابر بارندگی از متغیرهای مهم در مدیریت آبخیزها است. از میان عامل‌های مختلف مؤثر بر زمان شروع و حجم رواناب، شدت بارندگی یکی از مهم‌ترین عامل‌ها است (مورنو و همکاران ۲۰۱۰). با توجه به دسترسی‌نداشتن به اطلاعات و محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط سخت فیزیکی کار در آبخیزها و نیز نوسانات غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی مانند خشک‌سالی‌های بلندمدت، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فرآیندهای اثرگذار بر هدررفت خاک در عرصه‌های طبیعی دشوار است (بارتس و همکاران ۲۰۰۲). بر این اساس، در بسیاری از پژوهش‌های ارزیابی و برآورد فرسایش و تولید رسوب، از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده می‌شود (زمک و همکاران ۲۰۱۶، هسکه و همکاران ۲۰۱۹). باید توجه داشت که استفاده از شبیه‌ساز باران خود با محدودیت‌هایی همراه است، به‌طوری که دستگاه‌های شبیه‌ساز باران هرگز نمی‌توانند شرایط طبیعی را به‌طور کامل ایجاد کنند؛ اما به‌رغم چالش‌های موجود، استفاده از این دستگاه‌ها به دلیل مزایای نامبرده، در جهان رایج است (آذرتاج و همکاران ۲۰۱۹، داناکووا و همکاران ۲۰۱۷، شریدان و همکاران ۲۰۰۸). از دیدگاه نظری، استفاده از شبیه‌ساز

باران هم موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود، و هم با استفاده از آن می‌توان اندازهٔ رواناب و رسوب را به‌همراه فرآیندهای تأثیرگذار در تولید فرسایش و رسوب ارزیابی کرد (کاویان و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش‌های گوناگونی در این زمینه انجام‌شده است. در پژوهشی، لیلی (۲۰۱۷)، اثر شکل رویشی و درصد پوشش گیاهی را بر اندازهٔ تولید رواناب و رسوب با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران بررسی کرد و دریافت که کمترین و بیشترین زمان آستانه شروع رواناب و ضریب رواناب به‌ترتیب مربوط به تیمار دیم‌زار رهاشده و شکل رویشی گراس بود. آذرتاج و همکاران (۲۰۱۹)، اثر تغییر کاربری بر رواناب و فرسایش خاک با استفاده از شبیه‌سازی باران در منطقه حیران استان اردبیل بررسی کردند و گزارش کردند که با تبدیل مرتع دست‌نخورده به زمین زراعی، حجم رواناب تولیدی حدود پنج برابر افزایش یافت. معیری و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از شبیه‌ساز باران، اثر تراکم پوشش گیاهی بر رواناب و هدررفت خاک حاصل از فرسایش بین‌شیاری در ترانشه خاکبرداری‌شده جاده جنگلی کوهمیان آزادشهر را بررسی کردند و دریافتند تفاوت میان اندازه‌های مختلف مؤلفه‌های رواناب و هدررفت در درصدهای مختلف پوشش گیاهی معنی‌دار بود. ژاوو و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از شبیه‌ساز بارش روی قطعه‌های ۶۲۵ سانتی‌متر مربعی، اثرات پوشش گیاهی در تولید رواناب و رسوب را در فلات لِس چین بررسی کردند و گزارش کردند که رابطه میان اندازهٔ رواناب تجمعی و رسوب بسیارخوب بود و به‌طور کلی، با افزایش تراکم پوشش گیاهی، اندازهٔ رسوب بیشتر از اندازهٔ رواناب کاهش یافت و در مراتع طبیعی نیز، با افزایش پوشش گیاهی اندازهٔ رسوب به‌شدت کاهش یافت. در کشور سوئیس ویلهابر و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از شبیه‌ساز باران نقش پوشش گیاهی در بارش با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت را روی قطعه‌های با تراکم مختلف پوشش گیاهی بررسی کردند و دریافتند که افزایش پوشش گیاهی سبب کاهش تولید رسوب و افزایش ثبات و پایداری خاک شد. رستمی و همکاران (۲۰۲۲) تغییر رواناب سطحی و فرسایش در خاک‌های دچار آتش‌سوزی و تحت کاربری‌های مختلف (جنگل و زمین زراعی) در مقایسه با مناطق بدون آتش‌سوزی را با استفاده از شبیه‌ساز باران بررسی کردند و گزارش کردند که تفاوت نفوذ آب در میان مکان‌های سوخته و نسوخته تحت سه کاربری معنی‌دار نبود. در شماری از مهمترین پژوهش‌های انجام‌شده به‌منظور بررسی اثر پوشش گیاهی بر جلوگیری ایجاد رواناب و کاهش هدررفت خاک در نقاط مختلف دنیا، انواع گوناگون دستگاه شبیه‌ساز باران، پوشش گیاهی، سرعت و زمان‌های بارش، بررسی شده‌اند. در بیشتر این پژوهش‌ها اثرات مثبت وجود پوشش گیاهی در کاهش رواناب و جلوگیری از هدررفت مواد غذایی و عناصر خاک گزارش‌شده است. اما، اندازهٔ این اثرات مثبت از دیدگاه کمی برای گونه‌های مختلف و خاک‌های با خصوصیات ساختاری متفاوت، یکسان نیست (ویلهابر و همکاران ۲۰۱۹، لیو و همکاران ۲۰۱۴، معیری و همکاران ۲۰۱۸، اتحاد ابری و همکاران ۲۰۱۷، دینگ و همکاران ۲۰۲۲، دینگ و همکاران ۲۰۲۴، ژانگ و همکاران ۲۰۲۵). شایان ذکر است در اغلب این پژوهش‌ها بررسی بیشتر موضوعات نامبرده به‌دلیل ماهیت پیچیده سازوکارهای موجود توصیه‌شده است. اهمیت این موضوع در مناطقی که به هر دلیل پوشش گیاهی آنها ضعیف‌شده یا نابودشده و با گونه‌های جنگلی دیگر واکاری شده‌اند، دوچندان است. ازاین‌رو، این پژوهش نیز بر پایهٔ اهمیت آب و خاک در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و سیاسی مناطق غرب ایران و نیز بر پایه کارکرد اساسی و محوری جنگل‌کاری در حفظ آب و خاک، نقش و جایگاه پوشش گیاهی از دیدگاه نگهداشت آب و کاهش رواناب، برنامه‌ریزی و اجرا شد. از سوی دیگر، تاکنون در استان ایلام و در مورد گونه‌های جنگل‌کاری‌شده و اهمیت اثر حفاظتی آنها در مهار رواناب و کاهش رسوب با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران، پژوهشی انجام‌نشده است و با توجه به اهمیت و ضرورت موضوع، این پژوهش با هدف بررسی اثر جنگل‌کاری بر تغییرات رواناب و رسوب و ضریب رواناب در مقایسه با جنگل‌های طبیعی بلوط و عرصه‌های خارج از تاج‌پوشش انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

محدوده مطالعه‌شده، پارک جنگلی چغاسبز، در استان ایلام و شهرستان ایلام و با مختصات جغرافیایی طول شرقی "۴۹ '۲۳ °۴۶ تا "۳۵ '۳۰ °۴۶ و عرض شمالی "۱۵ '۳۵ °۳۳ تا "۴۷ '۳۹ °۳۳ بود. این منطقه در تقسیم‌بندی کلی آب‌شناسی استان، جزو آبخیز شهر ایلام به‌شمار می‌آید و از شمال به بلندی‌های شلم و دره ارغوان، از غرب به شهر ایلام، از شرق به مناطق جنگلی و از جنوب به فرودگاه ایلام، محدودشده است (شکل ۱). بررسی‌های میدانی نشان داد که در منطقه چهار گونه جنگلی اصلی شامل گونه بلوط ایرانی با تاج‌پوششی تا ۵۰٪ (QU1)، گونه بلوط ایرانی با تاج‌پوششی میان ۵ تا ۲۵٪ (QU2)، گونه بلوط-ارغوان (Cr-QU) و گونه بلوط-زالزالک (Crat-QU) است. افزون بر این، دو قطعه غیرجنگلی شامل قطعات صخره‌ای و گونه مرتعی نیز در منطقه مشاهده شد (طرح جامع مدیریت و بهره‌وری پارک جنگلی بلوط ۲۰۱۶). در سال‌های گذشته در نقاط مختلفی از این پارک جنگل‌کاری گونه‌های مختلف به‌ویژه سوزنی‌برگان انجام‌شده است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن مدیترانه‌ای و بر اساس روش آمبرژه مرطوب معتدل است و دمای کمینه و بیشینه به‌ترتیب ۴/۶- و ۴۷/۶ درجه سانتی‌گراد ثبت‌شده است. میانگین سالانه بارندگی در این منطقه میان ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر است که در مناطق کوهستانی شمالی و غربی به ۸۰۰ میلی‌متر و در دشت‌های مرکزی و جنوبی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر است. بر اساس آمار ثبت‌شده در ایستگاه همدید شهر ایلام، میانگین سالانه بارندگی در این شهر ۵۷۸ میلی‌متر است (رستمی و همکاران ۲۰۲۳). میانگین سالانه دما نیز حدود ۱۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است و در مناطق کوهستانی، دما در زمستان زیر صفر و در مناطق جنوبی، در تابستان بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. این ویژگی‌های اقلیمی و تنوع پوشش گیاهی، شرایط منحصربه‌فردی را برای بررسی روابط میان پوشش گیاهی، رواناب و فرسایش خاک فراهم‌آورده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده.

Figure 1- Location of the study area.

روش پژوهش

به‌منظور مقایسه اثر جنگل‌کاری گونه زربین (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) و جنگل طبیعی شاخه‌زاد بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) بر اندازهٔ رواناب و رسوب، از دستگاه شبیه‌ساز باران پرتابل استفاده شد. این دستگاه شامل بخش‌های مختلف سامانهٔ جمع‌آوری آب مازاد، سامانهٔ آب‌رسانی، صفحه بارش و برد کنترلی بود. اجزاء صفحه بارش دو نازل نوسانی از نوع ویجت ۸۰۱۰۰ با قطر روزنه ۴/۵ میلی‌متر با امکان حرکت روی یک ریل با طول دو متر بود که پایه‌های آن متحرک و با قابلیت تنظیم بلندی تا ۲۷۰ سانتی‌متر بود. نازل‌ها یک الگوی بارش بادبزنی با محدوده‌ای از قطرات با اندازه‌های مختلف ایجاد کرد. فشار بهینه ۸۰ کیلو پاسکال بود، که در این فشار سرعت سقوط قطرات باران با روش عکس‌برداری، ۷/۱ متر بر ثانیه محاسبه شد. قطر قطرات باران شبیه‌سازی‌شده در محدوده میان ۰/۴ تا ۴/۴ میلی‌متر و بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده محاسبه شد (ارغند و همکاران ۲۰۲۵، رستمی و همکاران ۲۰۲۳، شیخ و همکاران ۲۰۱۶، شیخ و همکاران ۲۰۱۷). در این پژوهش، بارش با شدت و مدت زمان مشخص شبیه‌سازی شد. ازاین‌رو، با استفاده از نمودارهای شدت-مدت-فراوانی، شدت و پایه زمانی بارش تعیین شد و از رسوب و رواناب زیرآشکوب این توده‌ها (با شیب متوسط حدود ۳۰ درصد) با استفاده از قطعات دو مترمربعی (۱×۲ متر) نمونه‌برداری شد. شبیه‌سازی بارش در سه تکرار، در دو مدت زمان بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای و با شدت بارش ۸۰ میلی‌متر بر ساعت (با دوره بازگشت متوسط ۵۰ ساله) انجام شد (شکل ۲).



شکل ۲- دستگاه شبیه‌ساز باران و شیوه جمع‌آوری نمونه رواناب و رسوب.

Figure 2 - Rainfall simulator and method of collecting runoff and sediment samples.

در این پژوهش، در هر توده جنگل‌کاری‌شده با گونه سرو زربین، جنگل طبیعی بلوط و منطقه شاهد (شکل ۳)، سه تکرار برای شبیه‌سازی باران درنظر گرفته شد. افزون بر این، محدوده‌های خارج از تاج‌پوشش در مجاورت این توده‌ها به‌طور تصادفی در سه تکرار به‌عنوان شاهد تعیین و نمونه‌های رواناب و رسوب جمع‌آوری شدند. افزون بر این، از هر توده و منطقه شاهد در مجاورت قطعات آزمایشی، سه نمونه خاک برداشت شد. خصوصیات فیزیکی خاک، شامل جرم مخصوص ظاهری و بافت خاک (شن، رس و سیلت)، نیز برای این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از اجرای شبیه‌سازی، نمونه‌های رواناب و رسوب در ظروف مخصوص جمع‌آوری و برای اندازه‌گیری سنجه‌های مدنظر به آزمایشگاه انتقال یافت. پس از تعیین اندازهٔ رواناب و رسوب در هر منطقه و در زمان‌های بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه، خصوصیات مختلف شامل ضریب رواناب و اندازهٔ هدررفت خاک محاسبه شد.



شکل ۳- زیراشکوب جنگل‌کاری سرو زربین، جنگل طبیعی بلوط و منطقه شاهد.

Figure 3- Understory of the cypress (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) plantation, natural oak forest, and the control area.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ انجام شد. تفاوت‌ها با تجزیه پراکنش یک‌طرفه بررسی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد. افزون بر این، به‌دلیل بررسی نمونه‌ها در دو مدت زمان بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای، مقایسه میانگین داده‌ها در زمان‌های نامبرده با استفاده از آزمون T انجام شد.

نتایج و بحث

مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی خاک

نتایج تجزیه پراکنش نشان داد که اثر پوشش‌های گیاهی مختلف بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک معنی‌دار بود. به‌ویژه، اثر پوشش‌های گیاهی بر جرم مخصوص ظاهری خاک (BD)، درصد شن و درصد رس در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بود (جدول ۱). این یافته بیانگر آن است که این شاخص‌ها تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی هستند. اثر پوشش‌های گیاهی بر درصد سیلت معنی‌دار نبود یعنی این ویژگی خاک تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی نیست. افزون بر این، نتایج نشان داد که تفاوت جرم مخصوص ظاهری خاک در منطقه خارج از تاج‌پوشش با دو منطقه دیگر، یعنی توده طبیعی بلوط و جنگل‌کاری زربین معنی‌دار بود. جرم مخصوص ظاهری خاک در توده طبیعی بلوط به‌طور معنی‌داری کمتر از جنگل‌کاری زربین بود. افزون بر این، بیشترین جرم مخصوص ظاهری در جنگل‌کاری زربین مشاهده شد (شکل ۴). دلیل این یافته ممکن است تراکم بیشتر خاک در این منطقه باشد. از سوی دیگر، اندازه‌های بیشتر ماده آلی و لاشبرگ در جنگل طبیعی بلوط منجر به کاهش فشردگی خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری شد. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان داد اثر پوشش‌های گیاهی بر جرم مخصوص ظاهری و ترکیب دانه‌بندی خاک (شن و رس) قابل‌توجه است، به‌طوری که اندازهٔ شن و رس در توده طبیعی بلوط به‌طور معنی‌داری کمتر از جنگل‌کاری زربین و شاهد بود اما درصد سیلت خاک تحت تأثیر پوشش‌های گیاهی نبود (جدول ۱ و شکل ۴). این نتایج با یافته‌های ژو و همکاران ۲۰۲۲، اسلامی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰، مبنی بر اهمیت نوع پوشش گیاهی در مدیریت ویژگی‌های فیزیکی خاک هم‌راستا است.

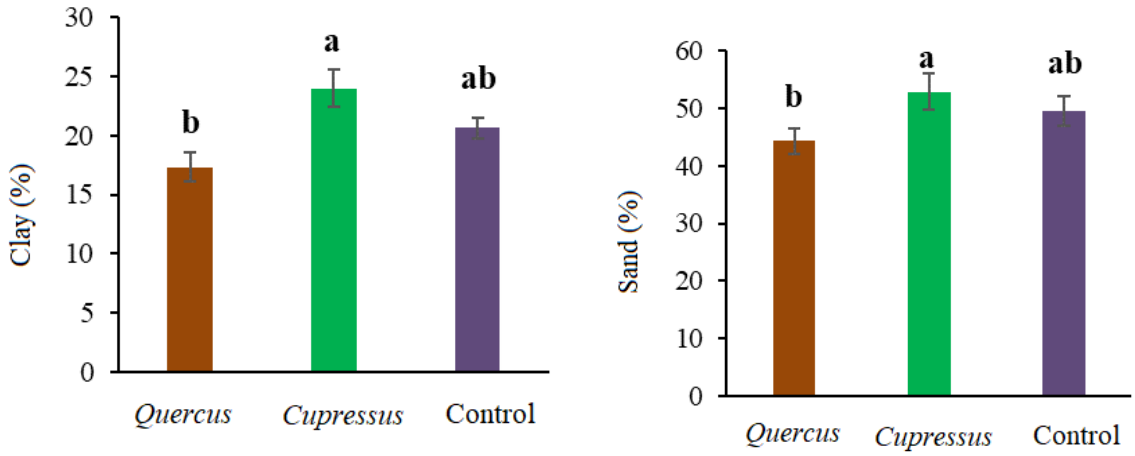
جدول ۱- تجزیه پراکنش اثر پوشش‌های گیاهی مختلف بر خصوصیات فیزیکی خاک.

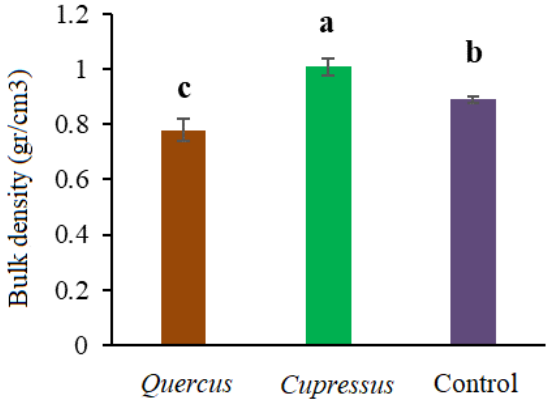
Table 1- Analysis of variance of the effect of different vegetation covers on soil physical properties.

Variable	F	Df	Sig.
BD (g/cm^3)	6.753	2	0.029*
Sand (%)	7.532	2	0.023*
Silt (%)	4.418	2	0.066
Clay (%)	9.375	2	0.014*

*: معنی‌دار در سطح ۵٪.

*: Significance at 5% level





شکل ۴- مقایسه میانگین (± اشتباه معیار) خصوصیات فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، شن و رس میان پوشش‌های گیاهی مختلف).

حروف مختلف روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار میان میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است.

Figure 4- Comparison of the mean (± standard error) of soil physical properties (bulk density, sand, and clay) under different vegetation covers.

Different letters above the bars indicate significant differences among means based on Duncan's multiple range test.

حجم رواناب و رسوب

در توده طبیعی بلوط، حجم رواناب ۱۸۷۵/۳ میلی‌لیتر که بیشتر از توده زربین (۰) و کمتر از شاهد (۱۲۴۳۲/۶ میلی‌لیتر) بود. بیشترین اندازهٔ رسوب مربوط به شاهد (۱۴/۷ گرم) بود. در توده طبیعی بلوط اندازهٔ رسوب ناچیز (۰/۴۹ گرم) و جنگل‌کاری زربین هیچ رسوبی مشاهده نشد، که ممکن است دلیل آن پوشش گیاهی متراکم و نفوذپذیری زیاد خاک (تجمع لاشبرگ‌های چند ساله و کند تجزیه‌پذیر آن) باشد. بیشترین اندازهٔ رواناب و رسوب در منطقه خارج تاج‌پوشش، مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده اثر مثبت پوشش‌های گیاهی در کاهش رواناب و رسوب است، به‌ویژه در مناطق جنگل‌کاری و توده طبیعی بلوط که در مقایسه با منطقه بدون پوشش گیاهی، رواناب و رسوب کمتر بود (جدول ۲).

جدول ۲- اندازهٔ رواناب و رسوب در مناطق مطالعه‌شده.

Table 2- Amount of runoff and sediment in various study areas.

Variable	Location	Mean
Runoff	*Cupressus sempervirens*	0 c
	Quercus brantii Lindl	1875.3 b
	Control	12432.6 a
	Sig.	**0.01**
Sediment	*Cupressus sempervirens*	0 b
	Quercus brantii Lindl	0.49 b
	Control	14.7 a
	Sig.	**0.03**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار میان میانگین‌ها است ($p< 0.05$).

Different letters indicate significant differences among the means ($p< 0.05$).

مقایسه میانگین حجم رواناب بر اساس مدت زمان بارش

در توده طبیعی بلوط، میانگین حجم رواناب در مدت زمان ۳۰ دقیقه (۲۶۸۸/۶۷ میلی‌لیتر) به‌طور معنی‌داری بیشتر از زمان ۱۵ دقیقه (۹۹۵/۳۳ میلی‌لیتر) بود. در جنگل‌کاری زربین، هیچ‌گونه روانابی مشاهده نشد و به این دلیل، میانگین حجم رواناب برای هر دو مدت زمان بارش و انحراف معیار نیز صفر بود. این یافته نشان‌دهنده بی اثر بودن بارش بر رواناب در این منطقه در این بازه‌های زمانی و شرایط رطوبتی خاک است. در منطقه خارج تاج‌پوشش، میانگین حجم رواناب در مدت زمان ۳۰ دقیقه (۱۹۵۰۶ میلی‌لیتر) به‌طور معنی‌داری بیشتر از زمان ۱۵ دقیقه (۵۳۶۳/۵۰ میلی‌لیتر) بود (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین حجم رواناب بر اساس مدت زمان بارش.

Table 3- Comparison of average runoff volume based on rainfall duration.

Location	30 min.		15 min.		t Parameter	Significant Level (P)
	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean		
Quercus brantii Lindl	990.407	2688.67 a	227.740	995.33 b	-2.886	**0.045**
Cupressus sempervirens	0	0	0	0	-	-
Control	1846.963	19506 a	1133.492	5363.50 b	-0.229	**0.012**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار میان میانگین‌ها است ($p< 0.05$)

Different letters indicate significant differences among the means.

مقایسه میانگین اندازهٔ رسوب بر اساس مدت زمان بارش

تجزیه و تحلیل مقایسه میانگین اندازهٔ رسوب بر اساس مدت زمان بارش در مناطق مختلف در جدول ۴ ارائه‌شده است. برای منطقه توده طبیعی بلوط، میانگین اندازهٔ رسوب در مدت زمان ۱۵ دقیقه برابر با ۰/۵۴ گرم با انحراف معیار ۶۰۶۸/ ۰و در مدت زمان ۳۰ دقیقه برابر با ۱/۰۷۵ گرم با انحراف معیار ۰/۳۹ بود. آماره t برای این مقایسه برابر با ۱/۲۶۹- و سطح معنی‌داری ۰/۳۲۳ بود که نشان‌دهنده نبودن تفاوت معنی‌دار میان اندازهٔ رسوب در این دو مدت زمان بارش است. این یافته بیانگر آن است که تغییر مدت زمان بارش تحت این شرایط بر اندازهٔ رسوب در این منطقه بی اثر بود. در منطقه جنگل‌کاری زربین، هیچ‌گونه رسوبی مشاهده نشد. ازاین‌رو، میانگین اندازهٔ رسوب برای هر دو مدت زمان بارش و انحراف معیار نیز صفر بود. این یافته نشان‌دهنده بی اثر بودن بارش بر اندازهٔ رسوب در این منطقه است. در منطقه خارج تاج‌پوشش، میانگین اندازهٔ رسوب در مدت زمان ۳۰ دقیقه (۱۵/۶۰۴ گرم) به‌طور معنی‌داری در مقایسه با زمان ۱۵ دقیقه (۷/۰۲۸ گرم) بیشتر بود. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش مدت زمان بارش، اندازهٔ رسوب در این منطقه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اندازهٔ رسوب بر اساس مدت زمان بارش

Table 4- Comparison of average sediment amount based on rainfall duration

Location	30 min.		15 min.		t Parameter	Significant Level (P)
	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean		
Quercus brantii Lindl	0.3961	1.075	0.6068	0.5444	-1.269	0.323
Cupressus sempervirens	0	0	0	0	-	-
Control	1.477	15.604 a	2.964	7.028 b	-3.662	0.000

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار میان میانگین‌ها است ($p< 0.05$).

Different letters indicate significant differences among the means.

تغییرات ضریب رواناب در مناطق مختلف

ضریب رواناب درصدی از بارندگی است که به رواناب تبدیل می‌شود. زمانی که ضریب رواناب برابر صفر باشد یعنی هیچ روانابی نیست و همه بارش به‌وسیلهٔ خاک و پوشش گیاهی جذب‌شده و یا تبدیل به بخار شده و یا به‌شکل‌های دیگری هدررفته است. زمانی که ضریب رواناب برابر ۱۰۰ باشد یعنی تمام بارندگی به رواناب تبدیل‌شده است (مهدوی ۲۰۱۳). برای بررسی دقیق اثر پوشش گیاهی بر تغییرات اندازهٔ رواناب در هر منطقه، اندازهٔ رواناب در مدت زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری و بر اندازهٔ بارش در آن بازه زمانی تقسیم و عدد به‌دست آمده در ۱۰۰ ضرب شد تا ضریب رواناب محاسبه شود (جدول ۵).

جدول ۵- اندازهٔ ضریب رواناب به تفکیک مناطق مطالعه‌شده.

Table 5- Amount of runoff coefficient in various study areas.

Variable	Location	15 min.	30 min.
Runoff Coefficient	*Cupressus sempervirens*	0	0
	Quercus brantii Lindl	2.5	3.4
	Control	13.4	24.4

بررسی اثر نوع پوشش گیاهی بر ضریب رواناب بیانگر آن است که بودن یا نبودن پوشش گیاهی و نوع آن و همچنین مدت زمان بارش بر اندازهٔ و ضریب رواناب به‌طور مستقیم اثرگذار است. به‌طوری که با افزایش زمان بارش، ضریب رواناب افزایش یافت. اما، نرخ افزایش ضریب رواناب که از تقسیم ضریب رواناب در مدت بارش ۳۰ دقیقه به ضریب رواناب در مدت بارش ۱۵ دقیقه به‌دست آمد در منطقه شاهد که خاک بدون پوشش بود (۱/۸۲ برابر) در مقایسه با منطقه جنگل‌کاری بلوط (۱/۳۶ برابر) بیشتر بود و این موضوع مؤید اهمیت پوشش گیاهی است. افزون بر این، با تداوم بارش، اندازهٔ رواناب و هدررفت خاک در مناطق بدون پوشش نیز افزایش یافت. وجود پوشش گیاهی در این مناطق به‌وسیلهٔ ریشه‌ها باعث تثبیت خاک و به‌وسیلهٔ تاج‌پوشش درختان سبب کاهش انرژی قطرات باران می‌شود. این ویژگی‌ها به‌عنوان یک مانع فیزیکی در برابر فرسایش عمل می‌کنند (سانگ و همکاران ۲۰۱۹). در زمین‌هایی که خاک پوشیده از گیاهان متراکم است (مانند منطقه جنگل‌کاری زربین)، بیشترین مقاومت در برابر جریان آبی وجود دارد و حتی در بارندگی‌های شدید و شیب‌های زیاد، تولید رسوب و رواناب به حداقل می‌رسد (رفاهی ۲۰۱۸). پوشش گیاهی در خاک به‌دلیل داشتن مواد آلی زیاد و ساختار مناسب و پایدار، سبب افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب و رسوب می‌شوند (ساپوترا و همکاران ۲۰۲۲). پوشش گیاهی جنگلی به‌دلیل داشتن تاج‌پوشش و ساختار ریشه‌ای توسعه‌یافته، ظرفیت زیادی برای افزایش قابلیت نفوذ آب در خاک زیر اشکوب دارد. زیرا، جریان رواناب با انتقال ذرات خاک باعث هدررفت عناصر غذایی مؤثر در خاک می‌شود. با حفظ پوشش گیاهی و توسعه جنگل‌کاری، افزون بر انباشت کربن و حفظ خاکدانه‌ها، با مهار شدت باران به‌وسیله تاج‌پوشش و ساقاب، می‌توان رواناب و رسوب را کاهش داد (بارتز و همکاران ۲۰۰۲، کاو و همکاران ۲۰۰۸). بر پایهٔ نتایج این پژوهش، می‌توان گفت وجود تاج‌پوشش درختی، به‌ویژه در گونه زربین، دلیل کاهش سرعت تجزیه لاشبرگ، افزایش حجم و ژرفای لاشبرگ در سطح زمین بود، و به‌طور معنی‌داری سبب کاهش رواناب در زیر اشکوب این گونه درختی شد. هرچند نتایج این پژوهش اثر مثبت گونه سرو زربین را در کاهش رواناب و رسوب نشان داد ولی نتایج دیگر پژوهش‌ها بیانگر اثرات منفی گونه زربین بر زیراشکوب خود به‌وسیلهٔ آللوپاتی و سمی کردن خاک است. برای مثال می‌توان به اثر گونه سوزنی برگ در تأخیر جوانه‌زنی در پژوهش امبارک (۲۰۱۶) اشاره کرد. ازاین‌رو، در استفاده از این

گونه درختی باید تمام جنبه‌های مثبت و منفی آن را در نظر گرفت. از سوی دیگر، نفوذپذیری ضعیف خاک در مناطق بدون تاج‌پوشش به‌دلیل اندازهٔ کم ماده آلی و لاشبرگ و جرم مخصوص ظاهری زیاد و فشردگی ساختار خاک، موجب افزایش رواناب در این مناطق شد افزون بر این، یافته‌های این پژوهش نشان داد حجم رواناب با افزایش مدت زمان بارش از ۱۵ به ۳۰ دقیقه در مناطق مطالعه‌شده افزایش یافت. در منطقه جنگل‌کاری زربین، هیچ‌گونه روانابی مشاهده نشد. این یافته با نتایج رستگار و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر اهمیت اثر تراکم پوشش گیاهی بر اندازهٔ تولید رواناب، هم‌راستا است. افزون بر این نتایج این پژوهش با یافته‌های پرشماری (لیلی ۲۰۱۷، آذرتاج و همکاران ۲۰۱۹، اتحاد ابری و همکاران ۲۰۱۷، معیری و همکاران ۲۰۱۸، ژانگ و همکاران ۲۰۱۱، پینگ پینگ و همکاران ۲۰۱۳، ویلدهابر و همکاران ۲۰۱۹، نیگوسی و همکاران ۲۰۲۵) همخوانی دارد. در اتیوپی، نتایج پژوهش گدل و همکاران (۲۰۲۵) مؤید اثر مستقیم پوشش گیاهی و شدت بارش بر اندازهٔ رواناب و رسوب بود. در پژوهشی دیگر در اتیوپی نیز نتایج پژوهش انگدی و همکاران (۲۰۲۵) مؤید نقش پوشش گیاهی بود و دریافتند تغییر کاربری و افزایش مناطق مسکونی به‌شدت اندازهٔ رواناب و فرسایش را افزایش داد و نتایج تجزیه پراکنش بیانگر تفاوت معنی‌دار اندازهٔ رسوب در مناطق مختلف بود.

از ویژگی‌های مهم تاج‌پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، ایجاد بستری مناسب در سطح زمین و توسعه شبکه ریشه است که سبب بهبود دانه‌بندی خاک، حفظ ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (ژو و همکاران ۲۰۲۳، لی و همکاران ۲۰۲۳). در چنین شرایطی، رواناب و اندازهٔ رسوب نیز کاهش خواهد یافت. بر اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها، با افزایش مدت زمان بارش از ۱۵ به ۳۰ دقیقه، اندازهٔ رسوب نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پرشماری (پینگ پینگ و همکاران ۲۰۱۳، ژاوو و همکاران ۲۰۱۴، لین و همکاران ۲۰۱۸، ویدهابر و همکاران ۲۰۱۹، آقابیگی و همکاران ۲۰۱۴، سلیمانی و همکاران ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، لیلی ۲۰۱۷، اتحاد ابری و همکاران ۲۰۱۷)، همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف بررسی اثر جنگل‌کاری و توده طبیعی بلوط بر اندازهٔ رواناب و رسوب با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران در منطقه چغاسبز ایلام انجام شد. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان با جنگل‌کاری و ایجاد پوشش گیاهی طبیعی به‌ویژه درختان بلوط می‌توان به‌طور قابل توجهی اندازهٔ رواناب و رسوب را کاهش داد. افزون بر این، این اقدام نقش بسیار مهمی بر بهبود کیفیت منابع آب و خاک دارد. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود برای حفاظت از منابع آب و خاک، اقدامات مدیریتی مناسب مانند کاشت انواع گیاهان بومی و سازگار در مناطق بدون پوشش گیاهی انجام شود. به‌طور کلی، این اقدامات منجر به کاهش رواناب و فرسایش خاک در آبخیزها، مدیریت پایدار منابع‌طبیعی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی خواهند شد. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش فرسایش و حفظ منابع‌طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به توسعه جنگل‌کاری و حفظ پوشش گیاهی توجه بیشتری شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

سپاسگزاری

از دانشگاه ایلام به‌دلیل فراهم آوردن شرایط انجام این پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌شود.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: انجام کارهای میدانی و آزمایشگاهی، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: مفهوم‌سازی، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

نویسندهٔ سوم: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

نویسندهٔ چهارم: مشاوره، بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

Aghabeigi Amin S, Moradi HR, Fattahi B, Fattahi B. 2014. Sediment and runoff measurement in different rangeland vegetation types using rainfall simulator. Ecopersia. 2(2):525-538.

Aragaw HM, Goel MK, Mishra SK. 2021. Hydrological responses to human-induced land use/land cover changes in the Gidabo River Basin, Ethiopia. Hydrological Sciences Journal. 66:640–655. https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1890328

Arghand T, Rostami N, Heydari M, Gheysouri M. 2025. Evaluation of the role of rainfall characteristics and prescribed fire on the runoff and leaching of soil nutrients in the Chogha Sabz Park, Ilam. Watershed Management Research. 37(4):99-118. (In Persian). https://doi.org/10.22092/wmrj.2024.364885.1575

Azartaj E, Rasoulzadeh A, Asghari A. 2019. Investigating the effect of land use change on runoff and soil erosion using rainfall simulation in Heiran Region of Ardabil. Watershed Engineering and Management. 10(1):1-13. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115656

Barthes B, Roos E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several level. Catena. 47:133-149. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00180-1

Cao Y, Ouyang ZY, Zheng H, Huang ZG, Wang XK, Miao H. 2008. Effects of forest plantations on rainfall redistribution and erosion in the red soil region of southern China. Land Degradation and Development. 19(3):321-330. https://doi.org/10.1002/ldr.812

Danáčová M, Valent P, Výleta R, Hlavčová K. 2017. The effects of rainfall on surface runoff and soil erosion from forest areas. In SGEM 2017. 17th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. vol. 17, Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems: Conference proceedings. Vienna, Austria. pp. 641-648.

Ding N, Li YB, Tao FL. 2024. Effects of climate change and land use change on runoff, sediment, nitrogen and phosphorus losses in the Haihe River Basin. Natural Resources Journal. 39:1720–1734. https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20240713

Ding Y, Feng H, Zou B. 2022. Remote Sensing-Based Estimation on Hydrological Response to Land Use and Cover Change. Forests. 13(11):1749. https://doi.org/10.3390/f13111749

Engdaye M, Sileshi D, Mekuria A, Wondimagegn M. 2025. Spatiotemporal modeling of soil loss and sediment yield due to land use and land cover changes: implications for watershed management. Journal of Water and Climate Change. 16(4):1310–1335. https://doi.org/10.2166/wcc.2025.467

Eslaminejad P, Heydari M, Kakhki FV, Mirab-balou M, Omidipour R, Muñoz-Rojas M, Lucas-Borja ME. 2020. Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. Plant and Soil. 456: 43-59. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04691-1

Ethad Abri M, Majnonian B, Malekian A, Jaurgholami M. 2017. Hydrological effects of forest selective harvesting on runoff and sediment yields (Case study: Kheyrud Forest). Journal of Natural Environment. 70(3):481-491. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jne.2017.218576.1264

Gedle A, Rientjes T, Tamiru Haile A, Mekuria W, Hallett P, Smith J. 2025. Responses of surface runoff and soil water-erosion to changes in seasonal land cover and rainfall intensity; the case of Shilansha Watershed, Rift Valley Basin of Ethiopia. Journal of Hydrology: Regional Studies. 58:102289. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102289

Integrated Management and Productivity Plan for Oak Forest Park. 2016. General directorate of natural resources and watershed management of Ilam Province. Natural Resources and Watershed Management Organization of Iran. 180 p. (In Persian).

Kavian A, Mohammadi M, Fallah M, Gholami L. 2016. Effect of wheat straw on changing time to runoff and runoff coefficient in laboratory plots under rainfall simulation. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 5(2):73-82. (In Persian).

Lee K, Song Y, Koo H, Kim H, Kweon H, Koo N. 2023. Evaluation of soil loss tolerance and tree growth features based on planting ground methods in the Alpine Center, degraded forestland in the Republic of Korea. Forests. 14(2):200. https://doi.org/10.3390/f14020200

Leili S. 2017. The effect of vegetation form and percentage of vegetation cover on runoff and sediment. Master's thesis. University of Kurdistan. 130 p. (In Persian).

Lin j, Zhu G, Wei J, Jiang F, Wang MK, Huang Y. 2018. Mulching effects on erosion from sleep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits. Catena. 160: 57–67. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.003

Liu YJ, Wang TW, Cai ChF, Li ZhX, Cheng DB. 2014. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. Science of the Total Environment. 485-486:93-102. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.053

M'barek K. 2016. Chemical composition and phytotoxicity of cupressus sempervirens leaves against crops. Journal of Essential Oil-Bearing Plants. 19(7):1582–1599. https://doi.org/10.1080/0972060X.2016.1226964

Mahdavi M. 2013. Applied hydrology. Volume 2, University of Tehran Press. 437 p.

Mhaske SN, Pathak K, Basak A. 2019. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. Catena. 172:408-420. https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.08.039

Moayeri MH, Moghadamirad M, Abdi E, Ghorbani Vagheie H. 2018. Effect of vegetation cover percentage on runoff and soil loss of interill erosion in forest road cutslope (Case study: Kohmiyan Forest, Azadshahr). Journal of Water and Soil Conservation. 25(2):219-233. (In Persian). https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12464.2719

Moreno M, Heras L, Nicolau J, Martin LM, Wilcox BP. 2010. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient. Water Resources Research. 46:1-12. https://doi.org/10.1029/2009WR007875

Negi GCS, Joshi V, Kumar K. 2010. Spring sanctuary development to meet household water demand in the mountains: A call for action. In: Research for mountain development: Some initiatives and accomplishments. Gyanodya Prakashan, Nainital, India. pp. 25–48.

Nigussie W, Al-Najjar H, Kalantar B, Nega W, Bizelk T, Suryabhagavan KV, Adane N. 2025. Evaluating the impact of land use/land cover and rainfall changes on regional soil erosion. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 16(1):1-35. https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2520374

Pingping H, Xue Sh, Li P, Zhanbin L. 2013. Effect of vegetation cover types on soil infiltration under simulating rainfall. Nature Environment and Pollution Technology. 12(2):193-198.

Rastegar Sh, Barani H, Darijani A, Sheikh VB, Ghorbani J, Ghorbani M. 2014. Comparison of soil loss and sediment rate of some geological formations in vegetation gradients using rain simulator (Case study: Baladeh Noor Summer Rangelands of Mazandaran Province). Journal of Range and Watershed Management. 67(1):31-44. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jrwm.2014.50826

Refahi HGh. 2018. Water erosion and its control. University of Tehran Press. 672 p. (In Persian).

Rostami N, Heydari M, Uddin SMM, Esteban Lucas-Borja M, Zema DA. 2022. Hydrological response of burned soils in croplands, and Pine and Oak forests in Zagros Forest ecosystem (Western Iran) under rainfall simulations at Micro-Plot Scale. Forests. 13:246. https://doi.org/10.3390/f13020246

Rostami N, Omidipour R, Heydari M, Mohammadi M, Rabbani M, Moradi A, Mehraban I, Sadatzadeh M, Ghobadian Z, Rostami F, Moradnezhad M, Abdoli Sh, Bagheri Z, Armon Z, Jamshidi R, Foladvand S, Rasouli M, Rahmani S. 2023. Design and implementation of an erosion and sedimentation research station for investigating rainfall-runoff events in Western Iran: A case study of Ilam University's erosion and sediment research station. Hydrophysics. 9(1):109-118. (In Persian).

Sadeghi SHR, Sharifi Moghadam E, Gholami L. 2014. Effect of rice straw on surface runoff and soil loss in small plots. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 3(4):73-83. (In Persian).

Saputra DD, Sari RR, Hairiah K, Suprayogo D, van Noordwijk M. 2022. Recovery after volcanic ash deposition: vegetation effects on soil organic carbon, soil structure and

infiltration rates. Plant and Soil. 474(1-2):163-179. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05322-7

Sheikh VB, Jafari Shalamzari M, Farajollahi A, Fazli P. 2016. Soil erosion under simulated rainfall in loess lands with emphasis on land-use, Slope and Aspect. Ecopersia. 4(2):1395-1409. https://doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.2.1395

Sheikh VB, Shalamzari MJ, Farajollahi A. 2017. Sediment-bound soil nutrient loss under simulated rainfall. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University. 67(1):37-48. https://doi.org/10.17099/jffiu.95610

Sheridan GJ, Noske PJ, Lane PN, Sherwin CB. 2008. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. Catena. 73(1):49-62. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.08.006

Soleimani F, Kavian A, Soleimani K, Sharifi F, Shahidi K. 2018. The effect of multi-additive application on runoff time and runoff coefficient under different conditions and rainfall simulation. Watershed Engineering and Management. 10(2):214-230. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.116467

Soleimani F. 2016. Simulating the effect of water and soil conservation operations on the threshold of runoff initiation and sediment production using a rain simulator. Master's thesis, University of Sari. 145 p. (In Persian).

Song Z, Seitz S, Li J, Goebes P, Schmidt K, Kühn P, Shi X, Scholten T. 2019. Tree diversity reduced soil erosion by affecting tree canopy and biological soil crust development in a subtropical forest experiment. Forest Ecology and Management. 444 :69-77. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.015

Wainwright I, Parsons AJ, Schlesinger WH. 2002. Hydrology-vegetation interactions in areas of discontinuous flow on a semi-arid hajada, Southern New Mexico. Arid Environment. 51:319-338. https://doi.org/10.1006/jare.2002.0970

Wildhaber YS, Banninger D, Burri K, Alewell C. 2019. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland. Catena. 91:56-62. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.03.004

Xu C, Lin TC, Yang Z, Liu X, Xiong D, Chen S, Wu F, Yang Y. 2022. Forest conversion effects on soil organic carbon are regulated by soil aggregate stability and not by recalcitrance: Evidence from a reforestation experiment. Catena, 219:106613. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106613

Zemke JJ. 2016. Runoff and soil erosion assessment on forest roads using a small scale rainfall simulator. Hydrology. 3(3):1-21. https://doi.org/10.3390/hydrology3030025

Zhang GH, Liu GB, Wang GL, Wang YX. 2011. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles. Pedosphere. 21(5): 676–684. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60170-7

Zhang L, Li W, Chen Z, Hu R, Yin Z, Qin C, Li X. 2025. Impacts and prediction of land use/cover change on runoff in the Jinghe River Basin, China. Land. 14(3):626. https://doi.org/10.3390/land14030626

Zhao X, Chen X, Huang J, Wu P, Helmers M. 2014. Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China. Science of Food and Agriculture. 94(3):497-503. https://doi.org/10.1002/jsfa.6275

Zhu X, Yuan X, Lu E, Yang B, Wang H, Du Y, Singh AK, Liu W. 2023. Soil splash erosion: An overlooked issue for sustainable rubber plantation in the tropical region of China. International Soil and Water Conservation Research. 11(1):30-42. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.05.005

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Comparison of Runoff and Soil Erosion in Natural Stands of Iranian Oak (*Quercus brantii* Lindl.) and Afforested with Cupressus (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) in the Zagros Forest Ecosystems

Somayeh Heydari[1], Noredin Rostami*[2], Mehdi Heydari[3], Morteza Gheysouri[4]

1- M.Sc. student of Combating Desertification, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Iran

3- Professor, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Iran

4- Ph.D. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Investigating the factors affecting runoff and soil erosion is one of the main measures for proper soil management in natural areas. Water and soil resources in arid and semi-arid areas are of particular importance as the foundation of life and sustainability of human societies. On the other hand, the limitation of these resources in these areas, unsustainable exploitation, and lack of attention to the scientific principles of their management have caused increasing destruction and increased the risk of desertification. Soil erosion in these areas, as one of the most important environmental threats, has created serious challenges for natural resource management; therefore, identifying the factors affecting soil erosion and developing soil conservation programs is essential. Given the lack of appropriate statistical data, the difficult physical working conditions in watersheds, and unpredictable climatic fluctuations such as long-term droughts, it is difficult to collect information related to the processes affecting soil loss in natural areas. Accordingly, in many erosion and sediment studies, a rainfall simulator is used. Given the importance of the subject, in the present study, the effect of afforestation on changes in runoff and sediment was investigated in comparison with natural oak forests and areas outside the canopy cover. This study aimed to investigate the volume of runoff and soil erosion in the understory of natural coppice oak (*Quercus brantii* Lindl.) and planted cupressus (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) forests after rainfall simulation.

Materials and Methods

The study area, Choghasabz Forest Park, is part of the Ilam city watershed in Ilam province.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** n.rostami@ilam.ac.ir

Citation: Heydari, S., Rostami, N., Heydari, M., Gheysouri, M. 2026. Comparison of Runoff and Soil Erosion in Natural Stands of Iranian Oak (*Quercus brantii* Lindl.) and Afforested with Cupressus (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) in the Zagros Forest Ecosystems. Watershed Management Research. 39(3): 79-96.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.372152.1658

Received: 01 February 2026, **Received in revised form:** 22 February 2026, **Accepted:** 19 March 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 79-96.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

CC BY

The climatic characteristics and diversity of vegetation cover provide unique conditions for investigating the relationships between vegetation, runoff, and soil erosion in this area. In order to compare the effects of afforestation of the cypress species and natural oak coppice forest on runoff and sediment, a portable rainfall simulator was used. In this study, rainfall was simulated with a specific intensity and duration based on intensity-duration-frequency (IDF) diagrams, and sampling of sediment and runoff under the trees of these stands was carried out using 2 m^2 plots (1×2 m). Rainfall simulation was carried out for two periods of 15 and 30 minutes and with a rainfall intensity of 80 mm/h. Then, the rainfall simulator was installed in three random replicates in both the afforested and natural stands and the control plot in a position outside the canopy and adjacent to the stands, and runoff, sediment, and soil samples were collected in each stand and control area. Then, statistical analysis of the data was performed using SPSS version 25 software. The differences among treatments were evaluated using one-way, and mean comparisons were performed using Duncan's test. In addition, the mean values obtained at the 15- and 30-min rainfall durations were compared using the independent samples T-test.

Results and Discussion

The results of scatter analysis showed that the effect of different vegetation covers on some physical properties of soil was significant. In the cypress afforestation, no runoff and sediment were observed, which may be due to the dense vegetation cover and high soil permeability. In the area outside the canopy, the highest amount of runoff and sediment was observed, indicating the positive effect of vegetation covers on reducing runoff and sediment. For the sediment variable, the differences in sediment rates in the cypress afforestation area with the other two areas were not significant, but the differences between the natural oak stand and the area outside the canopy were statistically significant. According to the results of this study, the runoff coefficient increased with increasing rainfall duration. However, the rate of increase in the runoff coefficient from 30 min to 15 min of rainfall was higher in the control area (1.82 times) than in the oak afforestation area (1.36 times). This finding indicates the importance of vegetation cover and show that under conditions of continued rainfall, the amount of runoff and soil loss will in areas without vegetation cover. Based on the results of this study, the presence of tree canopy, the presence of tree canopy was the reason for the decrease in the rate of litter decomposition, the increase in the volume and depth of litter on the ground surface, and significantlydecrease runoff under the canopy of this tree species. On the other hand, poor soil permeability in areas without canopy cover due to low organic matter and litter content, high bulk density, and compact soil structure led to increased runoff in these areas. An important feature of the vegetation canopy, especially trees, is the creation of a suitable substrate on the ground surface and the development of a root network that helps improve soil gradation, maintain soil structure, and stabilize soil aggregates. In such conditions, runoff is so-called filtered and sedimentation is reduced.

Conclusion and Suggestions

The findings of this study indicate that vegetation is of great importance in regulating soil hydrological characteristics and reducing erosion and sedimentation. Accordingly, it can be concluded that maintaining and restoring vegetation in forest stands, especially in the Zagros regions, improves soil physical properties and reducing problems caused by erosion. Therefore, it is suggested that appropriate management measures such as planting native trees and shrubs in degraded and sparsely vegetated areas should be taken to cconservation soil and water resources. Overall, these measures can help reduce runoff and soil erosion in watersheds, sustainable management of natural resources and reducing environmental problems. It is suggested that greater attention be paid to the development of afforestation and preservation of vegetation cover as an effective solution to reduce erosion and preserve natural resources in arid and semi-arid regions.

Keywords: Canopy cover, Choghasabz, Ilam, rainfall simulator, runoff, soil erosion

Article Type: Research Article

Acknowledgement
We thank Ilam University for providing the conditions to carry out this thesis.

Conflicts of Interest
The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement
The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution
First Author: Conducting field and laboratory work, writing the initial draft of the article
Second Author: Conceptualization, guidance, editing and reviewing the article, reviewing the results
Third Author: Performing software/statistical analyses, consulting, reviewing the article text, statistical analyses
Fourth Author: Consulting, reviewing the article text

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان

آرمان کیانی[۱]، کاکا شاهدی*[۲]، محمود حبیب‌نژادروشن[۳]، علی حقی‌زاده[۴]

۱- دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران
۲ و ۳- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران
۴- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

آب، انرژی و غذا اساس توسعه پایدار جوامع هستند، و به‌شکل جدایی‌ناپذیر و درهم‌تنیده با یکدیگر مرتبط هستند، به‌گونه‌ای که تغییر در هر یک از آن‌ها سبب پیامدهای مستقیم و غیرمستقیمی بر دیگری است. هدف این پژوهش، ارائه و توسعه یک رویکرد روش‌شناختی نوین بود که بتوان به‌طور کارآمد از فرآیند تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری در عرضه و تقاضای منابع یک آبخیز پشتیبانی کرد و پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در قالب سناریوهای مختلف را به‌طور کمی مدل‌سازی کرد. از ساختار این چارچوب می‌توان به‌عنوان ابزار مفیدی در بهبود سیاست‌گذاری و ارتقای سطح پایداری آبخیزها بهره برد و چشم‌اندازهای کارآمدتری را در مدیریت منابع فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک چارچوب کمی و یکپارچه مبتنی بر پویایی سامانه با درنظر گرفتن تعاملات عرضه و تقاضا منابع با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی، توسعه و مدل‌سازی شد. از آنجایی که مدل‌سازی دقیق و قابل اطمینان پویایی‌شناسی سامانه برای ارزیابی پایداری منابع نیازمند پایگاه داده‌ای جامع و شفاف است، داده‌های لازم از مراجع رسمی و معتبر ملی گردآوری شد. به‌منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل در منطقه مطالعه‌شده، از داده‌های تاریخی ثبت‌شده سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار Vensim استفاده شد. افزون بر این، گام زمانی شبیه‌سازی به‌طور سالانه تنظیم و افق کلی مدل‌سازی، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و رویکردهای سیاست‌گذاری بلندمدت شرکت مدیریت منابع آب ایران، از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۲۵ تعیین شد تا امکان پیش‌بینی رفتار آینده سامانه فراهم آید.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** k.shahedi@sanru.ac.ir
استناد: کیانی، آ.، شاهدی، ک.، حبیب‌نژاد روشن، م.، حقی‌زاده، ع. ۱۴۰۵. مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۱۲۲-۹۷.
شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2026.372167.1659
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۱/۰۹، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۳۱، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۹۷ تا ۱۲۲.
ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس
© نویسندگان
CC BY

پس از توسعه مدل، اعتبارسنجی آن با بهره‌گیری از آزمون‌های استاندارد پویایی‌شناسی سامانه مانند آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار، انجام شد. نتایج بر اساس حلقه‌های بازخوردی تحلیل شدند. با تلفیق یافته‌های تحلیل حساسیت و ویژگی‌های بومی منطقه، سناریوهای مختلفی تعریف و در مدل پیاده‌سازی شد. سرانجام، مطلوب‌ترین سناریو با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی رتبه‌بندی و انتخاب شد.

نتایج و بحث

با توجه به متغیرهای مربوط به بخش آب، انرژی، غذا و مؤلفه‌های اجتماعی و اقتصادی فرآیند مدل‌سازی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل، نتایج نشان داد در سال ۱۳۸۰ جمعیت ساکن آبخیز ۵۶۴۰۰ نفر بود. بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده مبتنی بر متغیرهایی چون نرخ تولد، نرخ مرگ و میر و نرخ مهاجرت، جمعیت در سال ۱۴۲۵ برابر با ۸۵۷۷۰ نفر پیش‌بینی شد. این یافته نشان‌دهندهٔ ۵۲٪ افزایش جمعیت بود. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، کاهش منابع آب منطقه قابل‌توجه خواهد بود. کاهش حجم آب سطحی در دوره نخست از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴ حدود ۲۱ میلیون مترمکعب بود و در دوره دوم از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۲۵، دو میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد. در طول دوره مدل‌سازی حجم آب زیرزمینی حدود ۱/۷۷ میلیارد مترمکعب کاهش یافت. این درحالی است که کاهش پایداری منابع آب (سطحی و زیرزمینی) ۱/۷۹ میلیارد مترمکعب برآورد شد. روند پایداری انرژی (فسیلی و الکتریکی) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ افزایشی و ۲/۲ میلیون بشکه نفت بود. روند انرژی در دوره زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۹ کاهشی بود، اما همچنان در محدوده مثبت باقی ماند، یعنی پاسخگوی نیازهای منطقه است. از سال ۱۴۲۰ تا ۱۴۲۵ اندازه‌های شاخص پایداری انرژی منفی پیش‌بینی شد و تا سال ۱۴۲۵ به محدوده منفی ۱/۸ میلیون بشکه نفت خواهد رسید. این یافته بیانگر کاهش شدید پایداری انرژی و ایجاد چالش‌های اساسی این بخش است. روند پایداری منابع غذایی با توجه به مجموع چهار منبع (کشاورزی، دام و طیور، شیلات و خوراک دام و طیور با منشا کشاورزی) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۹، افزایشی پیش‌بینی شد و عرضه مواد غذایی تا سال ۱۴۰۹ حدود ۵۹۷ هزار تن بیش از تقاضا خواهد بود. از سال ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ این روند تغییر خواهد کرد و ذخیره غذا در سال ۱۴۲۵ به ۳۹۰ هزار تن کاهش خواهد یافت. این یافته نشان‌دهنده کاهش ذخایر و تضعیف پایداری منابع غذایی است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد در زیرسامانه آب، سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری، در زیرسامانه انرژی سهم انرژی فسیلی و اندازهٔ مصرف سرانه انرژی در بخش‌های مسکونی و تجاری و در زیرسامانه کشاورزی سطح زیرکشت چغندر قند و سرانه مصرف غذا، متغیرهای مهمی به‌شمار می‌آیند. در این پژوهش بر اساس نتایج تحلیل حساسیت و شناسایی نقاط اثرگذار بر مدل، سناریوی اصلاح الگوی مصرف با ضریب نزدیکی ۰/۷۵۵ به‌عنوان بهترین گزینه برای ارتقای پایداری منابع معرفی شد. از سوی دیگر، کمترین اثرگذاری بر بهبود پایداری منابع مربوط به سناریوی حالت پایه با ضریب نزدیکی ۰/۱۸۹ بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ماهیت مدیریت و برنامه‌ریزی جامع در آبخیزها، پیچیده و چندبعدی است. زیرا، ابعاد آب‌شناختی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌شکل درهم‌تنیده بر یکدیگر اثرگذارند. تحقق مدیریت کارآمد در چنین سامانه‌ای نیازمند درک علمی، دقیق و ژرف از چالش‌ها و تعاملات میان مؤلفه‌های مختلف مانند منابع آب، انرژی و غذا است. با وجود اثربخشی رویکرد همبست با نگاه سامانه‌ای، اجرای این رویکرد همچنان با چالش‌هایی مانند کمبود داده‌های دقیق، ماهیت میان‌رشته‌ای موضوع، پیچیدگی ساختارهای اقتصادی و اجتماعی و خلاهای موجود در سیاست‌گذاری مواجه است. بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود با توسعه مدل‌های جامع‌تر همبست و با درنظر گرفتن نبودن قطعیت‌ها و تغییرات اقلیمی، زمینه تصمیم‌سازی آگاهانه و مدیریت پایدار منابع را با اصلاح الگوی مصرف، تنوع‌بخشی به منابع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تقویت مدیریت خطر، فراهم آورد.

واژگان کلیدی

آبخیز سراب صیدعلی، پایداری، پویایی سامانه، Vensim، همبست

مقدمه

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ میلادی، تقاضای جهانی برای سه منبع حیاتی آب، انرژی و غذا به‌ترتیب حدود ۵۵٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ افزایش خواهد یافت (ون و همکاران ۲۰۲۲). آب، انرژی و غذا اساس توسعه پایدار جوامع هستند، به‌طوری که تغییر در هر یک از آن‌ها باعث فشار و اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر دیگر منابع می‌شود (یان و همکاران ۲۰۱۸). اصل بنیادین در تأمین امنیت و پایداری آب، انرژی و غذا ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضا است (طایفه و همکاران ۲۰۲۳). ازاین‌رو، مفهوم پیوند آب-انرژی-غذا به‌عنوان رویکردی نوین مطرح‌شده است. با این رویکرد و تمرکز بر ارتباطات بازخوردی میان عناصر مهم، می‌توان امکان بررسی تکامل مشترک و ویژگی‌های بلندمدت سامانه‌های منابع آب، انرژی و غذا را فراهم آورد (لیو ۲۰۱۹). با بهره‌گیری از پویایی سامانه به‌دلیل توانایی زیاد در مدل‌سازی جریان منابع، امکان مدل‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای آینده نیز فراهم‌شده است (لوو و همکاران ۲۰۲۵). یکی از ابزارهای قدرتمند برای پیاده‌سازی مدل‌های پویایی سامانه، نرم‌افزار Vensim است. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار امکان تحلیل و مدل‌سازی روابط میان منابع فراهم‌شده است (نیوول و همکاران ۲۰۱۹).

از هنگامی که واژه همبست آب-انرژی-غذا به‌وسیلهٔ هاف ارائه شد (هاف ۲۰۱۱)، پژوهش‌های گوناگونی درباره این رویکرد انجام‌شده است. در این راستا، کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) پایداری منابع آب از دیدگاه پیوند آب، انرژی و غذا در استان خوزستان را ارزیابی کردند و دریافتند با افزایش ۱۶٪ راندمان آبیاری، عملکرد محصولات غذایی ۵٪ افزایش یافت و مصرف انرژی در فرآیند تولید محصولات غذایی کاهش یافت. در پژوهشی، لونی و شریف‌زاده (۲۰۲۲) ضرورت‌ها و چالش‌های رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در ایران را بررسی کردند و دریافتند که سیاست‌گذاری‌های بخشی، نبودن مدیریت یکپارچه، کمبود منابع مالی و اطلاعاتی و نبود قوانین بالادستی از موانع اصلی در مسیر اجرای این رویکرد به‌شمار می‌آید. ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) همبست آب، انرژی، غذا و جامعه در آبخیز هانجیانگ چین را با استفاده از پویایی سامانه مدل‌سازی کردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که با صرفه‌جویی در مصرف منابع، به‌طور سالانه می‌توان کمبود انرژی را از ۱۶/۱۷٪ به ۷٪/۵ و کاهش منابع آبی را از ۱۵/۸۹٪ به ۷/۲٪ ارتقا داد. گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) پایداری منابع آب شهرستان‌های درمیان و سربیشه در استان خراسان جنوبی را با رویکرد همبست آب، انرژی و غذا بررسی کردند و گزارش کردند که می‌توان با سناریوهای ترکیبی با افزایش ۶۰٪ راندمان آبیاری، تولید غذا را ۳۰٪ افزایش داد و همزمان زمینه را برای گسترش ۵۰٪ بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم آورد. پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) مدیریت منابع در دو آبخیز پینیوس و خانبا در کشور یونان را براساس یک سامانه مشارکتی پویا و سناریوهای مختلف بررسی کردند و دریافتند که با درک تعاملات پیچیده در فرآیند مدل‌سازی همراه با درنظر گرفتن مشارکت سودبران می‌توان سبب ارتقا تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت پایدار منابع شد.

بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه پیوند آب، انرژی و غذا و توجه نداشتن به مؤلفه‌های اثرگذار و بدون درنظر گرفتن رویکرد بخشی، لازم است خلاءهای موجود در این پژوهش‌ها برطرف شود. ازاین‌رو، با به‌کارگیری همزمان مؤلفه‌های اثرگذار (مانند تغذیه دام و طیور، راندمان آبیاری، سطح زیرکشت و غیره) و توجه به اصل دیدگاه سامانه‌ای و کل‌نگر در مقیاس آبخیز، می‌توان یک رویکرد همبست با ساختاری پویا، برای بهره‌گیری از نتایج تحلیل حساسیت و طراحی سناریو با در نظر گرفتن سهم نسبی متغیرها و ویژگی‌های منطقه‌ای، برای ارتقای مدیریت منابع ارائه داد.

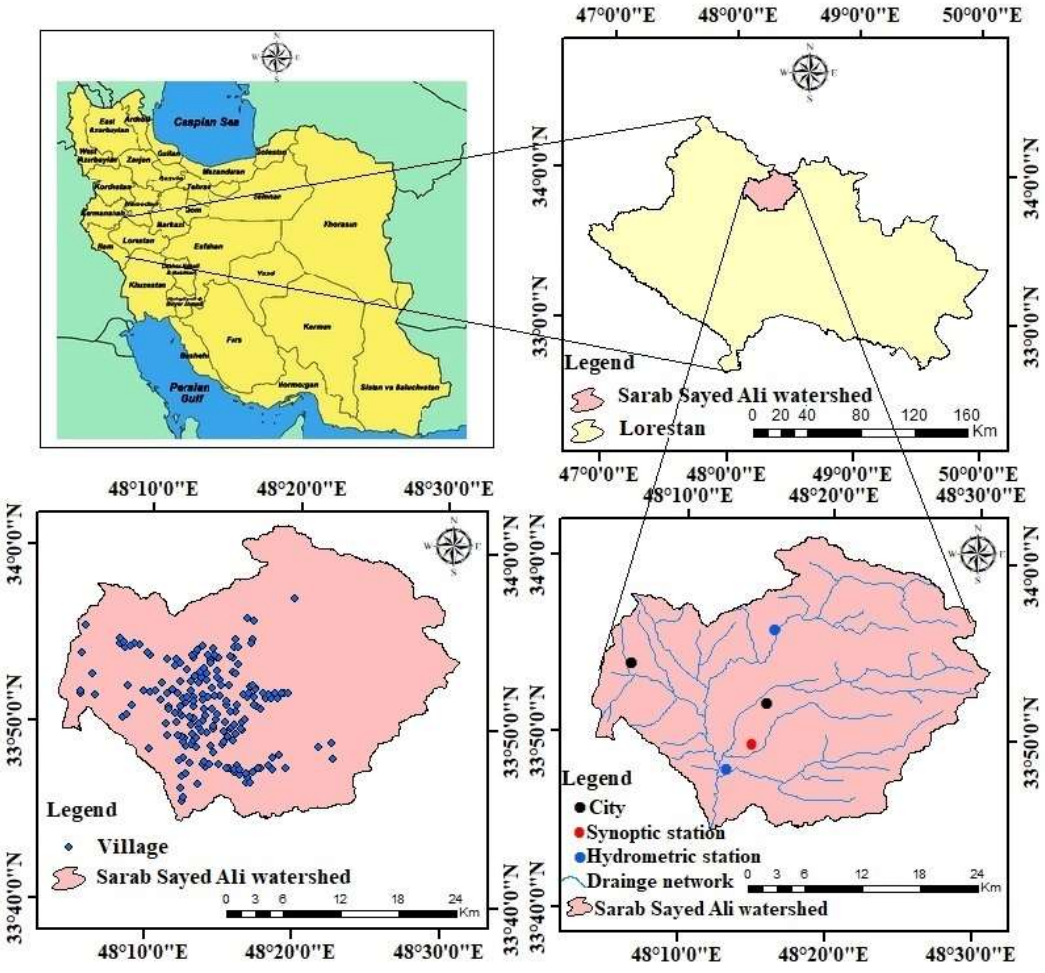
هدف این پژوهش، ارائه و توسعه یک رویکرد روش‌شناختی نوین بود که بتوان به‌طور کارآمد از فرآیند تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری در عرضه و تقاضای منابع یک آبخیز پشتیبانی کرد و پایداری آب، انرژی و غذا بر پایهٔ رویکرد پویایی سامانه در قالب

سناریوهای مختلف در آبخیز سراب صیدعلی در استان لرستان را به‌طور کمی مدل‌سازی کرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

مساحت منطقه پژوهشی (آبخیز سراب صیدعلی در شهرستان سلسله) دراستان لرستان، ۷۹۷/۵ کیلومترمربع بود. موقعیت جغرافیایی این آبخیز ″۳۹ ′۰۳ °۴۸ تا ″۴۸ ′۳۰ °۴۸ طول شرقی و ″۳۴ ′۴۴ °۳۳ تا ″۲۳ ′۰۱ °۳۴ عرض شمالی است. دو شهر الشتر و فیروزآباد و ۱۸۱ روستا در این محدوده هستند (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳). زمین‌های کشاورزی با مساحت بیش از ۲۹۷۰۰ هکتار به دو شیوه آبی و دیم کشت می‌شوند. منابع آب منطقه شامل چاه‌های ژرف و نیمه‌ژرف، ایستگاه پمپاژ فیض‌آباد، آب‌های سطحی و چشمه‌ها است. بر اساس آمار و اطلاعات ۳۵ ساله هواشناسی (۱۳۹۴-۱۳۶۰) میانگین سالانهٔ بارندگی ۵۰۴ میلی‌متر، میانگین سالانه دما ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد است (مهندسین مشاور جاماب ۲۰۱۹). میانگین سالانه آبدهی خروجی آبخیز در دوره بلندمدت (۱۳۹۵–۱۳۶۰) برابر با ۷/۴۳ مترمکعب بر ثانیه بود (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳). به‌دلیل نبودن نیروگاه تولید انرژی الکتریکی در این آبخیز، برق مصرفی ساکنان آبخیز به‌وسیلهٔ برق منطقه‌ای باختر تأمین و توزیع می‌شود. انرژی فسیلی و فرآورده‌های نفتی منطقه به‌وسیلهٔ خطوط انتقال و تانکرهای سوخت‌رسان از مناطق نفت‌خیز جنوب کشور تأمین می‌شود. موقعیت جغرافیایی آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان در شکل ۱ نشان‌داده شده است.

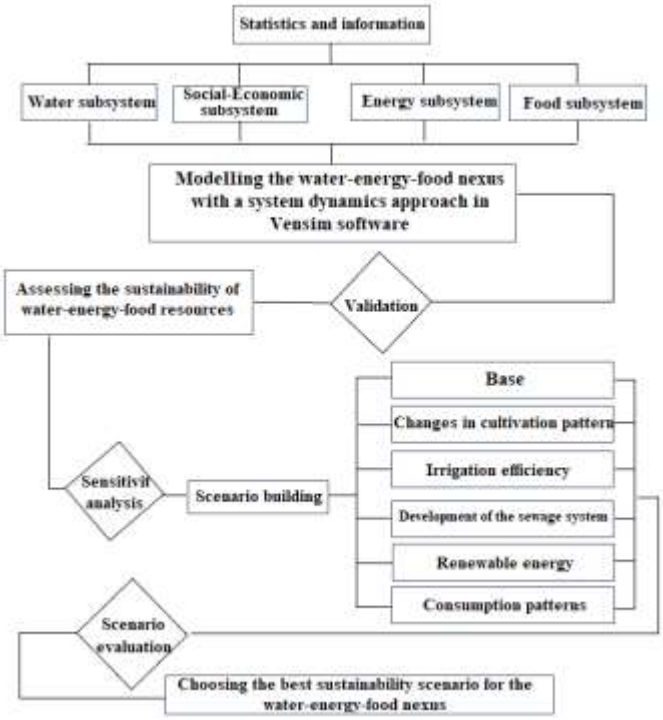


شکل ۱- موقعیت آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان.

Figure 1- Location of the Sarab Sayed Ali Watershed in Iran and Lorestan Province.

روش پژوهش

در این پژوهش یک چارچوب کمی و یکپارچه مبتنی بر پویایی سامانه با در نظر گرفتن تعاملات عرضه و تقاضا منابع با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی توسعه و مدل‌سازی شد. از آنجایی که مدل‌سازی دقیق و قابل اطمینان پویایی‌شناسی سامانه برای ارزیابی پایداری این منابع نیازمند پایگاه داده‌ای جامع و شفاف است، داده‌های لازم (شامل متغیرهای پویای سامانه، سنجه‌های ثابت و سری‌های زمانی) با توجه به ماهیت چندرشته‌ای پژوهش از مراجع رسمی و معتبر ملی گردآوری شد. این نهادها شامل شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان جهاد کشاورزی، شرکت توزیع نیروی برق و شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی، مرکز آمار ایران و دیگر نهادهای مرتبط بودند. به‌منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل در منطقه مطالعه‌شده، از داده‌های تاریخی ثبت‌شده سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار Vensim استفاده شد. افزون بر این، گام زمانی شبیه‌سازی به‌طور سالانه تنظیم و افق کلی مدل‌سازی، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و رویکردهای سیاست‌گذاری برنامه‌های بلندمدت شرکت مدیریت منابع آب ایران، از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۲۵ تعیین شد تا امکان پیش‌بینی رفتار آینده سامانه فراهم آید. پس از توسعه مدل، اعتبارسنجی آن با بهره‌گیری از آزمون‌های استاندارد پویایی‌شناسی سامانه مانند آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار انجام شد. سپس، نتایج بر اساس حلقه‌های بازخوردی تحلیل شد. در گام پایانی نیز، با تلفیق یافته‌های تحلیل حساسیت و ویژگی‌های بومی منطقه، سناریوهای مختلفی تعریف و در مدل پیاده‌سازی شد. سرانجام، مطلوب‌ترین سناریو با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی رتبه‌بندی و انتخاب شد. مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ نشان‌داده شده است.



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش.
Figure 2- Research steps.

پویایی سامانه و مدل مفهومی

موضوع همبست در محدوده تفکر سامانه‌ای جای دارد و این تفکر را می‌توان با روش‌های پویا و توسعه‌یافته حل کرد (مداوئس ۲۰۰۸). ازاین‌رو، پویایی سامانه ارائه‌شده به‌وسیلهٔ فارستر (فارستر۱۹۶۱)، توانایی بررسی ساز و کارهای بازخوردی پیچیده و تغییرات پویا را فراهم آورد (لی و همکاران ۲۰۲۴). در چارچوب پویایی‌شناسی سامانه، معماری مدل بر پایه تعامل یکپارچه و علمی سه متغیر بنیادین تبیین می‌شود.

متغیر اول، متغیر حالت است که وضعیت انباشت سامانه را در هر لحظه از زمان نشان می‌دهد و تغییر اندازهٔ آن فقط به‌وسیلهٔ جریان‌های ورودی و خروجی متصل به آن رخ می‌دهد. متغیر دوم، متغیر جریان است که نشان‌دهندهٔ سرعت افزایش یا کاهش متغیر حالت (انباشت) در واحد زمان است. متغیر سوم، متغیرهای کمکی برای بیان روابط جبری، منطقی یا تجربی با اثرگذاری بر متغیر حالت و جریان هستند. متغیر کمکی معمولا بازنمایی‌کننده مفاهیمی مانند شاخص‌ها، نسبت‌ها، تقاضاهای محاسبه‌شده، کارایی‌ها و توابع سیاستی هستند و سبب ساده‌سازی ساختار مدل و افزایش شفافیت معادله‌ها می‌شوند (استرمن ۲۰۰۲).

برای پیاده‌سازی مدل‌های پویایی سامانه، به محیطی با امکان تعریف متغیرها، رسم روابط علّی و شبیه‌سازی رفتار سامانه در طول زمان نیاز است. در این راستا، با بهره‌گیری از نرم‌افزار Vensim امکان نمایش ساختارهای علّی و انباشت-جریان، تحلیل تعامل میان متغیرها و بررسی سناریوهای مختلف فراهم‌شده است و از آن برای تحلیل و مدیریت پایدار منابع و مصارف استفاده می‌شود.

مفهوم پایداری در همبست آب-انرژی-غذا

چارچوب همبست که اساس آن بر مفهوم پایداری استوار است، به‌عنوان یک اصل بنیادین مطرح می‌شود و هدف اصلی آن ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضا در سه بخش آب، انرژی و غذا است (اشنایدر و همکاران ۲۰۱۹). بر این اساس، پایداری را می‌توان به‌شکل رابطه ۱ تعریف کرد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱).

$$Sustainability = Supply - Demand \quad (۱)$$

در این پژوهش، پایداری در این مدل بر اساس تفاوت میان عرضه و تقاضا تعریف و برآورد شد. چنانچه عرضه منابع پاسخگوی سطح تقاضا و نیازها باشد، وضعیت پایدار یا پایداری مثبت است و اگر عرضه نیازهای ساکنین و بخش‌ها را پاسخگو نباشد، شرایط ناپایدار یا پایداری منفی است.

زیرسامانه اجتماعی-اقتصادی

سامانه اجتماعی-اقتصادی را می‌توان به‌عنوان یک ساختار پویا در نظر گرفت که تعامل میان جمعیت، اقتصاد را با منابع حیاتی پیونددادهاست (چامئس و همکاران ۲۰۲۱). محرک‌های اصلی تقاضا در این مدل، بر پایه پویایی جمعیت و رشد اقتصادی استوار است. داده‌های جمعیتی بر اساس نرخ تولد، مرگ و میر و مهاجرت از نتایج سرشماری‌های دوره‌ای و برآوردهای سالانه مرکز آمار استخراج و وارد نرم‌افزار مدل شدند، که بر اساس آن شکل‌گیری الگوهای جمعیتی، مسیر تقاضای منابع تعیین شد (زیاری و یوسفی ۲۰۲۴). در این پژوهش، معادلهٔ کلی مدل‌سازی جمعیت به‌شکل رابطه ۲ بود (اندلا ۲۰۲۴).

$$P(t) = P(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [B_s - D_s + M]dt \quad (۲)$$

P(t): اندازهٔ جمعیت در زمان t، $P(t_0)$: اندازهٔ جمعیت در زمان اولیه و شروع مدل، B_s: اندازهٔ تولد، D_s: اندازهٔ مرگ و میر و M: اندازهٔ مهاجرت بر اساس تغییرات تجمعی با روش انتگرال‌گیری از زمان t_0 یا زمان اولیه تا t_n یا زمان پایانی مدل است.

افزون بر این، رشد اقتصادی به‌دلیل افزایش درآمد با اثرگذاری بر الگوهای مصرف، باعث افزایش فشار بر مصرف منابع و عملکرد پایداری با همبست می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). ازاین‌رو، متغیر رشد اقتصادی به‌شکل رابطه ۳ ارائه شد و در ساختار کلی مدل نیز پیاده‌سازی شد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱)

$$EG = VA_{ws} \times E_{if} + VA_{wf} \times F_{if} \quad (۳)$$

VA_{we}: ارزش افزوده هر واحد آب در بخش انرژی، E_{if}: ضریب تأثیر انرژی، WA_{wf}: ارزش افزوده هر واحد آب در بخش غذا و F_{if}: ضریب تأثیر غذا است.

زیرسامانه آب

این زیرسامانه بر پایه چرخه آب‌شناختی و با درنظر گرفتن دو منبع آب‌های سطحی و زیرزمینی طراحی شد. تفاوت میان عرضه و تقاضای آب مبنای مدل‌سازی برای ارزیابی پایداری بود (نقدی و همکاران ۲۰۲۱). به‌منظور مفهوم‌سازی و ساختاردهی برای مدل‌سازی، داده‌های پایه هواشناسی و آب‌شناختی شامل نزولات جوی، نوسانات احتمالی بارش و نرخ تبخیر سطحی از سری‌های زمانی و پایگاه‌های داده معتبر استخراج شد. برای تعیین اندازه‌های حجم اولیه آب سطحی و آب زیرزمینی، از گزارش‌های کلان بیلان آب منطقه استفاده شد. افزون بر این، سنجه‌های حاکم بر نرخ جریان نفوذ عمقی و نرخ جریان برگشتی ناشی از مصارف در زیرسامانه‌های کشاورزی، صنعت، شرب و شیلات، سرانه مصرف آب شرب به ازای هر نفر با استناد به پژوهش‌های جامع بالادستی برآورد شدند. این سنجه‌ها در قالب معادله‌های اثرگذار بر ساختار بازخوردی به مدل معرفی شدند و مدل‌سازی در راستای پایداری منابع آب انجام شد. در این مدل، تقاضای آب شرب تابعی از جمعیت و سرانه مصرف است. افزون بر این، بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین مصرف‌کننده آب در منطقه، نقش بسیار اثرگذاری در مدل‌سازی داشت. در این پژوهش، با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ معادلهٔ حاکم بر این زیرسامانه محاسبه شد (اندلا ۲۰۲۴).

$$WR_S(t) = WR_S(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [P + R_S - E - I - C_S - O]dt \quad (۴)$$

$$WR_g(t) = WR_g(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [I + R_g - C_g]dt \quad (۵)$$

$WR_s(t)$: ذخیره آب سطحی در زمان t، $WR_s(t_0)$: ذخیره آب سطحی در زمان اولیه و شروع مدل، P: حجم بارش، t_0: زمان اولیه، t_n: زمان پایانی، R_S: بازگشت آب به منابع سطحی، E: تبخیر، I: آب نفوذیافته به آب زیرزمینی و لایه‌های زیرین، C_S: مصرف آب سطحی، O: اندازهٔ خروجی و نیاز زیست محیطی، $WR_g(t)$: ذخیره آب زیرزمینی در زمان t، $WR_g(t_0)$: ذخیره آب زیرزمینی در زمان اولیه و شروع مدل، R_g: بازگشت آب به منابع زیرزمینی و C_g: مصرف آب زیرزمینی است.

زیرسامانه انرژی

تقاضای انرژی با تجمیع مصرف در بخش‌های مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی مختلف برآورد می‌شود و این تأمین تقاضا بر اساس نوع کشور و منطقه به‌وسیلهٔ نیروگاه‌های برق‌آبی، فسیلی، هسته‌ای و دیگر منابع تأمین می‌شود (وو ۲۰۲۲). به‌منظور ساختاردهی به زیرسامانه در بخش انرژی و درک اثرات متقابل متغیرها، ضریب‌های شدت انرژی در فرآیندهای استخراج، انتقال و توزیع آب بخش‌های (کشاورزی، شرب، صنعت و شیلات) به‌همراه سنجه‌های سرانه مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، مبتنی بر داده‌های ترازنامه انرژی تعیین شدند. در گام بعد، برای تنظیم معادله‌های نرخ در زیرسامانه انرژی، منابع تأمین‌کننده انرژی با تفکیک حامل‌های فسیلی و الکتریکی، بر پایه داده‌های تاریخی مصرف سالانه در (شامل بخش‌های کشاورزی، صنعت و مسکونی) تعیین و در مدل پیاده‌سازی شد. مدل‌سازی بخش انرژی بر پایهٔ رابطه‌های ۶ و ۷ انجام شد (اندلا ۲۰۲۴).

$$E_e(t) = E_e(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_e - D_e]dt \quad (۶)$$

$$E_f(t) = E_f(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_f - D_e]dt \quad (۷)$$

$E_e(t)$: منابع انرژی الکتریکی (برق) در زمان t، $E_e(t_0)$: منابع انرژی الکتریکی در زمان اولیه و شروع مدل، S_f: عرضه برق به شبکه سراسری توزیع برق، D_e: تقاضا

برای مصرف برق، $F_f(t)$: منابع انرژی فسیلی در زمان t، $F_f(t_0)$: منابع انرژی فسیلی در زمان اولیه و شروع مدل، S_f: عرضه فرآورده‌های نفتی و گاز و D_f: تقاضا برای مصرف فرآورده‌های نفتی و گاز است.

زیرسامانه غذا

در این زیرسامانه، تولیدات غذایی از سه منبع اصلی شامل تولیدات زراعی، شیلاتی و دام و طیور تأمین می‌شود. افزون بر این، فرآیندهای مربوط به فراهم‌سازی خوراک دام و مدیریت تغذیه آن‌ها به‌عنوان اجزای مکمل سامانه درنظرگرفته شدند. با توجه به پیچیدگی و تنوع محصولات در زیرسامانه غذا، سری‌های زمانی داده‌های مربوط به سطح زیرکشت و عملکرد تولید در واحد سطح برای محصولات تفکیک‌شده در مدل استخراج شد. این محصولات شامل گندم آبی و دیم، جو، یونجه، چغندر قند، کلزا، لوبیا، باقلا، عدس، نخود و محصولات باغی بودند که داده‌های آن‌ها از سالنامه‌های آماری کشاورزی گردآوری شد. نیاز آبی هر یک از این محصولات با استفاده از نرم‌افزار NETWAT برآورد شد و اندازه‌های راندمان آبیاری نیز بر اساس گزارش‌های عملکرد منطقه‌ای در مدل لحاظ شد. در بخش پروتئین حیوانی نیز داده‌های مربوط به ظرفیت توسعه سالانه، نرخ تقاضا و نیاز آبی به ازای تولید هر واحد دام، طیور و شیلات وارد فرآیند مدل‌سازی شد. افزون بر این، سهم بقایای گیاهی به‌دست آمده از تولید محصولات زراعی (مانند کاه و کلش) در تأمین خوراک دام بر اساس ضریب‌های تبدیل استاندارد کشاورزی محاسبه شد. سرانجام، با درنظر گرفتن این متغیرها و بر اساس اطلاعات سرانه مصرف مواد غذایی (شامل محصولات گیاهی، پروتئین حیوانی و شیلات) و میانگین مصرف خوراک دام و طیور، پایداری تأمین غذا پیش‌بینی و ارزیابی شد. در این پژوهش معادله‌های حاکم بر این زیرسامانه به‌شکل رابطه‌های ۸ تا ۱۱ بود (اندلا ۲۰۲۴).

$$F_{ag(H)}(t) = F_{ag(H)}(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_{ag(w)} + S_{ag(d)} - D_{ag(H)}]dt \quad (۸)$$

$$F_f(t) = F_f(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_f - D_f]dt \quad (۹)$$

$$F_l(t) = F_l(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_l - D_l]dt \quad (۱۰)$$

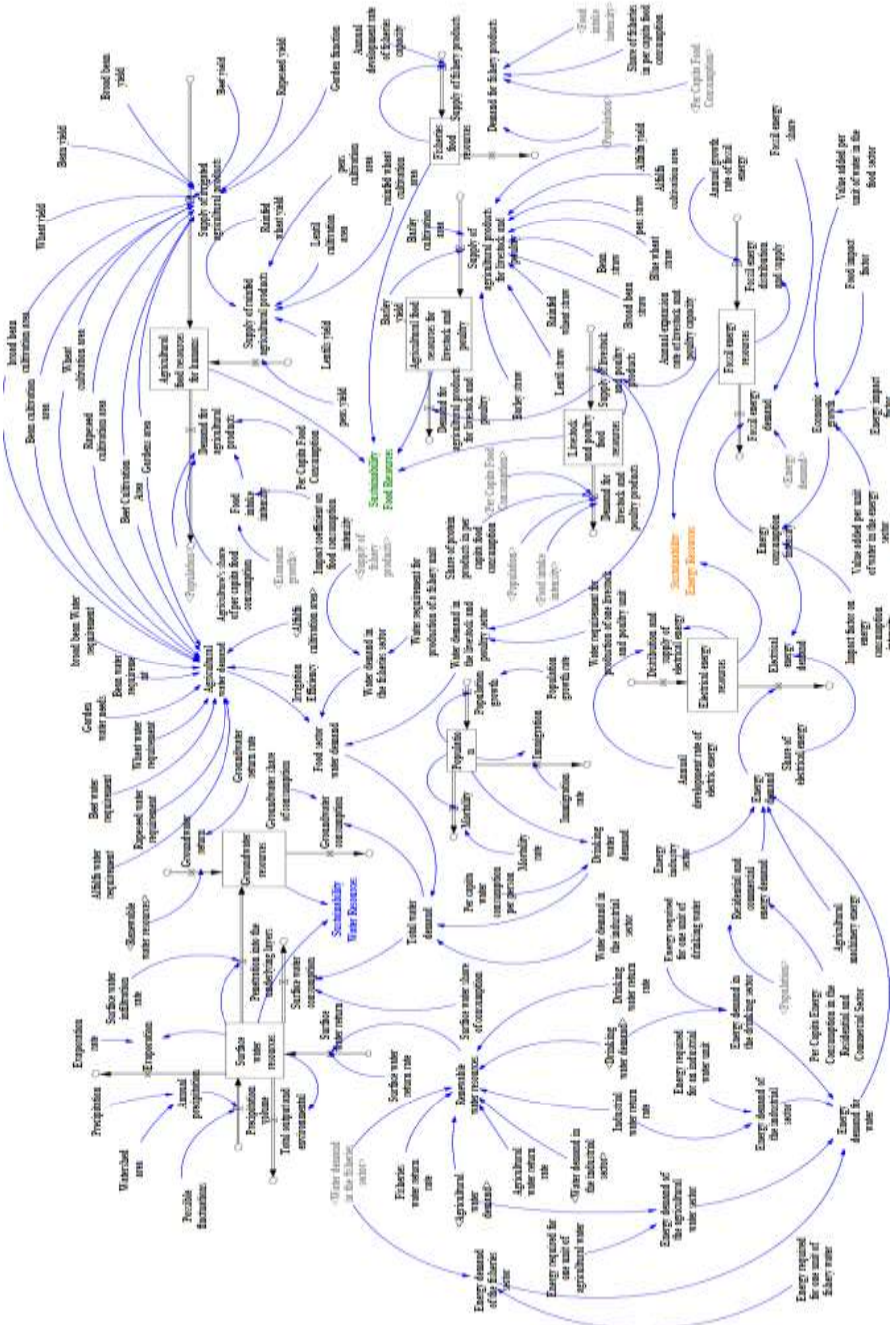
$$F_{ag(L)}(t) = F_{ag(L)}(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_{ag(L)} - D_{ag(L)}]dt \quad (۱۱)$$

$F_{ag(H)}(t)$: منابع غذایی کشاورزی لازم برای انسان در زمان t، $F_{ag(H)}(t_0)$: منابع غذایی کشاورزی مصرفی برای انسان در زمان اولیه و شروع مدل، $S_{ag(w)}$: عرضه محصولات کشاورزی آبی، $S_{ag(d)}$: عرضه محصولات کشاورزی دیم و $D_{ag(H)}$: تقاضا و مصرف محصولات کشاورزی برای انسان، $F_f(t)$: منابع غذایی شیلات در زمان t، $F_f(t_0)$: منابع غذایی شیلات در زمان اولیه و شروع مدل، S_f: عرضه محصولات شیلاتی، D_f: تقاضا برای مصرف محصولات شیلاتی، $F_l(t)$: منابع غذایی دام و طیور، $F_l(t_0)$: منابع غذایی دام و طیور در زمان اولیه و شروع مدل، S_l: عرضه محصولات دام و طیور و D_l: تقاضا برای مصرف محصولات دام و طیور، $F_{ag(L)}(t)$: منابع غذایی کشاورزی لازم برای دام و طیور در زمان t، $F_{ag(L)}(t_0)$: منابع غذایی کشاورزی مصرفی برای دام و طیور در زمان اولیه و شروع مدل، $S_{ag(L)}$: عرضه محصولات کشاورزی برای دام و طیور و $D_{ag(L)}$: تقاضا و مصرف محصولات کشاورزی برای دام و طیور است.

سامانه کلی

بر پایهٔ تحلیل کیفی روابط میان مؤلفه‌های اصلی، ساختار جریان-حالت برای همبست آب-انرژی-غذا با درنظر گرفتن مؤلفه جمعیت و رشد اقتصادی و تعاملات میان زیرسامانه‌ها به‌وسیلهٔ حلقه‌های بازخورد (امانی و همکاران ۲۰۲۵) بر پایه رویکرد انتگرال‌گیری اویلر تدوین و تکمیل شد (اندلا ۲۰۲۴). در فرآیند مدل‌سازی، از گام زمانی یک ساله برای مدل‌سازی و ارزیابی پایداری منابع آب، انرژی و غذا استفاده شد. با توجه به نبودن زیرساخت‌های ذخیره‌سازی بزرگ مقیاس مانند سد در منطقه مطالعه‌شده، متغیر مربوط به سد از مدل حذف شد. انرژی الکتریکی و فسیلی

(نفت، گاز و فرآورده‌های وابسته) به‌طور کامل از خارج از منطقه تأمین‌شده است. یعنی تغییرات در عرضه انرژی ناشی از عامل‌هایی خارج از کنترل منطقه بود، هرچند بخش محدودی از این اقدامات مانند توسعه زیرساخت‌های منطقه‌ای (ایستگاه‌های توزیع یا سامانه‌های تقویت بار) در چارچوب ظرفیت‌های محلی موثر بود. تنوع گسترده تولیدات کشاورزی در منطقه، بستر شکل‌گیری یک سبد غذایی متنوع و غنی برای ساکنان را فراهم آورد. این سبد غذایی هم شامل غلات و حبوبات به‌عنوان پایه تغذیه‌ای، و هم فرآورده‌های پروتئینی و لبنی بود. مدل توسعه‌داده شده همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی در شکل ۳ نشان‌داده شده است.



شکل ۳- همبست آب-انرژی- غذا توسعه‌داده شده در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 3- Water-energy-food nexus developed in the Sarab Sayed Ali Watershed.

اعتبار سنجی

در مدل‌های پویایی سامانه هرچه قدر بتوان روندهای واقعی و روابط درونی سامانه را با دقت بیشتری منعکس کرد، اعتبار علمی مدل افزایش خواهد یافت (لوو و همکاران ۲۰۲۵). به‌منظور اطمینان از دستیابی به اهداف پژوهش، اعتبارسنجی مدل با روش‌های آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار (زاهدی و همکاران ۲۰۲۴) انجام شد. آزمون کفایت مرزی مدل بر اساس نقش متغیرها و حلقه‌های بازخوردی در تبیین رفتار سامانه و جلوگیری از ورود متغیرهای غیرضروری به ساختار مدل است. این آزمون ماهیتی مفهومی و تحلیلی دارد و در نرم‌افزار Vensim این آزمون به‌طور مستقیم قابل محاسبه نیست، بلکه مدل‌ساز با بهره‌گیری از ابزارهایی مانند تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی رفتار مدل و بررسی حلقه‌های بازخوردی، اندازهٔ کفایت و مناسب بودن مرزها، مدل را ارزیابی می‌کند. آزمون سازگاری ابعاد برای اطمینان از صحت منطقی و فیزیکی روابط ریاضی مدل به‌کار می‌رود. در این آزمون، واحد اندازه‌گیری تمام متغیرها بررسی شد تا اطمینان به‌دست آید که طرفین هر معادله از دیدگاه واحد اندازه‌گیری هم‌ارز بوده و جریان‌ها، نرخ‌ها و موجودی‌ها دارای ابعاد واحدی منطقی هستند. در نرم‌افزار Vensim این آزمون به‌طور خودکار انجام شد. به این شیوه که برای هر متغیر واحد تعریف شد، و نرم‌افزار با اجرای قابلیت Units Check ناسازگاری‌های ابعادی در معادله‌ها را شناسایی کرد. در این پژوهش، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطای درصدی (RMSPE) برای ارزیابی اعتبار رفتار مدل، بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه شد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱).

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(S_i - A_i)^2}{A_i}} \qquad (۱۲)$$

n: تعداد داده، S_i: داده برآوردی و A_i: داده مشاهده‌ای است. چنانچه اندازه این شاخص کمتر از ۰/۱ باشد و به سمت صفر میل کند، نشان‌دهنده دقت زیاد مدل‌سازی و افزایش قابلیت اطمینان است.

تحلیل حساسیت و سناریوسازی

تحلیل حساسیت مدل به‌عنوان رویکردی مهم با شناسایی متغیرهای اثرگذار و سنجش اندازهٔ حساسیت خروجی‌ها نسبت به تغییرات ورودی، امکان درک بهتر مدل‌های پویا و ارائه راهکارهای سیاستی پایدار را فراهم می‌آورد. پس از بررسی ویژگی‌های منطقه‌ای، ارزیابی تحلیل حساسیت مدل، با بهره‌گیری از روش مبتنی بر تفاضل پراکنش در بازه ±۱۰٪ متغیرها (موست ۲۰۲۴) در محیط نرم افزاری Vensim انجام شد. پس از این مرحله، شش سناریو شامل سناریو پایه و حفظ وضعیت موجود (ژیئو و همکاران ۲۰۲۳)، تغییر الگوی کشت (حاجی سلیمان و اوزگر ۲۰۲۴)، افزایش راندمان آبیاری (اروندی و همکاران ۱۴۰۰)، ساخت شبکه فاضلاب شهری و صنعتی (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳)، بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر (اروسی و همکاران ۲۰۲۴) و اصلاح الگوی مصرف (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴) در مدل پیاده‌سازی شد.

تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس فازی

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، رویکردهایی تحلیلی هستند که برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها، به‌ویژه در شرایطی که تصمیم‌گیری با پیچیدگی‌های فراوان ناشی از عرضه و تقاضا همراه است، به‌کار گرفته می‌شوند (هان و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش، برای اجرای این روش و انتخاب سناریوی برتر، تشکیل ماتریس تصمیم فازی، بهنجارسازی ماتریس تصمیم فازی، تشکیل ماتریس تصمیم فازی بهنجارشده وزنی، تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، محاسبه فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل، محاسبه ضریب نزدیکی، انجام شد و سرانجام اولویت‌بندی سناریوها پیاده‌سازی شد (عقیلی ۱۳۹۹). بر اساس سناریوهای تعریف‌شده در محیط نرم‌افزار پویایی سامانه Vensim، ابتدا ماتریس تصمیم با توجه به سناریوها و معیارهای اصلی شامل پایداری منابع آب، انرژی و غذا تشکیل شد. سپس، با بهره‌گیری از روش تاپسیس فازی، سناریوها بر اساس معیارهای تعیین‌شده رتبه‌بندی و بهترین سناریو انتخاب شد (سانچز لوزانو و همکاران ۲۰۲۳).

نتایج و بحث

اعتبارسنجی

پیش از ارائه نتایج، اعتبارسنجی مدل‌سازی از دو جنبه ساختاری و رفتاری ضروری بود تا صحت و قابلیت اطمینان آن به‌دست آید. به‌منظور راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی روابط جریان-حالت در مدل‌سازی انجام‌شده، از دیدگاه ۷ نفر از کارشناسان و نخبگان بخش تخصیص وزارت نیرو و مؤسسه تحقیقات آب کشور بهره‌گرفته شد. این فرآیند با برگزاری جلسات و مصاحبه‌های حضوری انجام شد، تا همگام با رفع ابهامات احتمالی، درکی مشترک و دقیق از روابط مذکور به‌دست آید. سرانجام، پس از بازخوردهای تخصصی و پیاده‌سازی‌های تعدیل‌کننده، مدل نهایی تأیید و پذیرش شد. با توجه به روابط و وابستگی میان متغیرها و تناسب واحدهای اندازه‌گیری، ساختار مفهومی سامانه سازگار بود و اعتبار لازم را کسب کرد.

انجام این ارزیابی در بازه‌های زمانی مختلف، به‌دلیل عامل‌هایی چون محدودیت در دسترس‌پذیری و قابل اطمینان بودن داده‌ها، لزوم بررسی تغییرات رفتاری و اندازهٔ اثرگذاری این متغیرها در سامانه بود. نتایج ارزیابی شاخص آماری RMSPE روی نمونه‌های از چهار مجموعه داده مهم شامل جمعیت، تقاضای آب بخش شرب، عرضه محصولات شیلاتی و تقاضای انرژی الکتریکی، در جدول ۱ ارائه‌شده است.

با توجه به اینکه اندازه‌های محاسبه‌شده شاخص RMSPE در تمام حالت‌ها کمتر از آستانه معیار ۰/۱ بود، می‌توان گفت قابلیت اطمینان و دقت مدل در بازتولید و مدل‌سازی رفتار واقعی سامانه، مطلوب بود.

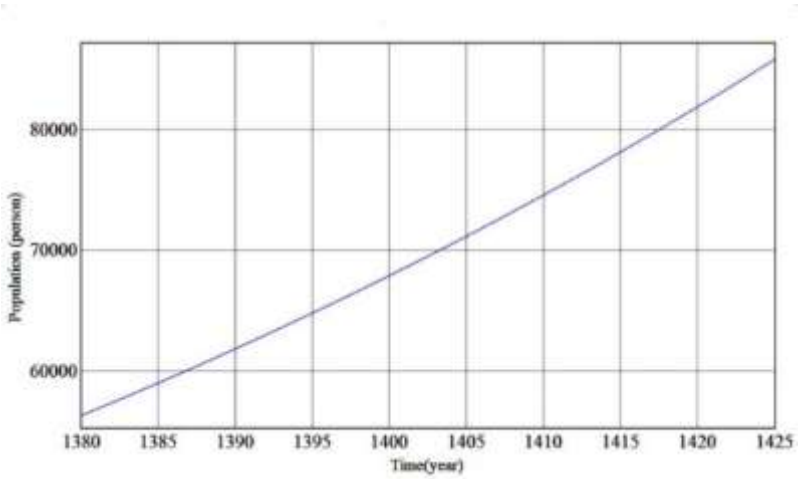
جدول ۱- نتایج ارزیابی بازتولید رفتار مدل با استفاده از RMSPE.

Table 1- Results from the evaluation of model behaviour reproduction using the RMSPE.

Variable	Time period	RMSPE
Population	2004-2007	0.029
Drinking water demand	2012-2017	0.019
Supply of fishery products	2004-2009	0.032
Electrical energy demand	2011-2017	0.031

جمعیت

نمودار تغییرات جمعیت در دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ در شکل ۴ نشان‌داده شده است. بر اساس این نمودار، جمعیت از حدود ۵۶۴۰۰ نفر در سال ۱۳۸۰ به ۸۵۷۷۰ نفر در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. این تغییرات نشان‌دهنده ۵۲٪ افزایش جمعیت در یک بازه زمانی ۴۵ ساله بود.



شکل ۴- تغییرات جمعیت در آبخیز سراب صیدعلی.

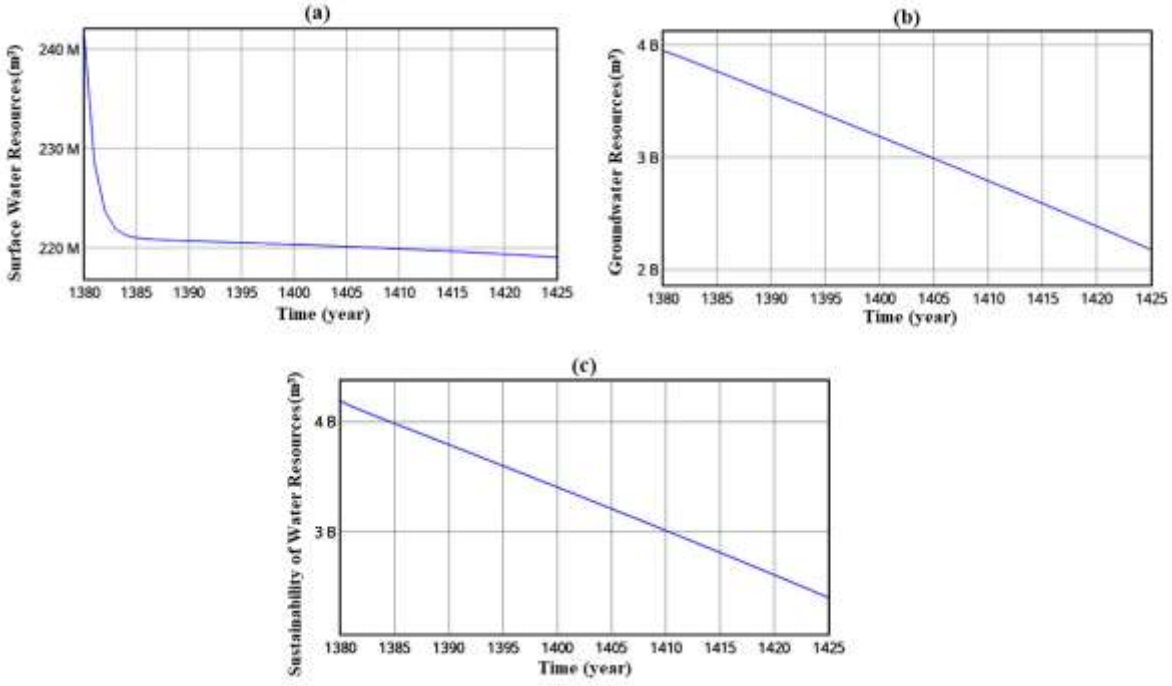
Figure 4- Population changes in the Sarab Sayed Ali Watershed.

نتایج این نمودار نشان داد در وضعیت موجود، جمعیت بدون مداخله سیاستی، چگونه در طول زمان تکامل می‌یابد و این تغییرات چه فشاری بر تقاضای منابع آب، غذا و انرژی می‌تواند وارد کند. پیش‌بینی جمعیت در این پژوهش بر پایه یک الگوی رشد نمایی ساده با فرض دسترسی نامحدود به منابع استوار است. از مدل نمایی ساده با هدف جلوگیری از ورود نبودن قطعیت‌های گسترده و خطاهای محاسبه‌ای ناشی از نبودن داده‌های پیچیده به خروجی‌ها، استفاده شد. روند مشاهده‌شده نشان‌دهندهٔ یک الگوی پیوسته و افزایشی بود. این یافته بیانگر آن است که پویایی جمعیتی در طول زمان با ثبات نسبی ادامه یافت. شیب یکنواخت نمودار بیانگر آن است که رشد جمعیت تحت تأثیر شوک‌های ناگهانی نبوده و رفتار جمعیت پیش‌بینی‌شده همگرا است، یعنی سامانه به سمت یک الگوی پایدار، مهارشدنی و قابل پیش‌بینی در حرکت است.

زیرسامانه منابع آب

در زیرسامانه منابع آب، نمودار تغییرات مرتبط با حجم آب سطحی، آب زیرزمینی و پایداری منابع آب در شکل ۵ نشان‌داده شده است. بر پایه نتایج مدل‌سازی، تغییرات حجم آب‌های سطحی در دو دوره به‌طور آشکار متفاوت بود. در دوره نخست (سال ۱۳۸۰)، حجم آب سطحی از ۲۴۲ میلیون مترمکعب به ۲۲۱ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۴ کاهش یافت و کاهش حجم آب سطحی ۲۱ میلیون مترمکعب بود. در دوره دوم، حجم منابع آب سطحی از ۲۲۱ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۵ با کاهش ۲ میلیون مترمکعب به ۲۱۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. در مجموع کاهش آب سطحی در دوره زمانی مدل‌سازی ۲۳ میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد.

تغییرات حجم آب زیرزمینی در محدوده مطالعه‌شده از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ نشان داد که حجم آب‌های زیرزمینی از ۳/۹۵ میلیارد مترمکعب به ۲/۱۸ میلیارد مترمکعب کاهش یافت و این کاهش ۱/۷۷ میلیارد مترمکعب بود. در بخش مربوط به پایداری منابع آب (مجموع آب سطحی و زیرزمینی) حجم کل منابع آب از ۴/۱۹ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۰ به ۲/۳۹ در سال ۱۴۲۵ کاهش خواهد یافت و این کاهش ۱/۷۹ میلیارد مترمکعب در طول دوره مدل‌سازی بود.



شکل ۵- تغییرات آب سطحی (الف)، آب زیرزمینی (ب) و پایداری منابع آب (ج) در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 5- Changes in the surface water (a), groundwater (b) and Sustainability of water resources (c) in the Sarab Said Ali Watershed.

بررسی پایداری منابع آب نتیجه تعامل میان حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده و متعادل‌کننده در زیرسامانه آب است. در سال‌های ابتدایی، رشد جمعیت و توسعه فعالیت‌های کشاورزی و اقتصادی موجب افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب شده است. این افزایش تقاضا منجربه برداشت بیشتر از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده و در کوتاه‌مدت، دسترسی به آب را افزایش‌داده است. این فرآیند یک حلقه بازخوردی تقویت‌کننده ایجاد کرده که در آن افزایش تقاضا به افزایش برداشت و مصرف آب منجرشده و در نتیجه فعالیت‌های اقتصادی و تولیدات کشاورزی گسترش‌یافته است.

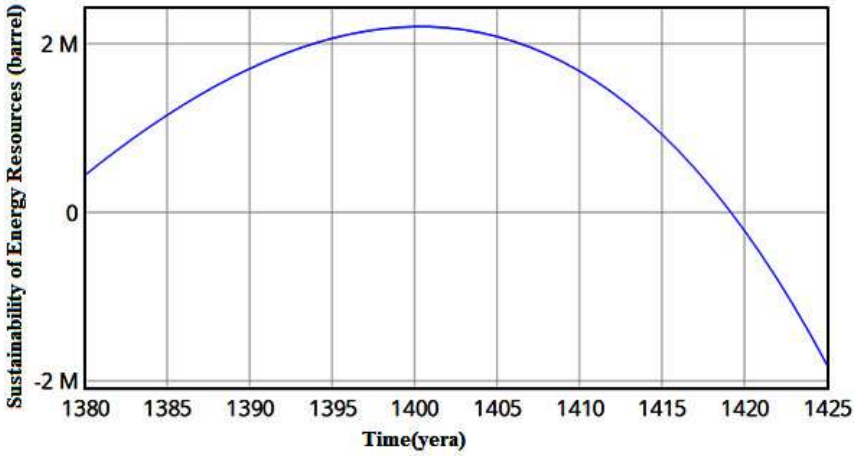
با گذشت زمان، تداوم برداشت و افزایش مصرف موجب کاهش منابع آب تجدیدپذیر و کاهش ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. در این شرایط، حلقه‌های بازخوردی متعادل‌کننده در سامانه فعال می‌شوند. کاهش منابع در دسترس، همراه با افزایش تقاضای ناشی از رشد جمعیت، تولید غذا و رشد اقتصادی، فشار بیشتری بر منابع آب وارد می‌کند. در نتیجه شکاف میان عرضه و تقاضای آب افزایش یافته و پایداری منابع آب به تدریج کاهش می‌یابد. ازاین‌رو، غلبه تدریجی حلقه‌های متعادل‌کننده بر سامانه موجب کاهش پایداری منابع آب در طول دوره مدل‌سازی شد. بخش عمده این کاهش پایداری مربوط به بهره‌برداری فزآینده از منابع آب زیرزمینی است. با توجه به تفاوت اندک در حدود ۲۳ میلیون مترمکعبی میان کاهش کل حجم منابع آب و آب زیرزمینی، می‌توان گفت وابستگی پایداری منابع آبی این منطقه به منابع آب زیرزمینی حیاتی و ساختاری است (اسکلن ۲۰۲۳). هسته اصلی این وابستگی، تأمین نیاز گسترده زمین‌های آبی و باغ‌ها از این منابع زیرزمینی است. از دیدگاه سیاست‌گذاری می‌توان گفت هرگونه تغییر در الگوی برداشت از آبخوان‌ها به‌طور مستقیم و سریع بر پایداری کل نظام آبی منطقه، اثرگذار است.

با توجه به کاهش پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی در طول زمان، ضرورت بازنگری بنیادی در سیاست‌های عرضه و تقاضای آب ضروری و اجتناب‌ناپذیر است، و لازم است در چارچوب برنامه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت اجرا شود. برنامه‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت شامل نظارت بر برداشت‌های مجاز و غیرمجاز، تغییر الگوی کشت (جعفری و برادلی ۲۰۲۱)، فناوری‌های نوین آبیاری، سامانه پایش هوشمند مصرف آب است (ژیئو ۲۰۲۵). در راستای اجرای برنامه‌های بلندمدت لازم است تعادل در بهره‌برداری از منابع آب با کاهش وابستگی به آب‌های زیرزمینی و تقویت نقش منابع آب پیاده‌سازی شود. تحقق این تحول راهبردی مستلزم اجرای برنامه‌ای دووجهی، که نخست شامل ذخیره‌سازی و تنظیم آب‌های سطحی به‌وسیلهٔ ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های مهندسی و دیگری توسعه و ارتقای عملیات آبخیزداری و آبخوان‌داری در مقیاس آبخیز با تلفیق روش‌های مهندسی و زیستی، برای افزایش نفوذ رواناب به سفره‌های زیرزمینی با هدف تغذیه و افزایش حجم آب در آبخوان‌ها، امکان‌پذیر است.

زیرسامانه انرژی

روند پایداری منابع انرژی (فسیلی و الکتریکی) در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ در شکل ۶ نشان‌داده شده است. روند اندازهٔ پایداری انرژی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ افزایشی بود، به‌طوری که در سال ۱۳۸۰ پایداری انرژی در آبخیز سراب صیدعلی ۴۳۸ هزار بشکه نفت بود، و در سال ۱۴۰۰ این اندازه ۲/۲ میلیون بشکه نفت بود. این وضعیت بیانگر افزایش ظرفیت، ارتقای زیرساخت‌های انرژی و حرکت به سمت شرایط نسبتا پایدار است. از سال ۱۴۰۱ تا سال ۱۴۱۹ روند اندازهٔ پایداری و امنیت انرژی کاهشی و حدود ۲ میلیون بشکه نفت پیش‌بینی شد. این یافته نشان‌دهنده کاهش تدریجی در بهره‌وری یا کاهش ورودی منابع است، اما پایداری همچنان در محدوده مثبت باقی ماند و ۴۶ هزار بشکه نفت برآورد شد. می‌توان گفت منابع انرژی پاسخگوی نیازهای بخش‌های گوناگون خواهند بود. از سال‌های ۱۴۲۰ تا ۱۴۲۵ با فشار بر سامانه عرضه و افزایش تقاضا، شاخص پایداری به اندازه‌های منفی کاهش یافت،

به‌طوری که در سال ۱۴۲۵ آبخیز سراب صیدعلی با کمبود ۱/۸ میلیون بشکه نفت روبه‌رو خواهد بود. این رخداد نشان‌دهنده پاسخ‌گو نبودن منابع به تقاضای انرژی در بخش‌های گوناگون آبخیز مطالعه‌شده است.

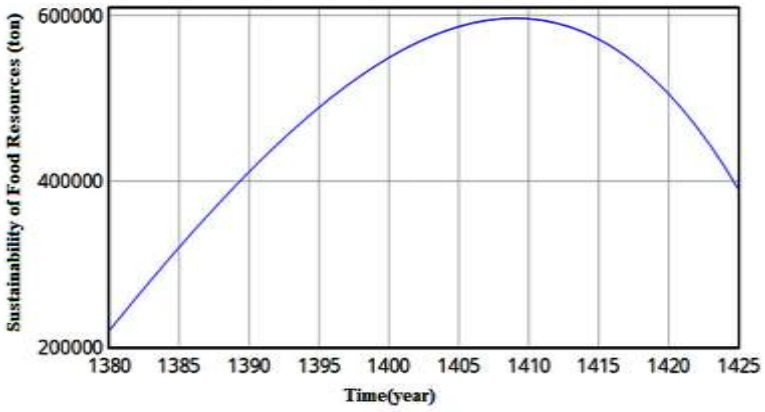


شکل ۶- پایداری انرژی در آبخیز سراب صیدعلی.
Figure 6- Energy sustainability in the Sarab Said Ali Watershed.

روند پایداری انرژی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، همراه با نوسانات افزایشی و کاهشی بود. این نوسانات بیانگر آن بود که پایداری انرژی تابعی پیچیده از عامل‌هایی چون بهره‌وری سامانه، اندازهٔ عرضه و تقاضا، ظرفیت‌های زیرساختی و به‌طور جامع حلقه‌های بازخوردی سامانه است. توجه نداشتن به این عامل‌ها موجب ناپایداری در این بخش می‌شود. حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده بخش انرژی، با افزایش تولیدات کشاورزی و رشد اقتصادی، موجب افزایش پایداری منابع انرژی می‌شوند. افزایش و گسترش زیرساخت انرژی باعث دسترسی بیشتر به انرژی در بخش کشاورزی شده که موجب ارتقای آبیاری و مکانیزاسیون و سرانجام افزایش تولید غذا می‌شود. بهبود تولید و شرایط اقتصادی نیز سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی را تقویت کرده و ظرفیت تولید انرژی را افزایش می‌دهد. این فرآیند یک حلقه تقویت‌کننده ایجاد می‌کند که باعث رشد اولیه شاخص پایداری انرژی می‌شود. از سوی دیگر با گذشت زمان، افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و گسترش تولید غذا باعث افزایش تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف شده و فشار بر منابع انرژی را افزایش می‌دهند. در نتیجه، حلقه‌های بازخوردی متعادل‌کننده فعال‌شده و پایداری منابع انرژی به تدریج کاهش می‌یابد.

زیرسامانه غذا

تغییرات انباشت مواد غذایی ناشی از چهار منبع اصلی کشاورزی، دام و طیور، شیلات و همچنین انباشت خوراک دام و طیور با منشا کشاورزی در شکل ۷ ارائه‌شده است. بررسی پایداری منابع غذایی نشان داد که در سال ۱۳۸۰ اندازهٔ انباشت غذا از ۲۱۹ هزار تن به ۵۹۷ هزار تن در سال ۱۴۰۹ افزایش خواهد یافت. می‌توان گفت دریافت عرضه بر تقاضا پیشی گرفته و پایداری افزایش خواهد یافت. با این حال، این روند از سال‌های ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ روند تغییر خواهد کرد و اندازهٔ پایداری در سال ۱۴۲۵ به ۳۹۰ هزار تن کاهش خواهد یافت که بیانگر کاهش انباشت و تضعیف پایداری منابع غذایی است.



شکل ۷- پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 7- Sustainability of food sources in the Sarab Said Ali Watershed.

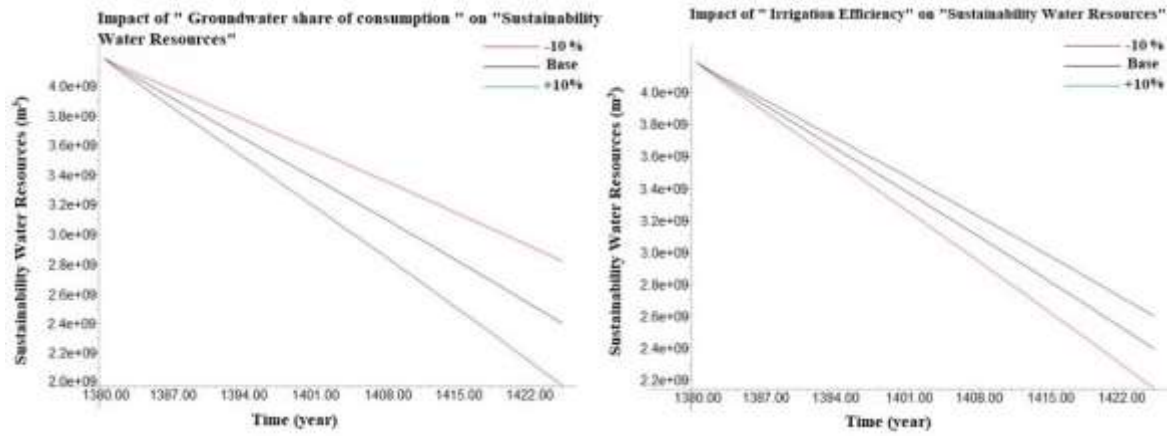
روند نمودار پایداری منابع غذایی در طول دوره مدل‌سازی غیرخطی بود. با توجه به روند مثبت و باثبات پایداری غذا تا سال ۱۴۰۹ می‌توان گفت حلقه‌های تقویت‌کننده غالب بوده و موجب افزایش دسترسی به منابع آب، بهبود راندمان آبیاری و توسعه کشاورزی شده، و این موضوع موجب رشد تولید محصولات، افزایش عرضه مواد غذایی و در نتیجه افزایش پایداری منابع غذا می‌شود. افزون بر این، رشد جمعیت و افزایش تقاضای غذا در این دوره محرک توسعه تولید و سرمایه‌گذاری در کشاورزی است و اثر مثبت بر پایداری دارد. این روند رو به رشد می‌تواند تحت تأثیر بهبود سیاست‌ها، توسعه زیرساخت‌ها، افزایش بهره‌وری در تولید، تأمین نهاده با درنظر گرفتن توانایی منابع بومی در تأمین نیازهای اساسی جمعیت محلی باشد. از سال ۱۴۱۰ و بعد از آن، ناپایداری و کاهش ظرفیت تولید با توجه به غالب بودن حلقه‌های تعدیل‌کننده بر سامانه غذا پیش‌بینی شد. این حلقه‌های بازدارنده باعث افزایش برداشت آب و فشار بر مصرف شده، که به‌دنبال آن کاهش منابع آب تجدیدپذیر، کاهش عملکرد محصولات و کاهش عرضه غذایی رخ خواهد داد. افزون بر این، رشد بیشتر جمعیت و مصرف سرانه نیز شکاف میان عرضه و تقاضا را تشدید کرده که باعث گذر از مرحله رشد به کاهش می‌شود. ازاین‌رو، لزوم تنوع‌بخشی به محصولات غذایی برای مصارف و با اجرای سیاست‌های موثر مانند بهینه‌سازی مصرف منابع، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید در بلندمدت می‌توان پایداری و امنیت غذایی را تضمین کرد.

تحلیل حساسیت و سناریوسازی

در این پژوهش، تحلیل حساسیت مدل به‌منظور شناسایی متغیرهای اثرگذار بر پایداری منابع آب، انرژی و غذا اجرا شد. روش کار، پیاده‌سازی ±۱۰٪ در اندازه‌های هر سنجه و سپس بررسی دامنه تغییرات ایجادشده در شاخص‌های خروجی مدل‌سازی بود.

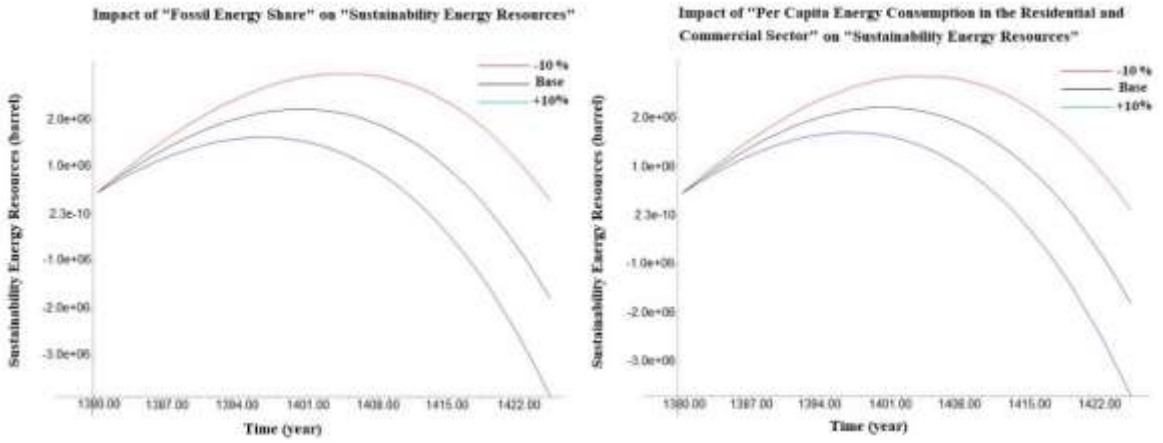
بر اساس نتایج تحلیل حساسیت که در شکل ۸ نشان‌داده شده است می‌توان گفت سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری به‌عنوان حساس‌ترین متغیرهای مدل در بخش پایداری منابع آب شناسایی شدند. ازاین‌رو، تمرکز بر مدیریت این دو متغیر، اساس دستیابی به راهبردهای موثر برای پایداری منابع آب در این منطقه است.

تحلیل حساسیت ارائه‌شده در شکل ۹ نشان داد سهم انرژی فسیلی و سرانه مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی و تجاری دو متغیر مهم و اثرگذار در مدل‌سازی پایداری انرژی به‌شمار می‌آیند. ازاین‌رو، بیشترین نقش در شکل‌دهی چشم‌انداز امنیت انرژی، مربوط به تغییرات و نوسانات در این بخش‌ها، است.



شکل ۸- اثر سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری بر پایداری منابع آب آبخیز سراب صیدعلی.

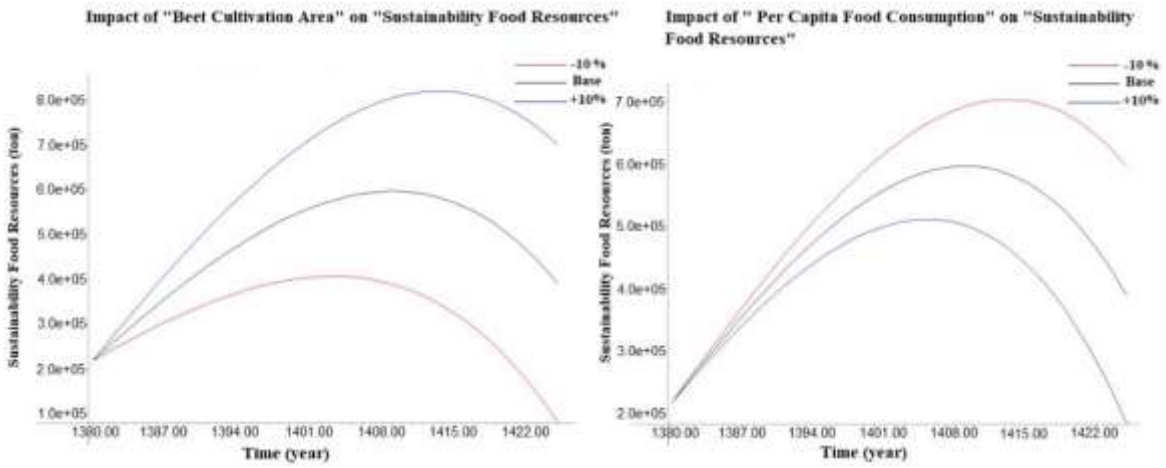
Figure 8- The effect of the Groundwater share of consumption and irrigation efficiency on the sustainability of water resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۹- اثر سهم انرژی فسیلی و سرانه مصرف انرژی در بخش مسکونی و تجاری بر پایداری انرژی آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 9- The effect of the fossil energy share and per capita energy consumption in the residential and commercial sector on the energy sustainability of the Sarab Said Ali Watershed.

در بخش پایداری و امنیت غذایی، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد سطح زیرکشت چغندر قند و سرانه مصرف غذا دو شاخص اثرگذار بودند. تغییرات این دو متغیر، افزون بر اثر مستقیم و سریع بر امنیت غذایی، در بلندمدت نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری نظام تولید و مصرف خواهند داشت (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- اثر سطح زیرکشت چغندر و سرانه مصرف غذا بر پایداری منابع غذا آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 10- The effect of beet cultivation area and per capita food consumption on the sustainability of food resources in the Sarab Syed Ali Watershed.

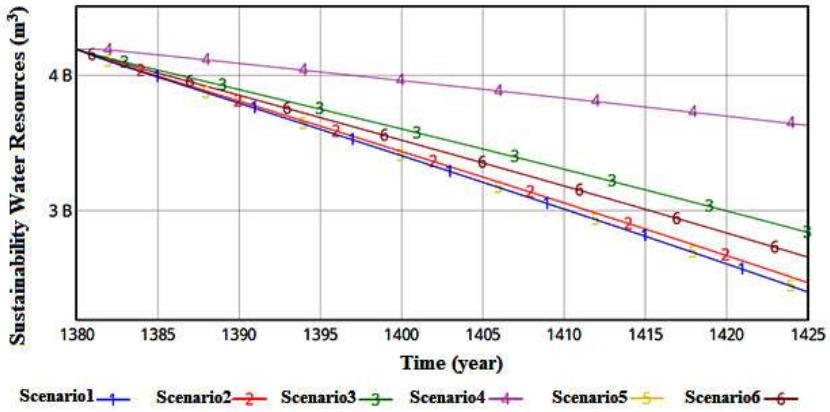
بر اساس خروجی‌های تحلیل حساسیت و شناسایی نقاط اثرگذار بر مدل، سناریو پایه (ژیئو و همکاران ۲۰۲۳)، کاهش ۳۰٪ سطح زیرکشت چغندر بر پایهٔ گزارش سازگاری با کم آبی در استان لرستان (مهندسین مشاور جاماب ۲۰۱۹)، ارتقا راندمان آبیاری تا حدود ۶۶٪ بر پایهٔ ظرفیت توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در ایران (اروندی و همکاران ۱۴۰۰)، استفاده ۸۰٪ تا ۹۰٪ از پساب بر اساس تجارب دیگر کشورها (وولیوس ۲۰۲۴)، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی به اندازهٔ ۶۳۰۰ وات ساعت برای هر خانوار در روز (اروسی و همکاران ۲۰۲۴) و کاهش ۵٪ تقاضا به‌عنوان یک سناریوی واقع‌بینانه مبتنی بر مدیریت تقاضا (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴) طراحی و اجرا شد (جدول ۲).

دستاوردهای کمی به‌دست آمده از اجرای سناریوها و سیاست‌های پیشنهادی، به‌شکل مقایسه میان سناریوها ارائه شد (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳).

جدول ۲- سناریوهای پیاده‌سازی‌شده بر مدل در آبخیز سراب صیدعلی.

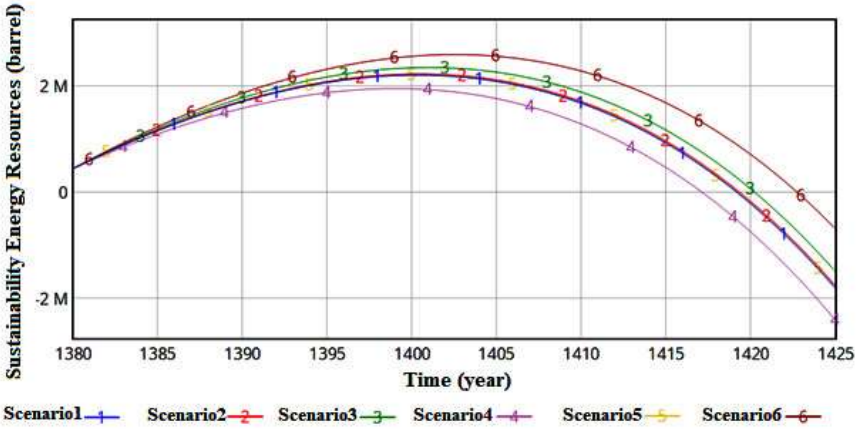
Table 2- Scenarios applied to the model in the Sarab Said Ali Watershed.

Scenario number	Scenario	Changes
1	base scenario	Maintaining the status quo
2	changes in cultivation pattern	A 30% reduction in the area of sugar beet cultivation, a 15% increase in the area of irrigated wheat cultivation, and a 15% increase in the area of rapeseed cultivation
3	improvements in irrigation efficiency	Increase irrigation efficiency by up to 66%
4	development of urban and industrial wastewater systems	An 80% increase in water return rate achieved by constructing a wastewater collection and treatment network
5	utilisation of renewable energy	Generating 6300 watt-hours of electricity (0.0037 barrels of oil equivalent) per day for each household and establishing infrastructure for 7000 households in the region.
6	modification of consumption patterns	5% reduction in demand for water, energy, and food, resulting in savings for residents



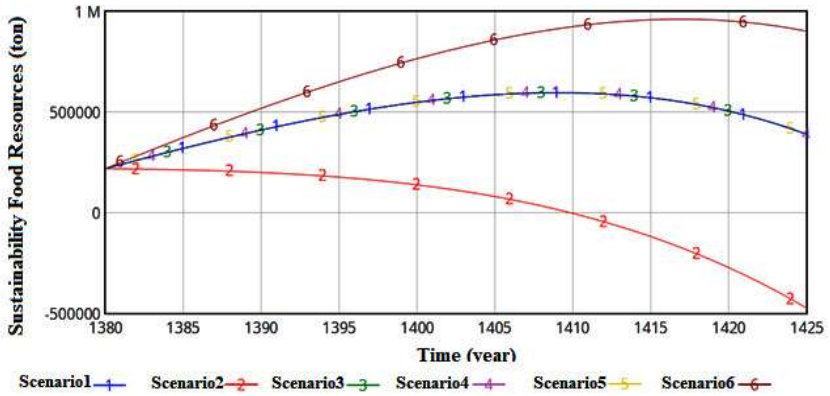
شکل ۱۱- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 11- The effect of six applied scenarios on the sustainability of water resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۱۲- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع انرژی در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 12- The effect of six applied scenarios on the sustainability of energy resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۱۳- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 13- The effect of six applied scenarios on the sustainability of food sources in the Sarab Said Ali Watershed.

به‌منظور کمی‌سازی اثر هر یک از سناریوها بر پایداری منابع آب، انرژی و غذا، تغییرات هر شاخص پایداری در طول دوره مدل‌سازی بر اساس تفاوت اندازهٔ آن در ابتدا و انتهای دوره محاسبه شد. سپس، اندازهٔ تغییرات نسبی هر شاخص پایداری نسبت به اندازهٔ اولیه به‌طور درصد برآورد شد. این نتایج در جدول ۳ ارائه‌شده است.

جدول ۳- تغییرات منابع آب، غذا و انرژی در فاصله زمانی سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ بر اساس سناریوهای مختلف برای ارزیابی با روش تاپسیس فازی.

Table 3 – Changes in water, food, and energy resources between 1380 and 1425 under different scenarios, evaluated using the Fuzzy Topsis method.

Scenario number	Scenario	Sustainability Water Resources (%)	Sustainability Energy Resources (%)	Sustainability Food Resource (%)
1	base scenario	-43	-312	78
2	changes in cultivation pattern	-41	-300	116
3	improvements in irrigation efficiency	-32	-240	78
4	development of urban and industrial wastewater systems	-13	449	78
5	utilisation of renewable energy	-43	-309	78
6	modification of consumption patterns	-37	-57	312

بزرگی برخی اندازه‌های درصد تغییرات پایداری منابع بر پایهٔ جدول ۳ بیانگر حساسیت زیاد شاخص‌های پایداری به تغییرات سناریوها و تفاوت زیاد میان شرایط اولیه و نهایی سامانه در دوره مدل‌سازی بود.

به‌منظور ارزیابی سناریوها با روش تاپسیس فازی، درصد تغییرات شاخص‌های پایداری برای هر سناریو، با درنظر گرفتن نبودن قطعیت، به‌شکل اعداد فازی مثلثی متناظر با تابع عضویت مثلثی مدل‌سازی شدند. سپس، ماتریس تصمیم فازی تشکیل شد و بر اساس نوع معیارها (سود و هزینه)، فرآیند بهنجارسازی انجام شد. اندازه‌های بهنجارشده با اوزان فازی معیارها ترکیب شدند. سپس، راه‌حل‌های ایده‌آل فازی و ضد ایده‌آل فازی برای هر معیار تعیین و فاصله هر سناریو از این دو نقطه با استفاده از فاصله اقلیدسی برای اعداد فازی مثلثی محاسبه شد. سرانجام، ضریب نزدیکی نسبی به‌دست آمده هر سناریو به راه‌حل ایده‌آل ارائه شد (جدول ۴).

جدول۴- اولویت‌بندی سناریوها با روش تاپسیس فازی با استفاده از معیار درصد پایداری منابع آب، انرژی و غذا.

Table 4- Prioritisation of scenarios by the Fuzzy Topsis method using the criterion of percentage sustainability of water, energy, and food resources.

Scenario number	Scenario	proximity coefficient	Priority
1	base scenario	0.189	6
2	changes in cultivation pattern	0.245	4
3	improvements in irrigation efficiency	0.301	2
4	development of urban and industrial wastewater systems	0.289	3
5	utilisation of renewable energy	0.192	5
6	modification of consumption patterns	0.755	1

نتایج اولویت‌بندی سناریوها با استفاده از روش تاپسیس فازی در چارچوب همبست، نشان‌دهندهٔ اصلاح الگوی مصرف با اندازهٔ ضریب نزدیکی ۰/۷۵۵ در جایگاه نخست اولویت‌ها به‌عنوان سریع‌ترین و کم هزینه‌ترین سناریو برای انعطاف‌پذیری زیاد و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های آب، انرژی و غذا بود (ناهو و مپاندیل ۲۰۲۵). در این سناریو کاهش مصرف غذا باعث کاهش تقاضای کلی برای تولیدات غذایی

می‌شود. این موضوع به‌طور هم‌زمان چندین حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده میان جمعیت، تقاضای غذا، تولید کشاورزی، تقاضای آب کشاورزی، و حلقه میان تولید غذا و مصرف انرژی را تضعیف می‌کند. با تضعیف این حلقه‌های تقویتی، فشار وارد بر منابع آب و انرژی کاهش یافته و در نتیجه شاخص‌های پایداری در هر سه بخش به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. افزایش راندمان آبیاری با ضریب نزدیکی برابر با ۰/۳۰۱ یک حلقه بازخورد تعدیلی را در سامانه که موجب کاهش مصرف آب برای تولید هر واحد محصول می‌شود تقویت می‌کند. در نتیجه فشار بر منابع آب تا حدی کاهش یافته و روند کاهش پایداری منابع را کندتر می‌کند (دانکس و بویسون ۲۰۲۵). با این حال، این بهبودی باعث افزایش سطح زیرکشت یا تولید کشاورزی شده و بخشی از صرفه‌جویی آب را خنثی می‌کند. ازاین‌رو، اثر کلی این سناریو بر بهبود پایداری منابع در حد متوسط باقی ماند.

با توجه به نبودن شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در دو شهر الشتر و فیروزآباد، سناریو ایجاد تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به‌عنوان سومین اولویت با ضریب نزدیکی ۰/۲۸۹ مطرح شد. تأمین آب در قالب استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده باعث ایجاد یک حلقه بازخورد تعدیلی جدید در سامانه می‌شود، زیرا بخشی از تقاضای آب با منابع غیرمتعارف تأمین می‌شود و فشار بر منابع آب کاهش می‌یابد. افزایش عرضه موثر آب باعث کاهش شکاف میان عرضه و تقاضا شده و پایداری منابع آب را بهبود می‌بخشد.

تغییر الگوی کشت با ضریب نزدیکی ۰/۲۴۵ در رتبه چهارم اولویت‌ها بود. این سناریو تا حدی باعث کاهش تقاضای آب در بخش کشاورزی می‌شود، زیرا ساختار کلی سامانه و ارتباط میان جمعیت، تقاضای غذا و تولید کشاورزی همچنان برقرار بوده، اما به‌دلیل کاهش تولید برخی محصولات و فعال ماندن حلقه تقویت‌کننده مرتبط با تقاضای غذا، پایداری غذایی در سامانه کاهش می‌یابد. پایین بودن رتبه بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر با ضریب نزدیکی ۰/۱۹۲ بیانگر آن بود که عامل‌های اصلی تعیین‌کننده تقاضای آب و غذا در این سناریو تغییر نمی‌کنند، اما استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تغییر اصلی در زیرسامانه انرژی شده، به‌طوری که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تضعیف حلقه تقویتی میان مصرف سوخت‌های فسیلی، رشد اقتصادی و کاهش ذخایر انرژی می‌شود. سرانجام، سناریوی پایه با ضریب نزدیکی ۰/۱۸۹ پایین‌ترین رتبه اولویت‌بندی را در مقایسه با دیگر سناریوها، کسب کرد. این موضوع بیانگر آن است که تداوم وضعیت موجود سبب پاسخ‌گو نبودن به چالش‌ها است. ازاین‌رو، تغییرات بنیادین و ساختاری در بخش مدیریت منابع لازم و ضروری است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بهره‌گیری از مدل‌سازی با درنظر گرفتن تعاملات سامانه‌ای در روش پویایی سامانه نقش موثری در فهم بهتر مدیریت عرضه و تقاضای منابع با ایجاد روابط غیرخطی و بازخوردهای متقابل میان اجزای سامانه دارد. این یافته با نتایج پژوهش‌های کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است. با این حال، شدت و شیوهٔ بروز این تعاملات و بازخوردها تحت تأثیر شرایط منطقه‌ای، روش‌های مدل‌سازی و داده‌های استفاده‌شده است. افزون بر این، نتایج این پژوهش با یافته‌های کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است. زیرا، افزایش راندمان آبیاری ضمن افزایش عملکرد محصولات کشاورزی، موجب کاهش مصرف آب و انرژی در فرآیند تولید می‌شود. این موضوع به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در تقویت هم‌افزایی میان اجزای هم‌بست آب–انرژی–غذا شناخته شد. افزون بر این، نتایج پیاده‌سازی سیاست‌ها و سناریوهای مختلف نشان داد که تأکید بر اصلاح الگوی مصرف سبب کاهش فشار بر منابع و افزایش پایداری می‌شود. این نتایج با یافته‌های ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)؛ گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) و پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. اما، اندازهٔ صرفه‌جویی به‌دست‌آمده تابعی از ساختار اقتصادی، الگوی مصرف منابع و ویژگی‌های منطقه‌ای است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری جامع در مدیریت آبخیزها با ماهیتی پیچیده و چند بعدی همراه است. زیرا، عامل‌های پرشماری از جمله ابعاد آب‌شناختی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌شکل درهم‌تنیده بر یکدیگر اثرگذارند. دستیابی به مدیریت کارآمد در چنین سامانه‌ای نیازمند شناخت ژرف، دقیق و علمی چالش‌ها و تعاملات میان مؤلفه‌های مختف مانند منابع آب، انرژی و غذا است. این پژوهش با هدف توسعه یک مدل پویا برای مدیریت جامع منابع در آبخیز سراب صیدعلی انجام شد. این مدل بر پایهٔ همبست آب–انرژی–غذا و بر پایه تعاملات میان عرضه و تقاضای این منابع طراحی شد. مدل‌سازی رفتار سامانه با درنظر گرفتن متغیرهای اثرگذار اجرا شد. نتایج مدل‌سازی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ نشان داد در شرایط تداوم وضعیت موجود، پایداری منابع آب به اندازهٔ ۴۳٪ و پایداری منابع انرژی به اندازهٔ ۳۱۲٪ کاهش خواهند یافت. این در حالی است که روند پایداری منابع غذا در این دوره افزایشی و برابر با ۷۸٪ بود. کارایی سناریوی اصلاح الگوی مصرف به‌دلیل مدیریت تقاضا و بهبود الگوی مصرف در مقایسه با شش سناریوی دیگر بهتر بود. به‌رغم کارآمدی رویکرد همبست با دیدگاه سامانه‌ای، اجرای این رویکرد با محدودیت‌هایی همچون نبودن داده‌های دقیق، میان رشته‌ای بودن، پیچیدگی ساختارهای اقتصادی و اجتماعی و خلا در سیاست‌گذاری روبه‌رو است. با وجود این محدودیت‌ها و بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود با توسعه مدل‌های جامع‌تر همبست و با درنظر گرفتن نبودن قطعیت‌ها و تغییرات اقلیمی، زمینه تصمیم‌سازی آگاهانه و مدیریت پایدار منابع را با اصلاح الگوی مصرف، تنوع‌بخشی به منابع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تقویت مدیریت خطر، فراهم آورد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافعی در نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، نرم‌افزار، تحلیل داده، نگارش

نویسنده دوم: نظارت، نرم‌افزار، تحلیل داده

نویسنده سوم: انجام پژوهش، بازبینی متن مقاله

نویسنده چهارم: انجام پژوهش، بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

Arvandi S, Zare A, Afshar Asl M. 2021. Nexus of water, food and energy in modern irrigation systems. Journal of Water Engineering Systems. 9(4): 55-66. (In Persian). https://journals.iau.ir/article_687578.html

Chamas Z, Abou Najm M, Al-Hindi M, Yassine A, Khattar R. 2021. Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus. Journal of Cleaner Production. 278: 123894. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123894

Dankens S, Buisson MC. 2025. The water-energy-food-environment nexus. The global commission on the economics of water (GCEW);

Amani M, Najafabadi MO, Mirdamadi SM, Torkashvand AM. 2025. Dynamic analysis of the water, food, and energy nexus in minab county: An integrated approach to sustainable water resource management in hormozgan province. Results in Engineering. 27: 106185. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106185

Aqili SAH. 2017. Water-food-energy nexus approach for sustainability evaluation using scenario analysis and MCDM Techniques with respect to virtual water content; Case study: Lenjanat Sub-Basin. Master of Science. Faculty of Civil Engineering. Isfahan University of Technology. 170 p. (In Persian).

International Water Management Institute. pp. 1-11. https://cgspace.cgiar.org/items/886077c4-7f99-4777-8c93-b62ac30dd34a

Ersoy SR, Raabe M, Schneider S, Fahsold K, Roche MY. 2024. Solar power and the water-energy-food nexus. Smart Energy Solutions for Africa. pp. 1-12.

Forrester JW. 1961. Industrial dynamics. The university press of the Massachusetts Institute of Technology. pp. 1-480. http://www.laprospective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester 1961.pdf&ved=2ahUKEwjRm6WSpPqRAxVozgIHHRRCOZsQFnoECBcQAQ&usg=AOvVaw2FdJ9wK2rsQf8fizcWyUcK

Francisco EC, de Arruda Ignacio PS, Piolli AL, Dal Poz MES. 2023. Food-energy-water (FEW) nexus: Sustainable food production governance through system dynamics modeling. Journal of Cleaner Production. 386: 135825. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135825

Hacısuleyman V, Ozger M. 2024. Multi-objective cropping pattern optimization and comparative assessment with the food-energy-water nexus. Water Supply. 24(12): 4077-4093. https://iwaponline.com/ws/article/doi/10.2166/ws.2024.254/106243

Han F, Alkhawaji RN, Shafieezadeh MM. 2025. Evaluating sustainable water management strategies using Topsis and fuzzy Topsis methods. Applied Water Science. 15(4): 1-13. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02336-7

Hoff H. 2011. The water, energy and food security nexus. Bonn 2011 Nexus Conference, Bonn, Germany. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104065

Goharshahi GA, Shahraki J, Sardar Shahraki A, Ali Ahmad N. 2024. Dynamic analysis of sustainable management of water resources based on the correlation of water, food and energy resources (Case study: Darmian and Sarbisheh Cities in South Khorasan Province). Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering. 55(3): 154-173. (In Persian). https://doi.org/10.22125/IWE.2023.415390.1747

Jafary F, Bradley C. 2021. Agriculture and groundwater irrigation management in central Iran. Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. Cham: Springer International Publishing. pp. 721-734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_39

Jamab Consulting Engineers. 2019. Integrated management report on exploitation and withdrawal control of water resources in Lorestan Province. Iran Water Resources Management Company, Tehran. pp. 1-135. (In Persian).

Keyhanpour MJ, Jahromi SHM, Ebrahimi H. 2021. System dynamics model of sustainable water resources management using the nexus water-food-energy approach. Ain Shams Engineering Journal. 12(2): 1267-1281. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029

Li W, Liang Y, Liu L, He Q, Huang J, Yin Z. 2024. Spatio-temporal impacts of land use change on water-energy-food nexus carbon emissions in China, 2011–2020. Environmental Impact Assessment Review. 105: 107436. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107436

Liu D. 2019. Evaluating the dynamic resilience process of a regional water resource system through the nexus approach and resilience routing analysis. Journal of Hydrology. 578: 124028. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124028

Loni R, Sharifzadeh M. 2022. A review of water, energy, and food nexus in Iran: Necessity, challenges and suggested solutions. Sustainability, Development and Environment. 3(3): 29-49. (In Persian). https://sanad.iau.ir/Journal/jsde/Article/846697

Lv Y, Yan S, Lai X, Li Y. 2025. Dynamic modeling of the water-energy-food-carbon nexus: Scenario analysis and security assessment in Sichuan Province, China. Journal of Cleaner Production. 502: 145370. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145370

Meadows D. 2008. Thinking in systems: International bestseller. Chelsea Green Publishing. pp. 1-78. https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-]library/climate-communications/psychology-amp-behavior/Meadows-2008.-Thinking-in-Systems.pdf

Most T. 2024. Variance-based sensitivity analysis in the presence of correlated input variables. ArXiv preprint arXiv. 12: 04933. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.04933

Naghdi S, Bozorg-Haddad O, Khorsandi M, Chu X. 2021. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. Science of the Total Environment. 776: 146026. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146026

Ndlela TJ. 2024. Assessing water-energy nexus dynamics for sustainable resource management in Cape Town: A system dynamics approach. Ph.D. Dissertation. Faculty of Engineering. Stellenbosch University. 116 p.

Newell JP, Goldstein B, Foster AA. 2019. 40-year review of food–energy–water nexus literature and its application to the urban scale. Environmental Research Letters. 14(7): 073003. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab0767/meta

Nhamo L, Mpandeli S. 2025. Catalyzing sustainable development goals through the water-energy-food nexus. iScience. 28(2). https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(25)00162-2

Pagano A, Coletta VR, Portoghese I, Panagopoulos, Panagopoulos A, Pisinaras V, Chatzi A, Malamataris D, Babakos K, Lilli M, Nikolaidis N, Giordano R. 2025. On the use of

participatory system dynamics modelling for WEF nexus management: Hints from two case studies in the Mediterranean regio. Environmental Impact Assessment Review. 115: 1-15. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108012

Sanchez Lozano JM, Teruel-Solano J, Soto-Elvira PL, Garcla-Cascales MS. 2013. Geographical information systems (GIS) and multi-criteria decision making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24: 544-556. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019

Scanlon BR, Fakhreddine S, Rateb A, de Graaf I, Famiglietti J, Gleeson T, Zheng C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. Nature Reviews Earth and Environment. 4(2): 87-101. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00418-9

Schneider P, Avellan T, Le Hung A. 2019. Water-energy-food nexus and sustainability. In Encyclopedia of sustainability in higher education. Cham: Springer International Publishing. pp. 2062-2074. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63951-2_474-1

Shahedi K, Kiani A, Bayati F. 2023. Evaluation of sustainability in Sarab Seydali Watershed, Selseleh City. Geography and Environmental Sustainability. 13(2): 39-57. (In Persian). https://doi.org/10.22126/ges.2023.8473.2599

Sterman J. 2002. System dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Massachusetts Institute of Technology. pp. 1-31. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102741

Tayefeh A, Abdous M, Zahedi R, AslaniA, Zolfagharzadeh MM. 2023. Advanced bibliometric analysis on water, energy, food, and environmental nexus (WEFEN). Environmental Science and Pollution Research. 30(47): 103556-103575. https://doi.org/10.1007/s11356-023-29379-8

Voulvoulis N. 2018. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. Current Opinion in Environmental Science and Health. 2: 32-45. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005

Wang, K, Liu J, Xia J, Wang Z, Meng Y, Chen H, YeB. 2021. Understanding the impacts of climate change and socio-economic development through food-energy-water nexus: A case study of mekong river delta. Resources, Conservation and Recycling. 167:105390. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105390

Wen C, Dong W, Zhang Q, He N, Li T. 2022. A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: A case study in Daqing City, China. Science of the Total Environment. 806: 150497. https://10.1016/j.scitotenv.2021.150497

Wu L. 2022. Water-energy-food nexus assessment framework for integrated resource management. Ph.D. Dissertation. Department of Civil, Geological, and Environmental Engineering, Saskatchewan University. 203 p. https://harvest.usask.ca/bitstream/10388/14192/1/WU-DISSERTATION-2022.pdf

Yan X, Jiang D, Fu J, Hao M. 2018. Assessment of sweet sorghum-based ethanol potential in China within the water–energy–food nexus framework. Sustainability. 10(4): 1046-1063. https://doi.org/10.3390/su10041046

Zahedi R, Sadeghitabar E, Khazaee M, Faryadras R, Ahmadi A. 2025. Potentiometry of wind, solar and geothermal energy resources and their future perspectives in Iran. Environment, Development and Sustainability. 27(7): 15311-15337. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04633-2

Zeng Y, Liu D, Guo S, Xiong L, Liu P, Yin J, Wu Z. 2022. A system dynamic model to quantify the impacts of water resources allocation on water–energy–food–society (WEFS) nexus. Hydrology and Earth System Sciences. 26(15): 3965-3988. https://doi.org/10.5194/hess-26-3965-2022

Zhang P, Zhang L, Hao Y, Xu M, Pang M, Wang C, Voinov A. 2024. Food–energy–water nexus optimization brings substantial reduction of urban resource consumption and greenhouse gas emissions. PNAS nexus. 3(2). https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae028

Zhu X. 2025. Advances in agricultural irrigation management and technology. Water. 17(17): 2591-2593. https://doi.org/10.3390/w17172591

Zhu M, Yang G, Jiang Y, Wang X. 2023. Agent-based modeling for water–energy–food nexus and its application in ningdong energy and chemical base. Sustainability. 15(14): 11428-11453. https://doi.org/10.3390/su151411428

Ziari K, Yousefi S. 2024. A comparative study of population growth indicators in Iranian cities and their geographical neighbors. Urban Economics. *8*(2): 45-62. (In Persian). https://doi.org/10.22108/ue.2024.142370.1292

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Modeling the Sustainability of Water, Energy, and Food Based on the System Dynamics Approach in the Sarab Seyed Ali Watershed, Lorestan Province

Arman Kiani[1], Kaka Shahedi[2]*, Mahmoud Habibnejad Roshan[3], Ali Haghizadeh[4]

1- Ph.D., Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2 and 3- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Water, energy, and food are the basis of the sustainable development of societies and they are inextricably and interrelated, such that changes in each of them cause direct and indirect consequences on the others. The objective of this study was to present and develop a new methodological approach that can efficiently support the decision-making and policy-making process in the supply and demand of a watershed's resources, and to quantitatively model the sustainability of water, energy, and food based on the system dynamics approach across different scenarios. The structure of this framework can be used as an effective tool to improve policy-making and elevate the level of watershed sustainability, providing more efficient perspectives in resource management.

Materials and Methods

In this study, a quantitative and integrated framework based on system dynamics (SD) was developed and modeled, considering the interactions of resource supply and demand with a Water-Energy-Food nexus approach in the Sarab Sayed Ali watershed. Since accurate and reliable SD modeling for assessing resource sustainability requires a comprehensive and transparent database, the necessary data were collected from official and credible national authorities. For modeling and validation in the study area, historical data recorded between 2001 and 2023 were utilized as inputs for the Vensim software. Furthermore, the simulation time step was set annually, and the overall modeling horizon was determined from 2001 to 2046 considering technical aspects and the long-term policy orientations of the Iran Water Resources Management Company to enable the prediction of the system's future behavior. After developing the model, its validation was performed using standard SD tests, such as the boundary adequacy test, dimensional consistency test, and behavior reproduction test.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** k.shahedi@sanru.ac.ir

Citation: Kiani, A., Shahedi, K., Habibnejad Roshan, M., Haghizadeh, A. 2026. Modeling the Sustainability of Water, Energy, and Food Based on the System Dynamics Approach in the Sarab Seyed Ali Watershed, Lorestan Province. Watershed Management Research. 39(3): 97-122.

DOI: 10.22092/WMRJ.2026.372167.1659

Received: 17 February 2026, **Received in revised form:** 29 March 2026, **Accepted:** 21 June 2026, **Published online:** 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 97-122.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

The results were analyzed based on feedback loops. By integrating the findings from the sensitivity analysis with the local characteristics of the region, various scenarios were defined and applied to the model. Ultimately, the most desirable scenario was ranked and selected using the Fuzzy TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making method.

Results and Discussion

Considering the variables related to the water, energy, food, and social and economic sectors, the modeling process was carried out from 2001 to 2046. After model validation, the results showed that in 2001, the population living in the watershed was 56,400. Based on modeling conducted based on variables such as birth rate, death rate, and migration rate, the population in 2046 was predicted to be 85,770 people. This finding indicates a 52 increase in population. From 2001 to 2046, the reduction in water resources in the region will be significant. The decrease in surface water volume in the first period from 2001 to 2005 was about 21 million m^3, and in the second period from 2006 to 2046, 2 million m3 was predicted. During the modeling period, the volume of groundwater decreased by about 1.77 billion m^3. This is while the decrease in the sustainability of water resources (surface and underground) was estimated at 1.79 billion m^3. The trend in energy sustainability (fossil and electrical) from 2001 to 2046, was an increase of 2.2 million barrels of oil. The energy trend during the period 2022 to 2040, was decreasing, but it still remained in a positive range, meaning it met the needs of the region. From 2041 to 2046, negative energy sustainability index values were predicted, and by 2046, it will reach a range of negative 1.8 million barrels of oil. This finding indicates a sharp decline in energy sustainability and the emergence of significant challenges in this sector. The trend of food resource sustainability, considering all four sources (agriculture, livestock and poultry, fisheries, and livestock and poultry feed of agricultural origin), was predicted to increase from 2001 to 2030, and food supply demand by about 597 thousand tonnes by 2030. From 2031 to 2046, this trend changed, and food reserves decreased to 390 thousand tonnes in 2046. This finding indicate a reduction in reserves and a weakening of the sustainability of food resources. The results of the sensitivity analysis showed that, in the water subsystem, the groundwater share of consumption and irrigation efficiency; in the energy sector, the fossil energy share and per capita energy consumption in the residential and commercial sector; and in the agricultural sector, the beet cultivation area and per capita food consumption are considered key variables. In this study, based on the findings of sensitivity analysis and the identification of effective leverage points in the model, the consumption pattern modification scenario with a proximity coefficient of 0.755 is introduced as the best option to improve resource sustainability. On the other hand, the least impact on improving resource sustainability was related to the base case scenario with a proximity coefficient of 0.189.

Conclusion and Suggestions

Comprehensive management and planning in watersheds have a complex and multidimensional nature. Because hydrological, social, economic, and environmental affect each other in an intertwined manner. Achieving effective management in such a system requires a scientific, accurate, and in-depth understanding of the challenges and interactions among various components such as water, energy, and food resources. Despite the effectiveness of the integrated approach with a systems perspective, its implementation still faces challenges such as the lack of accurate data, the interdisciplinary nature of the subject, the complexity of economic and social structures, and existing gaps in policymaking. Based on the results of this study, it is suggested that by developing more comprehensive correlation models and taking into account the lack of certainties and climate change, the field of informed decision-making and sustainable resource management can be prepared by modifying consumption patterns, diversifying resources, utilizing new technologies, and strengthening risk management.

Keywords: **Nexus, Sarab Sayed Ali Watershed, sustainability, system dynamics, vensim**

Article Type: Research Article

Conflicts of interest
The authors of this article declare that they have no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

Data Availability Statement
The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution
Author 1: Conceptualization, Software, Analysis of data, Writing
Author 2: Supervision, Software, Analysis of data
Author 3: Research, Reviewing the manuscript
Author 4: Research, Reviewing the manuscript

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابور در دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب

سیدحمیدرضا صادقی*[۱]، نسترن نادری‌مرنگلو[۲]، سحر مصطفایی‌یونجالی[۳]، اسماء بادامه[۴]، زینب شیخی[۵]، علی نوری[۶]، سودابه قره‌محمودلی[۷]

۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲، ۳، ۴، ۵ و ۶- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۷- پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

بررسی تغییر رفتار سامانه‌های آبخیز در برابر ورودی‌هایی مانند بارش، به‌ویژه در تحلیل رواناب با دوره‌های گوناگون برگشت، از اهداف اصلی پژوهش‌های آب‌شناختی است. تحلیل دوره برگشت مؤلفه‌های آب‌شناختی از جمله بارش و رواناب پیشینه طولانی دارد. اما، به بررسی تطبیقی و هم‌زمان این مؤلفه‌ها و تحلیل ناهم‌زمانی رفتار آنها در دوره‌های گوناگون برگشت، کمتر توجه‌شده است. از سوی دیگر، روابط پیچیده و ناخطی میان بارش و رواناب و تفاوت‌های مشاهده‌شده میان ایستگاه‌ها ناشی از شرایط محلی حاکم بر هر زیرآبخیز است. در این راستا، با بررسی هم‌زمان این مؤلفه‌ها می‌توان به درک واقع‌بینانه‌تری از پاسخ آب‌شناختی آبخیز، به‌ویژه در شرایط رخداد رویدادهای حدی، رسید. ازاین‌رو، در این پژوهش اندازه‌های بارش و رواناب به‌طور هم‌زمان با دوره‌های گوناگون برگشت در آبخیز نیشابور در خراسان رضوی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های بارش و رواناب سالانه در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ برای چهار ایستگاه آب‌سنجی (زرنده، طاغون، عیش‌آباد و مجموع دورود) معتبر که نماینده شرایط آب‌شناختی متفاوت در آبخیز بودند، جمع‌آوری شد. با استفاده از روش‌های آماری، داده‌های بارش و آب‌دهی از دیدگاه کیفیت بررسی شدند و اندازه‌های ناقص یا نامنطبق با روند آب‌شناختی، با استفاده از روش وایازی خطی و همبستگی با ایستگاه‌های مجاور اصلاح یا جایگزین شدند. پس از اصلاح داده‌ها، اندازه‌های بارش و آب‌دهی روزانه به اندازه‌های بارش و آب‌دهی سالانه تبدیل شدند. با این فرایند امکان تحلیل بلندمدت و بررسی رفتار ناهم‌زمانی مؤلفه‌ها فراهم شد.

نوع مقاله: پژوهشی

***مسئول مکاتبات:** sadeghi@modares.ac.ir

استناد: صادقی، س. ح. ر.، نادری‌مرنگلو، ن.، مصطفایی‌یونجالی، س.، بادامه، ا.، شیخی، ز.، نوری، ع.، قره‌محمودلی، س. ۱۴۰۵. شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابوردر دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳):۱۴۲-۱۲۳.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2026.372273.1660

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۵، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۳۱ **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۳، شمارهٔ پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱۲۳ تا ۱۴۲.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان

اندازه‌های بارش و رواناب متناظر با دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-Plus برآورد شد. در این تحلیل، از میان توزیع‌های مختلف آماری، توزیع Weibull برای داده‌های بارش و توزیع Gumbel برای داده‌های آب‌دهی بر اساس پیشنهاد سامانه پشتیبان تصمیم نرم‌افزار Hyfran-Plus و با استفاده از معیارهای اطلاعات آکائیک و اطلاعات بیز، به‌عنوان بهترین برازش برای داده‌های مطالعه‌شده انتخاب شدند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که اندازه بارش سالانه در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به‌ترتیب ۲۹۰/۲۶، ۳۵۷/۲۵، ۳۹۱/۸۷، ۴۱۸/۴۷، ۴۴۷/۴۰، ۴۶۵/۶۷ و۴۸۲/۵۴ میلی‌متر بود. در زیرآبخیزهای مختلف، دوره‌های برگشت بارش و رواناب هم‌سان نبود و با افزایش دوره‌های برگشت بارش، آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آب‌دهی سالانه و حجم رواناب در تمام ایستگاه‌ها با شیب متفاوت و به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. به طوری‌که در دوره‌های برگشت کوتاه‌مدت نسبت ۵ به ۲ ساله، اندازه‌های بارش، آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آب‌دهی سالانه و حجم رواناب به‌ترتیب در ایستگاه عیش‌آباد ۱/۲۳، ۲/۰۶، ۲/۳۹ و ۴/۹۱؛ در ایستگاه طاغون به‌ترتیب ۱/۲۳، ۲/۰۰، ۲/۲۲ و ۴/۰۰؛ ایستگاه دورود به‌ترتیب ۱/۲۳، ۱/۹۰، ۲/۱۶ و ۴/۱۳؛ و ایستگاه زرنده به‌ترتیب ۱/۲۴، ۱/۸۷، ۲/۰۹ و ۲/۷۸ به‌دست آمد. حال‌آن‌که نسبت مزبور در دوره‌های بلندمدت نسبت ۲۰۰ به ۱۰۰ ساله اندازه بارش، آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آب‌دهی سالانه و حجم رواناب به‌ترتیب در ایستگاه عیش‌آباد ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۱۴ و ۱/۲۸؛ ایستگاه طاغون به‌ترتیب ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۱۳ و ۱/۲۸؛ و در ایستگاه دورود به‌ترتیب ۱/۰۳، ۱/۱۳، ۱/۱۳ و ۱/۴۶ و هم‌چنین نتایج در ایستگاه زرنده به‌ترتیب ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۳۱ و ۱/۲۸ به‌دست آمد. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از ویژگی‌های محلی آبخیز است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش مؤید آن بود که استفاده از رویکردهای هم‌زمان و چندمتغیره در تحلیل دوره برگشت بارش و رواناب، برای طراحی سازه‌های مهار سیلاب و رسوب، پیش‌بینی رخدادهای آب‌شناختی و مدیریت پایدار منابع آب و خاک در دشت‌های نیمه‌خشک ضروری است. نتایج نشان داد رابطه میان بارش و رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت، ناخطی شده و این موضوع مؤید لزوم درنظرگیری توأم این مؤلفه‌ها در برآورد خطر سیلاب و طراحی زیرساخت‌های آبی است. افزون بر این، تفاوت‌های مکانی معنادار در پاسخ آب‌شناختی زیرآبخیزها، بیانگر اهمیت تدوین راهبردهای مدیریتی مبتنی بر شرایط خاص هر آبخیز است. با توجه به تأثیرپذیری زیاد آبخیزهای نیمه‌خشک از تغییرات اقلیمی، می‌توان با تلفیق داده‌های آب-اقلیمی بلندمدت با مدل‌های پیشرفته آماری نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌ها را کاهش داد. در نتیجه، گسترش چنین پژوهش‌هایی در دیگر آبخیزهای مشابه و نیز ترکیب مؤلفه رسوب در تحلیل‌های آینده، گام مؤثری در راستای مدیریت جامع و تاب‌آور منابع آب و خاک است. بر پایه نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه مدل‌های آب‌شناختی یکپارچه‌ای متمرکز شوند که پیش‌بینی‌های اقلیمی را به‌طور پویا با سناریوهای تغییر کاربری زمین، پیوند می‌دهند. با چنین مدل‌ها و تحلیل‌ها، توانمندی کارشناسان در مدیریت جامع منابع آب و خاک، کاهش مخاطره‌های سیلاب و برنامه‌ریزی کاربری زمین به‌طور سازگار و مبتنی بر شرایط هر آبخیز، افزایش خواهد یافت. افزون بر این، ترویج همکاری میان آب‌شناسان، اقلیم‌شناسان و برنامه‌ریزان کاربری زمین برای تبدیل این بینش‌های علمی به سیاست‌ها و استانداردهای مهندسی مناسب و متناسب با هر منطقه، به‌منظور بهبود خدمات بوم‌سازگانی و تاب‌آوری جامعه در مناطق نیمه‌خشک آسیب‌پذیر، پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

آبدهی بیشینه لحظه‌ای، بارش سالانه، حجم رواناب سالانه، دوره برگشت، رواناب، میانگین آبدهی سالانه

مقدمه

مدل‌سازی بارش-رواناب به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای آب‌شناختی شناخته‌شده که در برآورد متغیرهایی مانند آب‌دهی اوج، حجم رواناب، زمان تمرکز و زمان پایه، نقش مهمی دارد (گادورا و محمد ۲۰۲۴). دوره برگشت[1] به‌عنوان میانگین فاصله زمانی میان رخدادهای با شدت مشخص تعریف‌شده و برای طراحی سدها، کانال‌ها و سازه‌های مهار رسوب بسیار مهم است. تحلیل فراوانی و تعیین دوره برگشت متغیرهای آب‌شناختی، از مهم‌ترین ارکان برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب[2]، طراحی سازه‌های آبی و ارزیابی مخاطره‌های طبیعی به‌شمار می‌آیند (افشاری‌پور ۲۰۱۸؛ ساریگیل و همکاران ۲۰۲۴؛ دب و همکاران ۲۰۲۵). متغیرهایی مانند بارش، رواناب[3] و بار رسوب[4] به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی چرخه آب‌شناختی، در شکل‌گیری سیلاب‌ها، فرسایش خاک و نابودی منابع‌طبیعی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند که با بررسی جداگانه آن‌ها نمی‌توان تصویر کاملی از فرآیندهای حاکم بر رخداد سیلاب‌ها و پدیده‌های فرسایشی ارائه داد. رابطه بارش-رواناب یک چالش اساسی در راستای آب‌شناسی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و تکامل سامانه آبخیز است که با بهره‌گیری از این رابطه می‌توان پیچیدگی و ایستا نبودن را نشان داد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۸؛ فرانزن و همکاران ۲۰۲۰). بارش و رواناب به‌عنوان عنصرهای اساسی چرخه آب‌شناختی به‌هم پیوسته‌اند و رواناب در حقیقیت، پاسخ یک آبخیز به بارش دریافتی است که اندازه آن در مکان‌های مختلف (تغییرات مکانی) و در زمان‌های مختلف (تغییرات زمانی) متفاوت است (خو و همکاران ۲۰۱۰). این رابطه تحت تأثیر ویژگی‌های اقلیمی و پوشش زمین، اندازه آبخیز، پستی‌بلندی، ترکیب خاک، پوشش گیاهی و ناهمگونی مکانی است (بالز و همکاران ۲۰۱۸).

در بسیاری از آبخیزها رخداد بارش‌های حدی موجب افزایش سریع رواناب سطحی، افزایش آب‌دهی اوج و در نتیجه افزایش فرآیندهای فرسایشی و انتقال رسوب می‌شود. با این حال، واکنش هر یک از این متغیرها نسبت به رویدادهای حدی[5] یکسان نیست و در دوره‌های گوناگون برگشت متفاوت است (بلوشل و همکاران ۲۰۱۹). ازاین‌رو، با مقایسه هم‌زمان دوره برگشت بارش-رواناب می‌توان به درک جامع‌تری از رفتار سامانه آب‌شناختی آبخیزها و روابط متقابل این متغیرها رسید. در سال‌های پیشین، استفاده از مدل‌های آماری پیشرفته مانند HEC-HMS، IHACRES، SCS-CN و SWAT برای تحلیل فراوانی رویدادهای آب‌شناختی گسترش‌یافته است (نصیری‌خیاوی و همکاران ۲۰۲۳؛ جابرزاده و همکاران ۲۰۲۴؛ کالیزایا و همکاران ۲۰۲۵).

افزون بر این، پیشرفت مدل‌سازی داده‌های ماهواره‌ای و پایگاه‌های داده اقلیمی با وضوح زیاد، امکان تحلیل دقیق‌تر بارش و رواناب در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی را فراهم‌آورده است. پژوهشگران بر پایهٔ این رویکردها، نوسان‌های زمانی بارش‌های شدید و اثرات آن‌ها بر رواناب و آب‌دهی اوج را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کنند. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد رابطه میان شدت بارش و پاسخ رواناب در آبخیزها تحت تأثیر عامل‌های پرشماری مانند پوشش گیاهی، کاربری زمین و ویژگی‌های خاک است و نمی‌توان آن را فقط با مدل‌های ساده توضیح داد (لین و همکاران ۲۰۲۴). افزون بر این، بررسی رفتار رواناب در دوره‌های برگشت بلندمدت و رخدادهای نادر، برای ارزیابی خطرپذیری سیلاب‌های شدید و طراحی سازه‌های آبی مقاوم، ضروری است. استفاده از مدل‌های آماری ترکیبی و شبیه‌سازی‌های Monte Carlo امکان ارزیابی نبودن قطعیت در پیش‌بینی رواناب و دوره برگشت را فراهم‌آورده است و می‌توان خطای برآورد خطرات آب‌شناختی را کاهش داد. در نتیجه، با ترکیب داده‌های بارش، رواناب، میانگین آب‌دهی و آب‌دهی لحظه‌ای در یک چارچوب تحلیلی، می‌توان رویکردی جامع برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی مقابله با سیلاب و حفاظت از خاک ارائه داد که منجر به طراحی راهبردهای عملیاتی و کاهش خطرپذیری آبخیزها می‌شود.

پژوهش‌های پرشماری در راستای رابطهٔ بارش و رواناب با دوره‌های گوناگون برگشت انجام‌شده است. در پژوهشی مروری، مونتناری و همکاران (۲۰۱۳) بر لزوم تحلیل هم‌زمان متغیرهای آب‌شناختی تأکید کردند و نشان دادند نادیده گرفتن وابستگی میان بارش، رواناب و رسوب منجر به کم‌برآوردی خطرات فرسایشی شد. ژانگ و همکاران

1- Return period
2- Water resources management
3- Runoff
4- Sediment load
5- Extreme event

(۲۰۲۴) با مقایسه دوره برگشت بارش و رواناب در آبخیز رود زرد چین نتیجه گرفتند که تغییرات کاربری زمین، رابطه معمول بارش-رواناب را تغییر داد و موجب تفاوت قابل‌توجه میان دوره‌های برگشت این دو متغیر شد. نتایج پژوهش‌های پیشین در آبخیزهای آلپی نشان داد رویدادهای بارش با افزایش دوره برگشت، غالباً منجر به افزایش ناگهانی رواناب و حمل رسوب شدند. اما، اندازه رسوب معلق در طول زمان به منحنی رواناب-رسوب وابسته بود و دوره برگشت رسوب با دوره برگشت بارش و رواناب همیشه هم‌خوان نیست (رحمان و همکاران ۲۰۲۴). افزون بر این، نتایج شبیه‌سازی‌های پیشین نشان داد تحلیل هم‌زمان دوره برگشت سه مؤلفه رواناب-بارش-رسوب، سبب افزایش دقت پیش‌بینی رفتار آبخیز، کاهش خسارت ناشی از آب‌دهی سیلاب و فرسایش شد (سیامس‌الدین و همکاران ۲۰۲۵؛ فاگوندس و همکاران ۲۰۲۵؛ وان‌حامل و همکاران ۲۰۲۵). پژوهش‌ها نشان دادند که رویدادهای بزرگ بارش با افزایش دوره برگشت می‌توانند منجر به رخداد اوج‌های شدید رواناب و افزایش ناگهانی جریان رسوب شوند. اما، این افزایش در آبخیزهایی با فرآیندهای ریخت‌شناختی آبی پیچیده یا نفوذپذیری متفاوت خاک ممکن است با تأخیر یا به‌شکل ناخطی رخ دهد. بذرافشان و همکاران (۲۰۲۵) دریافتند که با تحلیل هم‌زمان بازه‌های برگشت رواناب و رسوب در روش‌های آماری می‌توان نوسانات دوره‌ای و وابستگی‌های زمانی متفاوت میان این متغیرها را مشخص کرد. دوره برگشت رسوب گاهی مستقل از دوره برگشت رواناب است و این موضوع برای طراحی سازه‌های مهار رسوب اهمیت بسیاری دارد.

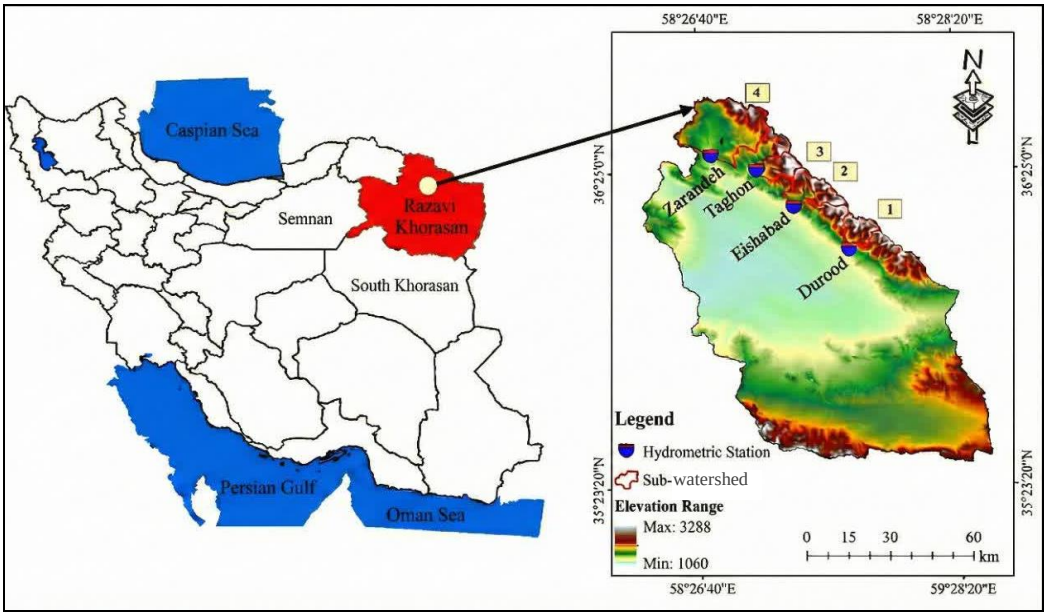
بر پایه نتایج پژوهش‌های پیشین، روابط میان بارش و رواناب همواره خطی نبوده و رفتار این مؤلفه‌ها در دوره‌های گوناگون برگشت می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از شرایط محلی هر زیرآبخیز مانند ویژگی‌های گیتاشناسی، اقلیم، کاربری زمین و ویژگی‌های آماری داده‌های آب‌شناختی است. ازاین‌رو، با بررسی هم‌زمان بارش و رواناب و مقایسه رفتار آن‌ها در دوره‌های گوناگون برگشت می‌توان به درک دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از پاسخ آب‌شناختی آبخیز، به‌ویژه در شرایط رخدادهای حدی، رسید. در این چارچوب، با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-plus به‌عنوان یکی از ابزارهای معتبر تحلیل فراوانی و برآورد دوره‌های برگشت، می‌توان امکان انتخاب بهینه توزیع‌های آماری و ارزیابی نبودن قطعیت در برآورد اندازه‌های حدی را فراهم آورد. مزیت اصلی این نرم‌افزار در مقایسه با روش‌های متداول، قابلیت مقایسه هم‌زمان چندین توزیع آماری و انتخاب توزیع برتر بر اساس شاخص‌های آماری است که دقت تحلیل را به‌ویژه در داده‌های آب‌شناختی حدی افزایش می‌دهد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی هم‌زمان دوره برگشت بارش و رواناب در آبخیز نیشابور و تحلیل تفاوت رفتار این مؤلفه‌ها در ایستگاه‌ها و زیرآبخیزهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-plus بود. در این رویکرد هم‌گام با درک دقیق‌تری از رفتار آب‌شناختی آبخیز، می‌توان ابزار علمی مناسبی برای مدیریت سیلاب، طراحی سازه‌های آبی و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک در شرایط اقلیمی مشابه ارائه داد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

آبخیز نیشابور بخشی از آبخیز کویر مرکزی ایران با مساحتی حدود ۹۲۵۷ کیلومتر مربع، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های آب‌شناختی و کشاورزی شمال‌شرق ایران به‌شمار می‌آید. آبخیز نیشابور از شمال به خط الراس بلندی‌های بینالود، از شرق به بلندی‌های لیلاجوق و یال پلنگ، از جنوب به تپه ماهوره‌ای نیزه بند، سیاه کوه و کوه نمک و از غرب به آبخیز دشت سبزوار محدود می‌شود (سعادت‌پور و همکاران ۱۳۹۸). این پژوهش در آبخیز نیشابور به‌دلیل داشتن طولانی‌ترین دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹) با داده‌های پیوسته و قابل اطمینان در چهار ایستگاه انتخاب‌شده، اجرا شد. افزون بر این، اهمیت کشاورزی و جمعیت این منطقه، مؤید ضرورت مدیریت سیلاب و منابع آب است. بلندی منطقه از حدود ۱۰۰۰ متر در نواحی جنوبی و دشت‌ها تا بیش از ۳۲۰۰ متر در بلندی‌های شمالی متغیر است. از دیدگاه اقلیمی، این آبخیز در محدوده اقلیم نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانه منطقه حدود ۲۷۰ میلی‌متر و بیشتر بارش‌ها در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد. میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد است که با افزایش بلندی کاهش می‌یابد. تنوع پستی‌بلندی، زمین‌شناسی، نوع خاک و کاربری زمین در این آبخیز موجب تفاوت قابل‌توجه رفتار آب‌شناختی و تولید

رواناب در نقاط مختلف آن شده است. در این پژوهش، چهار ایستگاه آب‌سنجی به‌همراه آبخیز بالادست آن به‌عنوان منطقه پژوهشی انتخاب شد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز نیشابور، مرز زیرآبخیزها، موقعیت ایستگاه‌ها در استان خراسان رضوی و ایران.

Figure 1- Geographical location of the Neyshabur Watershed, sub-watershed boundaries, and station locations in Razavi Khorasan Province and Iran.

روش پژوهش

در این پژوهش، به‌منظور رفتارشناسی آب‌شناختی آبخیز نیشابور، از رویکرد ترکیبی تحلیل آماری و مدل‌سازی دوره برگشت استفاده شد. با این رویکرد می‌توان امکان بررسی جامع تغییرات و نوسانات بلندمدت بارش و رواناب، شناسایی الگوهای آب‌شناختی و ارزیابی خطرپذیری جریان‌های شدید را فراهم آورد. اطلاعات استفاده‌شده شامل داده‌های بارش روزانه و آب‌دهی در دوره زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ بود که از چهار ایستگاه آب‌سنجی و باران‌سنجی معتبر آبخیز نیشابور جمع‌آوری شدند (شکل ۱). داده‌های بارش و آب‌دهی این ایستگاه‌ها به‌وسیلهٔ سازمان‌های ذی‌ربط (شرکت آب منطقه‌ای و هواشناسی) تأیید شده‌اند. افزون بر این، آمار بلندمدت، پیوسته، بدون نقص آماری، با قابلیت بازبینی کیفیت استاندارد و مستندسازی کامل از دیگر ویژگی های این داده‌ها است. این ایستگاه‌ها نماینده شرایط آب‌شناختی متفاوت دشت بوده و با بررسی آنها می‌توان امکان تحلیل دقیق تغییرات مکانی و زمانی را فراهم آورد. پیش از تحلیل، داده‌ها از دیدگاه کیفیت بررسی و اندازه‌های ناقص یا خطادار با استفاده از روش‌های آماری وایازی‌گیری خطی چندمتغیره[1] جایگزین شدند (گائو و همکاران ۲۰۲۳). این مرحله ضامن انجام تحلیل‌ها بر پایه داده‌های معتبر و قابل اطمینان است. پس از اصلاح داده‌ها، اندازه‌های بارش و آب‌دهی روزانه به اندازه‌های بارش و آب‌دهی سالانه تبدیل شدند. با استفاده از بیشینه اندازه‌های سالانه می‌توان امکان مقایسه مستقیم رفتار بلندمدت بارش، آب‌دهی و تحلیل ناهم‌زمانی دوره برگشت آن‌ها را فراهم آورد (وفاخواه و مقدم‌نیا ۲۰۱۹). در حالی‌که تحلیل رخدادمحور بیشتر مناسب بررسی پاسخ کوتاه‌مدت آبخیز است. با بهره‌گیری از این فرآیند که شامل محاسبه مجموع بارش سالانه و حجم رواناب سالانه برای هر ایستگاه بود، امکان تحلیل بلندمدت و بررسی رفتار آب‌شناختی آبخیز فراهم شد.

برآورد دوره برگشت با استفاده از Hyfran-Plus

نرم‌افزار Hyfran-Plus برای متناسب‌سازی داده‌های آماری استفاده می‌شود. این نرم‌افزار ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل آماری سری‌های زمانی است. این نرم‌افزار

1- Multiple Linear Regression

به دو زبان فرانسوی و انگلیسی موجود است. در ابتدا از این نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل داده‌های با رخدادهای شدید طراحی‌شده بود. اما، امروزه در علوم مختلف مهندسی، هواشناسی و محیط‌زیست کاربرد دارد (عبادی‌فر و همکاران ۲۰۲۰). چمنی و همکاران (۲۰۲۳) از این نرم‌افزار برای بررسی اثر آب‌دهی در دوره‌های گوناگون برگشت بر آب‌دهی سیلاب استفاده کردند و کارایی آن را تأیید کردند. افزایش دوره برگشت در متغیرهای اقلیمی و آب‌شناختی معمولاً با افزایش شدت و قدرت ویرانی همراه است. ازاین‌رو، برای برآورد دقیق این متغیرها در دوره‌های گوناگون برگشت، از توزیع‌های آماری مناسب استفاده می‌شود. در این پژوهش، داده‌های ورودی شامل سری بیشینه بارش سالانه ۲۴ ساعته بودند. برای برازش توزیع‌های آماری، چند توزیع متداول شامل GEV، Log-Pearson III، Weibull، Gumbel و Log-Normal در نظر گرفته شد و فراسنجه‌های هر توزیع با روش بیشینه درست‌نمایی برآورد شد. توزیع مناسب برای هر ایستگاه بر اساس آزمون‌های نیکویی برازشKolomogrov-Smirnov انتخاب شد. از میان توزیع‌های آماری مختلف، توزیع Weibull برای داده‌های بارش و توزیع Gumbel برای داده‌های آب‌دهی بر اساس پیشنهاد سامانه پشتیبان تصمیم[1] نرم‌افزار Hyfran-Plus با استفاده از معیارهای اطلاعات Akaike[2] و اطلاعات Bayes[3] به‌عنوان بهترین برازش برای داده‌های مطالعه‌شده، انتخاب شدند. داده‌های بیشینه لحظه‌ای، میانگین آب‌دهی سالانه، حجم رواناب سالانه و بارش در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال برآورد شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۳).

نتایج و بحث

نتایج آمار توصیفی بارش

نتایج آمار توصیفی بارش در ایستگاه‌های انتخاب‌شده آبخیز نیشابور در دوره آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ در جدول ۱ ارائه‌شده است. بررسی اندازه‌های بیشینه، کمینه و میانگین بارش نشان داد که توزیع زمانی و مکانی بارش در ایستگاه‌های مطالعه‌شده ناهمگن بود؛ به‌گونه‌ای که بیشترین اندازه بیشینه بارش سالانه برابر با ۵۱۱/۵ میلی‌متر مربوط به ایستگاه عیش‌آباد و کمترین اندازه بیشینه بارش سالانه ۳۶۷/۵۰ میلی‌متر مربوط به ایستگاه طاغون بود.

نتایج دوره برگشت بارش سالانه

نتایج برآورد دوره‌های برگشت بارش سالانه در ایستگاه‌های مطالعه‌شده با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-Plus در جدول ۲ ارائه‌شده است. مقایسه اندازه‌های بارش متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت نشان داد رفتار آماری بارش در ایستگاه‌های مطالعه‌شده یکسان نیست و در تمام ایستگاه‌ها روند افزایش اندازه بارش با افزایش دوره برگشت، یکنواخت نیست. به‌طور مثال، در دوره برگشت ۵۰ ساله، اندازه بارش برآوردشده در ایستگاه عیش‌آباد ۴۴۷/۴۰ میلی‌متر و در ایستگاه دورود ۴۲۸/۷۱ میلی‌متر به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ایستگاه زرنده (۳۷۹/۷۱ میلی‌متر) بود. این یافته بیانگر ناهمگنی مکانی بارش‌های حدی در آبخیز نیشابور است. بررسی تغییرات بارش با افزایش دوره برگشت نشان داد با افزایش دوره برگشت از ۱۰۰ به ۲۰۰ سال، شیب افزایش بارش در ایستگاه‌های عیش‌آباد و طاغون در مقایسه با ایستگاه زرنده بیشتر بود و حساسیت این ایستگاه‌ها نسبت به رخدادهای حدی نادر بیشتر بود. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Hyfran-Plus در جدول ۲ ارائه‌شده است. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از یک اندازه ثابت بارش طراحی برای کل آبخیز نیشابور منجر به برآورد نادرست و در برخی شرایط خطای قابل‌توجه در ارزیابی خطرات آب‌شناختی و طراحی سازه‌های آبی می‌شود. ازاین‌رو، در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی بارش‌های حدی در پژوهش‌های مدیریت منابع آب و مهار سیلاب ضروری است.

نتایج آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای

تحلیل آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان داد با افزایش دوره برگشت، اندازه‌های آب‌دهی افزایش یافت و این روند مؤید رخدادهای شدید و نادر آب‌شناختی است (جدول ۳). به‌طور مثال، در ایستگاه عیش‌آباد، آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای در دوره برگشت ۲ ساله ۳۵/۳۰ مترمکعب بر ثانیه و در دوره برگشت ۲۰۰ ساله به ۱۹۷/۰۰ مترمکعب بر ثانیه، افزایش یافت.

1- Decision Support System
2- Akaike Information Criterion (AIC)
3- Bayesian Information Criterion (BIC)

جدول ۱- اندازه‌های متغیرهای بارش سالانه (میلی‌متر) در هر ایستگاه از سال ۱۳۹۹-۱۳۷۰.

Table 1- Values of annual precipitation variables (mm) at each station from 1991-2020.

Station	Maximum	Minimum	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation (٪)
Eishabad	511.50	49.50	293.14	88.35	30.14
Taghon	367.50	70.00	275.34	85.12	30.91
Durood	506.00	128.80	299.15	92.44	30.90
Zarandeh	404.00	62.00	201.70	68.76	34.09

جدول ۲- اندازه‌های میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 2- Mean annual precipitation (mm) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	290.26	357.25	391.87	418.47	447.40	465.97	482.54
Taghon	285.41	351.40	384.93	410.78	439.20	457.29	473.47
Durood	278.91	343.46	375.99	401.16	428.71	446.53	462.12
Zarandeh	245.04	302.52	331.86	354.86	379.71	395.43	409.74

جدول ۳- اندازه‌های آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده

Table 3- Maximum instantaneous discharge (m^3 s-1) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	35.30	72.60	97.30	121.00	152.00	175.00	197.00
Taghon	21.20	42.30	56.30	69.80	87.10	100.00	113.00
Durood	15.70	29.9	39.00	48.30	60.00	68.80	77.50
Zarandeh	31.40	58.60	76.60	93.80	116.00	133.00	150.00

نتایج دوره برگشت میانگین آب‌دهی سالانه

تحلیل میانگین آب‌دهی سالانه نشان داد با افزایش طول دوره برگشت، آب‌دهی سالانه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (جدول ۴). این روند هم‌سو با نتایج دوره برگشت بارش و حجم رواناب بود. برای مثال، در ایستگاه عیش‌آباد میانگین آب‌دهی سالانه در دوره برگشت ۲ ساله برابر ۱۲/۲۰مترمکعب بر ثانیه و در دوره ۲۰۰ ساله به ۸۵/۸۰ مترمکعب بر ثانیه، افزایش یافت.

جدول ۴- اندازه‌های میانگین آب‌دهی سالانه (مترمکعب بر ثانیه) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 4- Mean annual discharge (m^3 s-1) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	12.20	29.10	40.30	51.10	65.00	75.40	85.80
Taghon	5.36	11.90	16.20	20.40	25.80	29.80	33.80
Durood	3.23	6.99	9.49	11.90	15.00	17.30	19.60
Zarandeh	9.33	19.50	26.20	32.70	41.10	47.33	53.60

نتایج دوره برگشت رواناب سالانه

نتایج تحلیل فراوانی رواناب سالانه با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-Plus نشان داد حجم رواناب متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده به‌شکل قابل‌توجهی متفاوت است (جدول ۵). برای مثال، در دوره برگشت ۵۰ ساله، حجم رواناب در ایستگاه عیش‌آباد ۳۱۱/۵۷ میلیون مترمکعب و در ایستگاه طاغون ۲۳۹/۲۵ میلیون مترمکعب بود، در حالی‌که این اندازه در ایستگاه دورود ۲۲/۸۵ میلیون مترمکعب برآورد شد. با افزایش دوره برگشت تا ۲۰۰ سال، اندازه رواناب در ایستگاه عیش‌آباد به ۵۳۳/۰۴ میلیون مترمکعب و در طاغون به ۴۰۲/۶۸ میلیون مترمکعب افزایش یافت، در حالی‌که در

ایستگاه دورود این اندازه به‌مراتب کمتر (۴۷/۹۰ میلیون مترمکعب) بود. این تفاوت‌ها بیانگر آن بود که با وجود روند افزایشی رواناب در تمام ایستگاه‌ها، اندازهٔ افزایش آن یکنواخت نیست و در دوره‌های برگشت بلندمدت، ناهمگنی مکانی و حساسیت پاسخ آب‌شناختی آبخیر شدت یافت. استفاده از اندازه‌های یکنواخت رواناب طراحی در مقیاس آبخیر می‌تواند منجر به خطای قابل‌توجه در ارزیابی خطر آب‌دهی سیلاب شود.

جدول ۵- اندازه‌های رواناب (میلیون مترمکعب) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 5- Runoff volume (Mm^3) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

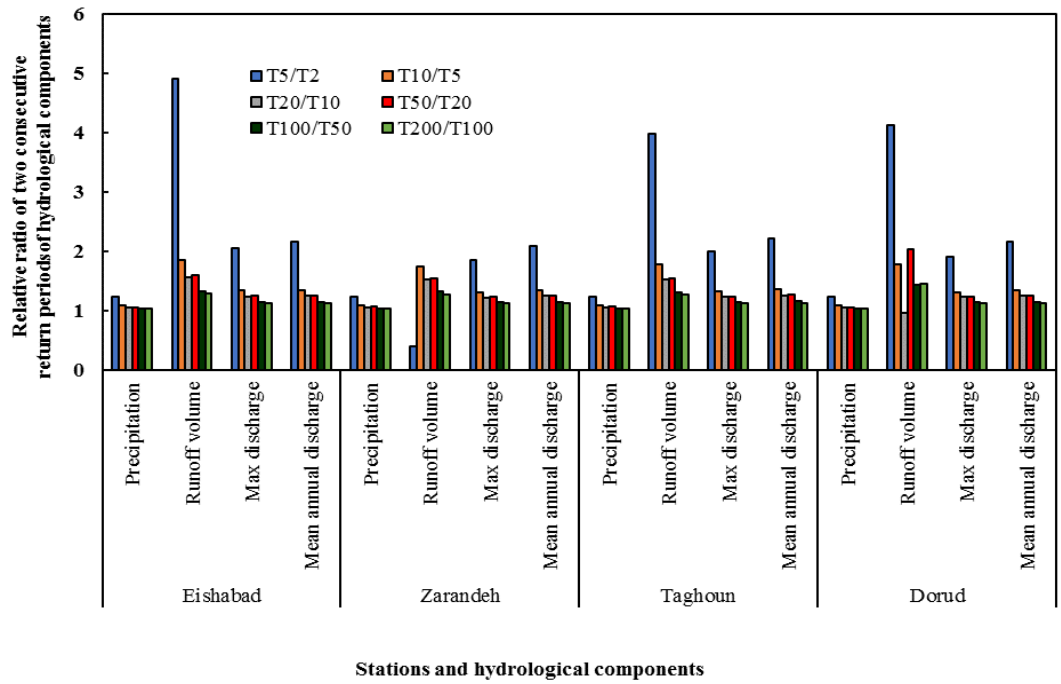
Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	13.59	66.62	123.66	194.99	311.57	416.12	533.04
Taghon	14.17	56.43	99.96	153.64	239.24	315.36	402.68
Durood	1.60	6.59	11.17	11.25	22.85	32.73	47.90
Zarandeh	8.32	23.10	40.58	62.12	96.58	127.5	162.73

نتایج تحلیل نسبت تغییرات مؤلفه‌های آب‌شناختی بارش و رواناب

تحلیل نسبت اندازه‌های مؤلفه‌های آب‌شناختی (بارش، حجم رواناب، میانگین آب‌دهی سالانه و آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای) در شکل ۲ ارائه‌شده است. نتایج تحلیل در دوره‌های گوناگون برگشت نشان داد پاسخ آبخیزها نسبت به افزایش دوره برگشت ناخطی و بسیار حساس است، به‌ویژه برای مؤلفه‌هایی که نمایان‌گر شدت جریان و بحران‌های آب‌شناختی هستند.

تحلیل آمار توصیفی بارش

تفاوت اندازه‌های میانگین بارش سالانه میان ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان‌دهندهٔ تفاوت الگوهای اقلیمی، شیب و پستی‌بلندی آبخیز، فاصله از منابع رطوبتی و شرایط محلی بود (مینا ۲۰۲۰). تفاوت اندازه‌های میانگین بارش سالانه (بیش از ۳۰٪) نشان‌دهنده ناپایداری زمانی بارش و توزیع نامنظم آن در طول دوره آماری بود.



شکل ۲- نسبت دوره‌های برگشت بارش و مؤلفه‌های مختلف رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت (سال) در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Figure 2- Ratio of precipitation return periods and different runoff components in different return periods (year) at study stations.

بررسی اندازه‌های حدی بارش نیز نشان داد بیشترین بیشینه بارش مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود که نشان‌دهندهٔ رخدادهای شدید بارشی است، در حالی‌که کمترین اندازه‌های سالانه در همان ایستگاه و زرنده نیز نشان‌دهنده سال‌های بسیار خشک و نوسانات شدید اقلیمی است. این نتایج با یافته‌های مینا (۲۰۲۰) مبنی بر اینکه نوسانات میان سال‌های خشک و تر یکی از ویژگی‌های ذاتی بارش در اقلیم‌های مختلف است، هم‌راستا است.

تحلیل پراکندگی مطلق داده‌ها با استفاده از انحراف معیار نشان داد بیشترین نوسان مطلق بارش مربوط به ایستگاه‌های دورود و عیش‌آباد بود، به طوری‌که اندازه‌های بیش از انحراف معیار بیانگر کاهش پیش‌بینی‌پذیری و افزایش تغییرات بارش سالانه در این ایستگاه‌ها است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش فرزانا و همکاران (۲۰۲۴) مبنی بر اینکه تحلیل‌های جهانی بارش نشان‌دهندهٔ تغییرات اقلیمی و نوسانات طبیعی است که سبب افزایش نبودن قطعیت در اندازه‌های بارش بلندمدت می‌شود، مطابقت دارد. ضریب‌های تغییرات بارش در تمام ایستگاه‌ها نسبتاً زیاد بود و بیانگر نوسانات قابل‌توجه میان‌سالی بارش در آبخیز نیشابور است و این ویژگی بارز اقلیم‌های نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید. بررسی مؤلفه‌های بارش ایستگاه‌های مختلف در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ نشان داد ایستگاه‌ها به‌رغم هم‌جواری مکانی، ناهمگن هستند. بررسی ضریب تغییرات که معیاری از تغییرپذیری نسبی به‌شمار می‌آید، نشان داد تغییرپذیری بارش در ایستگاه‌های طاغون، دورود و زرنده با ضریب تغییرات بیش از ۳۰٪، نسبتاً زیاد است. این الگو بیانگر آن است که ایستگاه‌هایی با ضریب تغییرات زیاد به‌ویژه زرنده نسبت به تغییرات اقلیمی و رخدادهای خشک و تر حساس‌تر است و ممکن است نیازمند راهبردهای ویژه مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری خشک‌سالی باشد (فرزانا و همکاران ۲۰۲۴). این نتایج نشان داد الگوی بارش در منطقه مطالعه‌شده هم از دیدگاه مکانی ناهمگن است و هم با داشتن نوسانات سالانه، پیامدهای مهمی برای آب‌شناسی و مدیریت منابع آب به‌همراه دارد. دامنه تغییرات اندازه‌های بیشینه و کمینه بارش سالانه نشان‌دهندهٔ شرایط اقلیمی ناپایدار و رخداد متناوب سال‌های تر و خشک است که با یافته‌های شارما و همکاران (۲۰۱۸) هم‌راستا است. بیشترین اندازه بیشینه بارش در ایستگاه عیش‌آباد و کمترین آن در ایستگاه طاغون ثبت شد. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند اثرات عامل‌هایی مانند بلندی و پستی‌بلندی آبخیز و سامانه‌های بارشی محلی باشد، اگرچه بررسی مستقیم این عامل‌ها در این پژوهش انجام نشد. این دامنه تغییرات بارش بر رواناب، ذخیره آب و کیفیت منابع آبی اثرگذار بوده و برنامه‌ریزی کشاورزی و سازگاری با تغییرات اقلیمی را پیچیده‌تر می‌کند. ازاین‌رو، ایستگاه‌هایی که تغییرپذیری نسبی بیشتری دارند نیازمند توجه ویژه در طراحی سازه‌های ذخیره آب، مدیریت خطرپذیری خشک‌سالی و توسعه راهبردهای پایدار منابع آب هستند (وانگ و همکاران ۲۰۲۵). میانگین بارش سالانه در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی بارش بود. بیشترین میانگین بارش سالانه مربوط به ایستگاه دورود (۲۹۹/۱۵ میلی‌متر) بود، در حالی‌که کمترین این اندازه مربوط به ایستگاه زرنده (۲۰۱/۷۰ میلی‌متر) بود. این تفاوت‌ها بیانگر اثرات پستی‌بلندی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها بر وضعیت بارش است، به‌طوری که ایستگاه‌های با بلندی و نزدیکی بیشتر به منابع رطوبتی معمولاً میانگین بارش بیشتری دارند (مینا ۲۰۲۰). میانگین بارش در دیگر ایستگاه‌ها شامل عیش‌آباد (۲۹۳/۱۴ میلی‌متر) و طاغون (۲۷۵/۳۴میلی‌متر) نیز متفاوت بود که نشان‌دهنده تنوع بارش در سطح منطقه است و مؤید آن است که نمی‌توان از میانگین بارش به‌طور یکنواخت برای کل منطقه استفاده کرد و تحلیل‌های مکانی لازم است.

تحلیل دوره برگشت بارش سالانه

تحلیل اندازه‌های بارش متناظر بر اساس نتایج نرم‌افزار با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده در جدول ۲ ارائه‌شده است. رفتار آماری بارش‌های حدی در آبخیر از دیدگاه مکانی ناهمگن بود. نتایج روند افزایشی اندازه‌های بارش با افزایش طول دوره برگشت بیانگر آن استه که اندازه‌های برآوردی در دوره برگشت بلندمدت (۲۰۰ سال) بیشتر از دوره‌های کوتاه‌مدت (دو سال) هستند. می‌توان گفت، افزایش تدریجی اندازه‌های بارش با افزایش دوره برگشت در تمام ایستگاه‌ها نشان‌دهنده تفاوت در شدت و فراوانی رخدادهای حدی بارش در

مقیاس محلی است (پارمسان و همکاران ۲۰۲۲). در ایستگاه عیش‌آباد اندازه برآوردی بارش در دوره دو ساله برابر با ۲۹۰/۲۶ میلی‌متر بود، در حالی که در دوره برگشت ۲۰۰ ساله این اندازه به ۴۸۲/۵۴ میلی‌متر افزایش یافت. این الگو در دیگر ایستگاه‌ها نیز مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ رخدادهای شدید بارشی آسیب‌زا است. نتایج تحلیل دوره برگشت نشان‌دهندهٔ ناهمگنی مکانی بارش‌های شدید در سطح ایستگاه‌های مطالعه‌شده بود. برای مثال، اندازه بارش در ایستگاه زرنده در دوره برگشت ۲۰۰ ساله، ۴۰۹/۴۷ میلی‌متر بود که کمتر از ایستگاه‌های عیش‌آباد و طاغون است. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند منعکس‌کننده تفاوت‌های اقلیمی و پستی‌بلندی میان ایستگاه‌ها باشد، که در پژوهش‌های مشابه به‌عنوان عامل مهمی در تغییرات مکانی دوره برگشت بارش شناخته شده‌اند (زرین و داداشی‌رودباری ۲۰۲۲). این یافته با نتایج پژوهش بلوشل و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه افزایش بارش‌های حدی معمولاً به‌شکل مکانی ناهمگون رخ داده و حساسیت برخی زیرآبخیرها در مقایسه با دیگر مناطق به رخدادهای شدید بیشتر است، هماهنگی دارد.

تفاوت میان ایستگاه‌ها، در دوره‌های برگشت ۲۰ و ۵۰ ساله که برای طراحی سازه‌های آبی و مدیریت خطر سیلاب، اهیمت زیادی دارد به‌طور قابل‌توجهی، افزایش یافت. بیشترین اندازه‌های بارش در این دوره‌ها مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود، در حالی‌که کمترین این اندازه مربوط به ایستگاه زرنده بود. این یافته بیانگر آن است که مناطق با میانگین بارش بیشتر، هم مناطق پرخطر هستند و هم بارش‌های حدی در آن‌ها به‌گونه‌ای است که احتمال رخدادهای شدید با شدت زیاد بیشتر است. روند افزایشی اندازه‌های بارش با افزایش دوره برگشت نشان‌دهنده رخداد رویدادهای شدیدتر در بازه‌های زمانی طولانی‌تر است، و هم در برنامه‌ریزی مهندسی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد. تعیین دقیق اندازه دوره‌های برگشت بارش به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که در دوره‌های بلندمدت افزایش بارش‌های شدید مشاهده شد، برای طراحی سازه‌هایی چون سدها، کانال‌ها و سامانه‌های مهار سیلاب و طراحی زیرساخت‌های مقاوم و کاهش خطرپذیری سیل، اهمیت و ضرورت دارد (پرز و همکاران ۲۰۲۱). افزون بر این، نتایج پژوهش‌ها مؤید آن است که چنین رفتاری می‌تواند منجر به افزایش خطرپذیری سیلاب‌های ناگهانی حتی در آبخیرهایی با مساحت کوچک شود (مرز و همکاران ۲۰۱۲). در دوره‌های برگشت بلندمدت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله روند افزایشی بارش در تمام ایستگاه‌ها مشاهده شد. اما، شیب این افزایش در ایستگاه دورود و عیش‌آباد بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها بود. توزیع بارش‌های حدی در این ایستگاه‌ها نشان‌دهنده افزایش احتمال رخدادهای بسیار شدید است (شارما و همکاران ۲۰۱۸). در ایستگاه زرنده با وجود افزایش اندازه‌های بارش در دوره‌های برگشت بلندمدت، کمترین اندازه‌ها مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند پیامدی از محدودیت‌های رطوبتی و شرایط اقلیمی خشک‌تر حاکم بر این بخش از آبخیر باشد. از نتایج بررسی تفاوت‌های مکانی در دوره‌های برگشت بارش می‌توان برای تحلیل‌های خطرپذیری آب، مدیریت سیل و تعیین اولویت‌های برنامه‌ریزی در مقیاس منطقه‌ای بهره برد (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲).

تحلیل آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای

بر پایه نتایج جدول ۳، حتی در ایستگاه‌هایی با میانگین بارش مشابه، رخدادهای شدید بارشی می‌توانند آب‌دهی‌های بسیارزیاد به وجود آورند که پیامدهای جدی برای سامانه‌های زهکشی، پل‌ها و سازه‌های آب‌شناختی به‌همراه دارد (پرز و همکاران ۲۰۲۱). مقایسه میان ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های بلندمدت، بیشترین آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای مربوط به ایستگاه عیش‌آباد و زرنده در مقاسه با ایستگاه طاغون و دورود بود، در حالی‌که ایستگاه دورود در دوره‌های کوتاه‌مدت آب‌دهی کمتر و افزایش نسبتاً ملایم‌تری داشت. می‌توان گفت ایستگاه‌هایی با آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای بیشتر، در معرض خطر سیلاب‌های ناگهانی و شدیدتر بوده و نیازمند طراحی و مدیریت مناسب هستند (فاران و همکاران ۲۰۲۵).

تحلیل مقایسه‌ای آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای با میانگین آب‌دهی و حجم رواناب بیانگر رابطه میان شدت بارش، حجم رواناب و آب‌دهی لحظه‌ای بود. این یافته‌ها بیانگر آن است که ایستگاه‌هایی با بارش شدید و ناگهانی، افزون بر افزایش حجم رواناب، آب‌دهی‌های لحظه‌ای بسیارزیادی نیز دارند که می‌تواند منجر به سیلاب‌های شدید و آسیب‌زا در مقیاس آبخیز شود. ازاین‌رو، تحلیل آب‌دهی لحظه‌ای، به‌ویژه برای طراحی سازه‌های محافظتی، کانال‌ها

و سدهای مهار سیلاب، اهمیت زیادی دارد (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). افزایش آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای با طول دوره برگشت نیز مؤید رخدادهای شدید بارشی، با احتمال کم ولی پیامدهای زیاد، است که می‌توانند آب‌دهی‌های پیش‌بینی‌نشدنی تولید کنند. این یافته‌ها مؤید ضرورت مدل‌سازی دقیق آب‌شناختی و شبیه‌سازی جریان‌های سطحی شدید برای کاهش خطرپذیری سیلاب و طراحی سازه‌های مقاوم است.

تحلیل دوره برگشت میانگین آب‌دهی سالانه

بر پایهٔ نتایج جدول ۴، افزایش میانگین آب‌دهی سالانه در دوره برگشت‌ها نشان داد رخدادهای بارشی شدید منجر به آب‌دهی زیاد رودها و سامانه‌های زهکشی می‌شوند که اهمیت آن نیز در طراحی سازه‌های آب‌شناختی و پیش‌بینی آب‌دهی سیلاب بسیارزیاد است (پرز و همکاران ۲۰۲۱). مقایسه میانگین آب‌دهی سالانه میان ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های برگشت کوتاه تا بلندمدت، آب‌دهی ایستگاه زرنده و عیش آباد در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها بیشتر بود، در حالی‌که این اندازه در ایستگاه دورود نسبتاً کمتر و روند افزایشی یکنواخت بود، و نسبت به رخدادهای شدید حساسیت کمتری داشت. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های آبخیز، ظرفیت نفوذ خاک، پوشش گیاهی و شیب پستی‌بلندی باشد که بر شدت رواناب و جریان سطحی اثرگذار است (فاران و همکاران ۲۰۲۵). افزایش میانگین آب‌دهی با طول دوره برگشت بیانگر آن است که حتی در ایستگاه‌هایی با میانگین بارش کمتر، احتمال رخداد جریان‌های شدید و حوادث آب‌شناختی به‌شدت تأثیرگذار وجود دارد. این موضوع مؤید اهمیت تحلیل دوره برگشت و حجم رواناب را در کنار آب‌دهی سالانه برای مدیریت سیلاب، طراحی پل‌ها، کانال‌ها و سدها است (زرین و داداشی‌رودباری ۲۰۲۲). ترکیب داده‌های میانگین آب‌دهی سالانه با نتایج دوره برگشت بارش و حجم رواناب نشان داد که رابطه میان شدت بارش، حجم رواناب و میانگین آب‌دهی سالانه مستقیم است. به‌بیان دیگر، ایستگاه‌هایی که دوره برگشت بارش طولانی‌تری دارند، میانگین آب‌دهی بیشتر و حجم رواناب بیشتری نیز دارند. افزون بر این، تحلیل میانگین آب‌دهی سالانه نشان داد تفاوت‌های مکانی میان ایستگاه‌ها قابل توجه است. برای مثال، میانگین آب‌دهی ایستگاه زرنده و عیش آباد در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها، بیشتر و این اندازه در ایستگاه دورود کمتر بود. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های آب‌شناختی و پستی‌بلندی آبخیرها، ظرفیت ذخیره‌سازی خاک و شبکه زهکشی طبیعی باشد. این یافته‌ها مؤید ضرورت تحلیل مکانی آب‌دهی و رواناب در مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری سیلاب است (فاران و همکاران ۲۰۲۵).

تحلیل دوره برگشت رواناب سالانه

تحلیل اندازه‌های رواناب متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان داد با افزایش دوره برگشت، حجم رواناب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (جدول ۵)، که این روند با نتایج تحلیل دوره برگشت بارش سالانه هم‌خوانی دارد. در ایستگاه عیش‌آباد، حجم رواناب در دوره برگشت دو ساله برابر با ۱۳/۵۸ میلیون مترمکعب بود و در دوره برگشت ۲۰۰ ساله به ۵۳۳/۰۴ میلیون مترمکعب افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش شدید اندازهٔ رواناب در رخدادهای بارشی شدید است. بر اساس نتایج پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۶) با مدل PRMS، سالانه به‌طور میانگین ۲۹۵ میلیون مترمکعب آب از سطح به آبخوان نیشابور تغذیه می‌شود. با توجه به اینکه دوره برگشت ۲۰۰ سال نشان‌دهنده یک رخداد حدی و نادر است، حجم رواناب ۵۳۳ میلیون مترمکعب برای چنین رویدادی قابل انتظار است. زیرا، در رخدادهای حدی، بخش بیشتر بارش به رواناب تبدیل‌شده و فرصت نفوذ بسیار کاهش می‌یابد. افزون بر این، مساحت بالادست ایستگاه عیش‌آباد و شیب زیاد منطقه، سبب افزایش تمرکز رواناب و آب‌دهی اوج می‌شود. این الگو در دیگر ایستگاه‌ها نیز مشاهده شد. برای مثال، در دوره‌های بلندمدت، حجم رواناب ایستگاه طاغون در مقایسه با ایستگاه دورود بیشتر بود در حالی‌که این اندازه در تمام دوره‌ها در ایستگاه دورود کمتر بود و حساسیت کمتری نیز نسبت به بارش‌های شدید داشت. این افزایش حجم رواناب با طول دوره برگشت نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان شدت بارش و اندازهٔ رواناب سالانه است و مؤید اهمیت تحلیل دوره برگشت در مدیریت منابع آب است. بر پایهٔ نتایج پژوهش‌های پیشین، تحلیل احتمال رخداد رواناب و رابطهٔ آن با دوره‌های برگشت بارش، ابزار مهمی برای پیش‌بینی آب‌دهی سیلاب و کاهش خطرپذیری در مناطق با بارش متغیر و ناهمگن به‌شمار می‌آید (پرز و

همکاران ۲۰۲۱). بررسی اندازه‌های ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های کوتاه‌مدت میانگین حجم رواناب ایستگاه دورود در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها، بیشتر بود. اما، در دوره‌های بلندمدت مانند ۲۰۰ سال، بیشترین حجم رواناب مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود. دلیل این یافته می‌تواند ناشی از ترکیب الگوی بارش شدید و ظرفیت زهکشی آبخیزهای نامبرده باشد و مؤید اهمیت تحلیل دقیق آب‌شناختی و مدل‌سازی جریان سطحی است (فرنا و همکاران ۲۰۲۵). از سوی دیگر، حجم رواناب نسبتاً کم و افزایش تدریجی با طول دوره برگشت، در ایستگاه زرنده نشان‌دهنده ظرفیت کمتر رخدادهای آب‌دهی سیلابی شدید در این ایستگاه است. اما این یافته به معنای بی‌نیازی این منطقه به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب نیست. زیرا، نوسانات بلندمدت و رخدادهای نادر می‌تواند اثرات پیش‌بینی نشدنی به‌همراه داشته باشند (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). بر پایهٔ نتایج جدول ۵، می‌توان گفت رابطه میان بارش و رواناب مستقیم است. به‌بیان دیگر افزایش دوره برگشت بارش منجر به افزایش حجم رواناب‌ها می‌شود. این یافته‌ها مؤید اهمیت طراحی سازه‌های مهندسی آب‌شناختی، مدیریت خطر سیل و توسعه برنامه‌های مدیریت منابع آب در مناطق با بارش متغیر و نایکنواخت است. از ترکیب تحلیل‌های میانگین بارش، دوره‌های برگشت بارش و حجم رواناب می‌توان به‌عنوان چارچوب علمی کاملی برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری آب‌دهی سیلاب به‌منظور تصمیم‌گیری‌های عملی در راستای برنامه‌ریزی شهری و کشاورزی، بهره برد.

تحلیل اندازه‌های مؤلفه‌های بارش و رواناب

بر پایهٔ نتایج شکل ۲، افزایش نسبت بارش از دوره دو ساله به پنج ساله در تمام ایستگاه‌ها حدود ۱/۲۳ بود. اما، افزایش متناظر در حجم رواناب و آب‌دهی‌ها به‌مراتب بیشتر از افزایش بارش بود. برای مثال، نسبت حجم رواناب در ایستگاه عیش‌آباد در دوره پنج ساله نسبت به دو ساله ۴/۹۰ بود. این تفاوت بیانگر آن است که پاسخ رواناب نسبت به تغییرات بارش شدید است. این رفتار نشان‌دهندهٔ اثرگذاری عامل‌هایی مانند نفوذپذیری خاک، ذخیره آب در آبخیر و شرایط اولیه خاک بر رابطه میان بارش و رواناب است که می‌تواند باعث افزایش ناخطی رواناب شود (ژو و همکاران ۲۰۲۱). دلیل نسبت بیشتر رواناب در عیش‌آباد می‌تواند ناشی از ویژگی‌های گیتاشناسی آبخیز شامل شیب زیاد، خاک کم‌ژرف با نفوذپذیری کم و تراکم زیاد زهکشی باشد که موجب کاهش فرصت نفوذ و تبدیل سریع بارش به رواناب سطحی می‌شود. از سوی دیگر، ظرفیت ذخیره‌سازی و نفوذ ایستگاه زرنده به‌دلیل شیب ملایم‌تر و خاک‌های آبرفتی ژرف و نفوذپذیر، بیشتر بود و در نتیجه رواناب کمتری داشت. ازاین‌رو، تفاوت قابل‌توجه نسبت رواناب میان دو ایستگاه نامبرده بیشتر به‌دلیل تفاوت شرایط ریخت‌سنجی و آب‌شناختی آبخیزها است. با افزایش بازه دوره برگشت، شیب افزایش بارش به‌تدریج کاهش یافت. اما، مؤلفه‌های جریان (حجم رواناب، میانگین آب‌دهی و آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای) نسبت به افزایش دوره برگشت مقاومت کمتری داشت و حتی در دوره‌های بلندتر نیز افزایش یافت. برای مثال، نسبت میانگین آب‌دهی در دوره ۲۰۰ ساله نسبت به ۱۰۰ ساله در ایستگاه عیش‌آباد حدود ۱/۱۳ بود، در حالی‌که نسبت بارش در همان دوره‌ها حدود ۱/۰۳ بود. چنین الگوهایی با نتایج پژوهش‌های پیشین در راستای تحلیل فراوانی رواناب مبنی بر اینکه بازده تبدیل بارش به جریان سطحی با طول دوره برگشت افزایش می‌یابد، هماهنگی دارد. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از رویدادهای شدید بارش باشد که ظرفیت ذخیره‌سازی آبخیر را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش در راستای رابطه میان دوره‌های برگشت بارش و دوره‌های برگشت جریان با یافته‌های دیگر پژوهش‌ها مطابقت دارد. نتایج این پژوهش‌ها مؤید آن است که دوره برگشت جریان اغلب نسبت به بارش معادل آن بیشتر است. زیرا، فرآیندهای آب‌شناختی مانند تجمع جریان، اشباع خاک و تمرکز جریان باعث رفتار غیرخطی پاسخ جریان می‌شود (ونجلیس و همکاران ۲۰۲۲).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس پویایی، رفتار و ترتیب ایستگاه‌ها متناسب با مؤلفه‌های مطالعه‌شده، متفاوت بود. از دیدگاه بارش، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، دورود و زرنده بود. از دیدگاه آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای و میانگین آب‌دهی سالانه و ناپایداری در شرایط، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، زرنده و دورود بود. از دیدگاه حجم رواناب، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، زرنده و دورود بود. در این

ایستگاه‌ها هم ترتیب و هم نسبت تغییر متفاوت بود. به‌طوری که نسبت این تغییر در حجم رواناب بیشتر از دیگر مؤلفه‌های بررسی‌شده بود. مقایسه میان ایستگاه‌ها در شکل ۲ بیانگر آن است که افزایش مؤلفه‌های رواناب و آب‌دهی در ایستگاه‌های طاغون و عیش‌آباد نسبت به افزایش دوره برگشت، بیشتر بود. در حالی‌که ایستگاه زرنده و دورود با افزایش‌های نسبتاً ملایم‌تر در همه مؤلفه‌ها، در رتبه بعدی بودند. دلیل این الگوها می‌تواند تفاوت‌های پستی‌بلندی، شیب آبخیر، نوع خاک و شبکه زهکشی طبیعی آبخیزها باشد. زیرا، نقش چنین ویژگی‌های فیزیکی در شیوهٔ تبدیل بارش به رواناب و جریان مهم است (ژو و همکاران ۲۰۲۱؛ ونجلیس و همکاران ۲۰۲۲). رابطهٔ ناخطی میان بارش و مؤلفه‌های جریان سطحی مؤید آن است که فقط استفاده از بارش به‌عنوان معیار تحلیل آب‌شناختی برای برنامه‌ریزی و طراحی سازه‌های آبی کافی نیست. به‌ویژه در دوره‌های بلندمدت برگشت که احتمال رخدادهای نادر و شدید افزایش می‌یابد، لازم است تا مؤلفه‌های جریان مانند آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای و حجم رواناب نیز بررسی شوند تا بتوان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و طراحی‌های مهندسی با خطرپذیری کمتر انجام داد. افزون بر این، افزایش نسبت میانگین آب‌دهی‌ها و بیشینه لحظه‌ای در دوره‌های بلندتر نشان داد رخدادهای نادر می‌توانند فراتر از ظرفیت طبیعی آبخیرها اثرگذار باشند و منجر به جریان‌های شدیدتر و بالقوه ویرانگر شوند. این یافته‌ها مؤید اهمیت تحلیل ترکیبی بارش، رواناب و جریان برای مدیریت سیلاب، تعیین مناطق پرخطر و طراحی زیرساخت‌های مهندسی است. استفاده از تحلیل‌های فراوانی و توزیع‌های آماری مناسب برای برآورد دوره‌های برگشت مؤلفه‌های مختلف آب‌شناختی، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات اقلیمی و افزایش ناپایداری در الگوهای بارش، از ضروریت‌های مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری سیلاب است. بر پایهٔ نتایج شکل ۲ می‌توان گفت رابطهٔ میان مؤلفه‌های بارش و پاسخ آب‌شناختی سطحی، پیچیده و وابسته به ویژگی‌های آبخیر است. با تحلیل دقیق و یکپارچه این مؤلفه‌ها، همراه با مدل‌سازی فرکانس بارش و جریان، می‌توان چارچوب علمی برای برنامه‌ریزی، مدیریت خطرپذیری و طراحی سازه‌های آبی در مقیاس‌های منطقه‌ای فراهم آورد.

نتایج این پژوهش نشان داد در دوره‌های برگشت بارش و رواناب، الگوی رفتاری چهار ایستگاه آبخیز نیشابور (عیش‌آباد، زرنده، طاغون و دورود) هم‌زمان و هماهنگ نبود. این تفاوت‌ها با افزایش دوره برگشت افزایش یافت. تحلیل اندازه‌های متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت نشان داد که اگرچه روند بارش با افزایش دوره برگشت روند افزایشی یکنواخت و تدریجی بود، اما رفتار پاسخ رواناب افزایش غیرخطی بود، به‌ویژه در دوره‌های برگشت متوسط تا بلندمدت که افزایش رواناب از افزایش بارش نیز بیشتر بود. افزون بر این، فرآیند تبدیل بارش به رواناب در آبخیز مطالعه‌شده تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی، آستانه‌ای و پویایی درون‌آبخیزی است. رفتار ناخطی مشاهده‌شده در پاسخ رواناب بیانگر آن است که رواناب برخلاف بارش به شرایط اولیه سامانه آب‌شناختی وابسته است. هنگامی که بارش از یک آستانه مشخص بیشتر شود، می‌تواند منجر به تغییر ساز و کار تولید رواناب شده و به‌طور هم‌زمان سبب شروع فرآیندهایی مانند اشباع خاک، جریان‌های ترجیحی و افزایش سهم رواناب سطحی شود. این نوع پاسخ آستانه‌ای که در این پژوهش در دوره‌های برگشت بلندمدت به‌خوبی مشاهده شد با نتایج پژوهش مرز و بلوشل (۲۰۱۵) که تغییر ساز و کارهای تولید رواناب در رخدادهای حدی را بررسی کرده‌اند، مطابقت دارد. افزون بر این، با افزایش ناهم‌خوانی میان دوره‌های برگشت بارش و رواناب در اندازه‌های بزرگ‌تر دوره برگشت می‌تواند بازتابی از محدود شدن ظرفیت طبیعی آبخیر در برابر رخدادهای شدید باشد. در شرایط بارش‌های معمول بخش بیشتر بارش با نفوذ و ذخیره در خاک تعدیل می‌شود، اما با افزایش شدت و تداوم بارش، این ظرفیت به‌سرعت اشباع شده و وضعیت آبخیر به گونه‌ای تغییر می‌کند که حتی افزایش ناچیزی در بارش می‌تواند منجر به افزایش در رواناب شود. این رفتار به‌طور گسترده در پژوهش‌های پیشین در آبخیرهای خشک و نیمه‌خشک بررسی‌شده است (فاولر و همکاران ۲۰۲۱). نتایج این پژوهش مؤید آن است که فقط با استفاده از دوره‌های برگشت بارش نمی‌توان پاسخ قابل قبولی برای برآورد خطر رواناب و سیلاب در آبخیر، به‌ویژه

در دوره‌های برگشت بلندمدت که رفتار رواناب ناخطی است، ارائه داد.

استفاده از یک اندازه ثابت بارش طراحی برای کل آبخیز نیشابور، به‌ویژه در دوره‌های برگشت بلندمدت می‌تواند منجر به نادرستی برآورد خطرات آب‌شناختی شود. به‌کارگیری یک بارش یکنواخت در مقیاس آبخیز، هنگامی که تحلیل‌ها به دوره‌های برگشت حدی تعمیم‌داده می‌شوند، سبب کم‌برآورد یا بیش‌برآورد آب‌دهی اوج و حجم رواناب می‌شود (رحمان و همکاران ۲۰۱۹). در مقایسه با بارش، نوسان رفتار رواناب بیشتر است. این تفاوت را می‌توان ناشی از ماهیت ناخطی فرآیندهای تبدیل بارش به رواناب دانست که احتمالاً تحت تأثیر عامل‌های پرشماری مانند رطوبت اولیه خاک، ویژگی‌های فیزیکی خاک، پستی‌بلندی، پوشش زمین و شبکه زهکشی است (بلوشل و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نشان داد نسبت‌های افزایش رواناب میان دوره‌های برگشت متوالی در بیشتر ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از نسبت‌های متناظر بارش بود. به‌بیان دیگر، افزایش‌ها در شدت یا اندازه بارش‌های حدی می‌توانند منجر به افزایش‌های بزرگ‌تری در رواناب شوند. این رفتار در پژوهش‌های پیشین نیز بررسی‌شده است و به‌عنوان یکی از ویژگی‌های بارز پاسخ آب‌شناختی آبخیزها در مواجهه با رخدادهای حدی شناخته‌شده است (شارما و همکاران ۲۰۱۸). افزایش تفاوت میان اندازه‌های بارش و رواناب در دوره‌های برگشت بلندمدت مانند ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله را می‌توان در چارچوب نظریه رفتارهای آستانه‌ای سامانه‌های آب‌شناختی تفسیر کرد. بر اساس این نظریه هنگامی‌که سامانه از آستانه‌هایی مانند اشباع کامل خاک یا گسترش رواناب سطحی عبور می‌کند، پاسخ آن به ورودی‌ها به‌شدت ناخطی و جهشی است. تفاوت قابل‌توجه پاسخ رواناب میان ایستگاه‌ها نشان داد عامل‌های محلی و ساختاری، مانند شیب، نفوذپذیری خاک در آبخیز نیشابور، افزایش تدریجی بارش‌های حدی می‌تواند در مقاطعی به افزایش نامتناسب رواناب منجر شود، به‌ویژه زمانی که ظرفیت نفوذ خاک کاهش یافته یا شبکه زهکشی نقش مؤثرتری در انتقال جریان دارد. این یافته با نتایج پژوهش ون‌هامل و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است.

تغییر در متغیرهای آب‌اقلیمی همیشه یکی از مهم‌ترین چالش‌های بشر در مواجه با پدیده‌های اقلیمی و آب‌شناختی در مدیریت آبخیزها است. بر این اساس، پیش‌بینی این متغیرها در دوره‌های گوناگون برگشت می‌تواند نقش مؤثری بر مدیریت منابع آب داشته باشد. بر پایهٔ نتایج این پژوهش، نسبت افزایش اندازه‌های بارش و رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت یکسان نیست و این تفاوت با افزایش دوره برگشت شدت یافت. با تحلیل همزمان داده‌های آب‌اقلیمی با رسوب‌سنجی می‌توان به درک بهتری از رفتار آبخیزها رسید. محدودیت داده‌ها که در بسیاری از پژوهش‌های آب‌شناسی و رسوب گزارش‌شده است که می‌تواند موجب افزایش نبودن قطعیت در ارزیابی جامع خطرات سیلاب شود. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در دیگر پژوهش‌ها از داده‌های کامل و پیوسته، برای تحلیل دوره برگشت رسوب استفاده شود. افزون بر این، بر پایه نتایج این پژوهش به‌کارگیری مدل‌های آماری و ابزارهای تخصصی مانند Hyfran-Plus که امکان تحلیل فراوانی، برازش توزیع‌های آماری و برآورد نبودن قطعیت را فراهم می‌آورند، پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد می‌شود مدیران منابع آب به رخداد بارش‌ها با افزایش دوره برگشت، توجه ویژه داشته باشند، زیرا این رخدادها افزون بر خسارت‌های اقتصادی و جانی، منجر به خروج سریع آب از منطقه و کاهش فرصت نفوذ می‌شوند. این موضوع در بلندمدت به افزایش کم‌آبی و کاهش منابع آب زیرزمینی منجر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه‌شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، نظارت بر پژوهش، ویرایش نوشتار و نهایی کردن پژوهش

نویسندگان دوم تا ششم: جمع‌آوری داده‌ها، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ هفتم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی اولیه نوشتار، بازبینی نتایج و انجام اصلاحات

فهرست منابع

Afsharipour Z. Abdolhosseini, M. Bahremand A. 2018. Evaluation of the hydrological design of a dam spillway using bivariate return periods based on copula functions (Case study: Golestan 2 Dam, Golestan Province). Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering. 8(3): 78-93. (In Persian). https://www.magiran.com/p1858511

Bales RC, Goulden ML, Hunsaker CT, Conklin MH, Hartsough PC, O'Geen AT, Safeeq M. 2018. Mechanisms controlling the impact of multi-year drought on mountain hydrology. Scientific Reports. 8(1): 690. https://doi.org/10.1038/s41598-017-19007-0

Bazrafshan O, Pakdaman Z, Jamshidi S, Jalalifard A. 2025. Three-dimensional uncertainty analysis of sediment dynamics: Exploring suspended sediment concentration, flood discharge, and sediment yield. Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C, 104033. https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104033

Blöschl G, Gaál L, Hall J, Kiss A, Komma J, Nester T, Viglione A. 2015. Increasing river floods: Fiction or reality? WIREs Water. 2: 329–344. https://doi.org/10.1002/wat2.1079

Blöschl G, Hall J, Viglione A, Perdigão RA, Parajka J, Merz B, Živković N. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature. 573(7772): 108-111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6

Calizaya E, Aráoz J, Sardón S, Calizaya F, Laqui W. 2025. Modeling surface runoff under climate change scenarios: An integrated SCS-CN and GIS techniques in a High Andean Basin of Puno, Peru. International Journal of Geoinformatics. 21(3): 1-17. https://doi.org/10.52939/ijg.v21i3.3987

Chamani R, Mostafazadeh R, Kalehhouei M, Haji K. 2023. Determining spatial correlation and pattern of changes in elevation and runoff volume in the sub-watersheds of Sharqanj region of Birjand. Quantitative Geomorphology Research. 12(3): 201-219. (In Persian). https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.408752.1448

Deb P, Malakar P, Bora PK, Dubey SK. 2025. Univariate versus multivariate flood frequency analysis in tropical region: Employing two classes of hydrological models. CLEAN–Soil, Air, Water. 53(1): 2300351. https://doi.org/10.1002/clen.202300351

Ebadifar M, Hosseini-Abri A, Ebadifar A, Abadizadeh M. 2020. Estimation of design flood discharge for studies on the regulation of the Sorkheh-e-Hesar River (Vali-Asr Town area, Ray City). Scientific Journal of Water Sciences and Engineering. Islamic Azad University, Ahvaz Branch. 10(28): 7-19. (In Persian). https://sanad.iau.ir/ar/Journal/wsej/Article/921939

Fagundes HO, Maciel DA, Fassoni-Andrade AC, Silva VA, Rossoni R, Cavalcanti JRA, Fan FM. 2025. Simulating suspended sediment transport during the 2023-2024 floods in southern Brazil. International Soil and Water Conservation Research. 24: 100599. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.11.007

Farran MM, Masoud M, Elfeki AM. 2025. Frequency analysis of maximum daily rainfall for flood risk management in Jazan Province Kingdom of Saudi Arabia: Excel-based model. Journal of King Abdulaziz University: Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Sciences. 34(1). https://doi.org/10.4197/Met.34-1.5

Farzana SZ, Paudyal DR, Chadalavada S, Alam MJ. 2024. Spatiotemporal variability analysis of rainfall and water quality: Insights from trend analysis and wavelet coherence approach. Geosciences. 14(8): 225. https://doi.org/10.3390/geosciences14080225

Fowler HJ, Lenderink G, Prein AF, Westra S, Allan RP, Ban N, Zhang X. 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. Nature Reviews Earth and Environment. 2(2): 107-122. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6

Franzen SE, Farahani MA, Goodwell AE. 2020. Information flows: Characterizing precipitation-streamflow dependencies in the Colorado headwaters with an information theory approach. Water Resources Research. 56(10): e2019WR026133. https://doi.org/10.1029/2019WR026133

Gao Y, Taie Semiromi M, Merz C. 2023. Efficacy of statistical algorithms in imputing missing data of streamflow discharge imparted with variegated variances and seasonalities. Environmental Earth Sciences. 82(20): 476. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11139-z

Guduru JU, Mohammed AS. 2024. Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. Environmental Challenges. 17: 101017. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017

Jaberzadeh M, Saremi A, Ghorbanizadeh Kharazi H, Babazadeh H. 2024. SWAT and IHACRES models for the simulation of rainfall-runoff of Dez watershed. Climate Dynamics. 62(4): 2823-2835. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06215-2

Lin Z, Wang Q, Xu Y, Luo S, Zhou C, Yu Z, Xu CY. 2024. Soil moisture dynamics and associated rainfall-runoff processes under different land uses and land covers in a humid mountainous watershed. Journal of Hydrology. 636: 131249. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131249

Meena M. 2020. Rainfall statistical trend and variability detection using Mann-Kendall test, Sen's slope and coefficient of variance—A case study of Udaipur district (1957–2016). Applied Ecology and Environmental Sciences. 8(1): 34-37. https://doi.org/10.12691/aees-8-1-5

Merz B, Vorogushyn S, Uhlemann S, Delgado J, Hundecha Y. 2012. HESS Opinions" More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". Hydrology and Earth System Sciences. 16(5): 1379-1387. https://doi.org/10.5194/hess-16-1379-2012

Merz R, Blöschl G. 2003. A process typology of regional floods. Water Resources Research. 39(12). https://doi.org/10.1029/2002WR001952

Montanari A, Young G, Savenije HH, Hughes D, Wagener T, Ren LL, Belyaev V. 2013. Panta Rhei everything flows: Change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. Hydrological Sciences Journal. 58(6): 1256-1275.
http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.809088

Mphefu T, Nkhonjera G, Alowo R. 2025. Evaluation of the probability density function of unpredictable flood events in the Mngeni River Basin, South Africa. Journal of Water and Climate Change. 16(5): 1695-1714. https://doi.org/10.2166/wcc.2025.566

Nasiri Khiavi A, Vafakhah M, Sadeghi SHR. 2023. Flood-based critical sub-watershed mapping: Comparative application of multi-criteriadecision making methods and hydrological modeling approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 37(7): 2757-2775. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1711435/v1

Parmesan C, Morecroft MD, Trisurat Y. 2022. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (Doctoral Dissertation, GIEC). https://doi.org/10.1017/9781009325844

Pérez RE, Cortés-Molina M, Navarro-González FJ. 2021. Analysis of rainfall time series with application to calculation of return periods. Sustainability. 13(14): 8051. https://doi.org/10.3390/su13148051

Rahayu D, Rizal R, Chumaedi I. 2025. Utilization of HEC DSS and HEC SSP software for rainfall frequency analysis in drainage system design for City's Industrial Area. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan. 10(1): 179-192. https://doi.org/10.29244/jsil.10.1.179-192

Rahman MM, Harada D, Egashira S. 2024. Sediment transport processes in the Sangu River basin using a rainfall-sediment runoff model for sustainable river management. Proceedings of International Association of Hydrological Scientists. 386: 109-114. https://doi.org/10.5194/piahs-386-109-2024

Rahman M, Ningsheng C, Islam MM, Dewan A, Iqbal J, Washakh RMA, Shufeng T. 2019. Flood susceptibility assessment in Bangladesh using machine learning and multi-criteria decision analysis. Earth Systems and Environment. 3(3): 585-601. https://doi.org/10.1007/S41748-019-00123-Y

Ramzan MA, Alias NE, Yusop Z, Sai'di Z. 2025. Flood simulation for the Johor River Basin, Malaysia using the HEC-HMS model: Assessing impacts of climate change under SSP scenarios. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1505(1): p. 012017. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/17551315/1505/1/012017

Ruff F, Pfahl S. 2024. Global estimates of 100-year return values of daily precipitation from ensemble weather prediction data. Natural Hazards and Earth System Sciences. 24(9): 2939-2952. https://doi.org/10.5194/nhess-24-2939-2024

Saadatpour A, Alizadeh A, Ziaei AN, Izadi AA. 2019. Estimation and comparison of blue and green water using SWAT and SWAT-MODFLOW models in the Neishabour Watershed. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 13(4): 1113-1129. (In Persian).
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.4.21.3

Sarigil G, Cavus Y, Aksoy H, Eris E. 2024. Frequency curves of high and low flows in intermittent river basins for hydrological analysis and hydraulic design. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 38(8): 3079-3092. https://doi.org/10.1007/s00477-024-02732-0

Shah AI, Pan ND. 2024. Evaluation of probability distribution methods for flood frequency analysis in the Jhelum Basin of North-Western Himalayas, India. Cleaner Water. 2: 100044.
https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100044

Sharma A, Wasko C, Lettenmaier DP. 2018. If precipitation extremes are increasing, why aren't floods? Water Resources Research. 54(11): 8545-8551. https://doi.org/10.1029/2018WR023749

Syamsuddin GH, Pallu MS, Maricar F, Bakri B. 2025. Analysis of the seasonal change on the sediment transport in the primary channel of saddang irrigation area. Engineering, Technology and Applied Science Research. 15(1): 20138-20143. https://doi.org/10.48084/etasr.9575

Tian F, Wescoat Jr JL, Loucks DP, Montanari A, Mukherji A, Di Baldassarre G, Zwarteveen M. 2026. Panta Rhei: Coevolutionary change in hydrology and society. In Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems. pp. 1-22. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-41736-8.00008-7

Vafakhah M, Moghadamnia A. 2019. Flood Control. Tarbiat Modares University. 395 p.

Van Hamel A, Molnar P, Janzing J, Brunner MI, 2025. Suspended sediment concentrations in Alpine rivers: From annual regimes to sub-daily extreme

events. Hydrology and Earth System Sciences. 29(13): 2975-2995. https://doi.org/10.5194/hess-29-2975-2025

Vangelis H, Zotou I, Kourtis IM, Bellos V, Tsihrintzis VA. 2022. Relationship of rainfall and flood return periods through hydrologic and hydraulic modeling. Water. 14(22): 3618. https://doi.org/10.3390/w14223618

Wang Q, Yang J, Heidbüchel I, Xu T, Lu C. 2025. The effect of rainfall variability on Nitrogen dynamics in a small agricultural catchment. Hydrology and Earth System Sciences. 29(21): 6093-6113. https://doi.org/10.5194/hess-29-6093-2025

Xu K, Milliman JD, Xu H. 2010. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese Rivers since 1951. Global and Planetary Change. 73(3-4): 219-232. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.07.002

Zarrin A, Dadashi Roudbari A. 2022. Investigating precipitation return period and its probability of occurrence in Iran based on multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP). Journal of Geography and Environmental Hazards. 10(4): 209-227. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71102.1079

Zehe E, Sivapalan M. 2009. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geo-ecosystems: Manifestations, controls, implications. Hydrology and Earth System Sciences. 13(7): 1273-1297. https://doi.org/10.5194/hess-13-1273-2009

Zhang Y, Feng X, Wang X, Fu B. 2018. Characterizing drought in terms of changes in the precipitation–runoff relationship: A case study of the Loess Plateau, China. Hydrology and Earth System Sciences. 22(3): 1749-1766. https://doi.org/10.5194/hess-22-1749-2018

Zhou Z, Smith JA, Baeck ML, Wright DB, Smith BK, Liu S. 2021. The impact of spatiotemporal structure of rainfall on flood frequency over a small urban watershed: An approach coupling stochastic storm transposition and hydrologic modeling. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 2021: 1-25. https://doi.org/10.5194/hess-25-4701-2021

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Hydrological Behavior Simulation of the Neyshabur Watershed in Iran during Different Rainfall and Runoff Return Periods

Seyed Hamidreza Sadeghi[1*], Nastaran Naderi Marangalo[2], Sahar Mostafaei Yunjali[3], Asma Badameh[4], Zeinab Sheikhi[5], Ali Nori[6], and Sudabeh Gharemahmudli[7]

1- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2, 3, 4, 5 and 6 - Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

7- Postdoctoral Fellow, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Investigating the response behavior of hydrological systems to inputs such as precipitation, particularly runoff analysis under different return periods is one of the primary objectives of hydrological research. The analysis of the return periods of hydrological components, including precipitation and runoff, has a long history. However, less attention has been paid to the comparative and simultaneous assessment of these components and to the analysis of their asynchronous behavior under different return periods. On the other hand, the complex and nonlinear relationships between precipitation and runoff, as well as the observed differences among stations, are attributed to the local conditions governing each sub-watershed. In this regard, the simultaneous assessment of these components can offer a more accurate understanding of the watershed's hydrological response, especially during extreme events conditions. Therefore, in this study, precipitation and runoff magnitudes were simultaneously investigated under different return periods in the Neyshabur Watershed in Khorasan Razavi, Iran.

Materials and Methods

Data on annual precipitation and runoff for the period from 1991 to 2021 were collected from four hydrometric stations, which represented different hydrological conditions within the watershed. Using statistical methods, precipitation and discharge data were verified in terms of quality, and missing values or data inconsistent with hydrological trends were corrected or replaced using linear regression and correlation analysis with neighboring stations. After data correction, daily precipitation and discharge values were converted into annual precipitation and discharge values. This process enabled long-term analysis and the assessment of the asynchronous behavior of the components.

Article Type: Research Article
***Corresponding Author E-mail:** sadeghi@modares.ac.ir
Citation: Sadeghi, S.H.R., Naderi Marangalo, N., Mostafaei Yunjali, S., Badameh, A., Sheikhi, Z., Nori, A., Gharemahmudli, S. 2026. Hydrological Behavior Simulation of the Neyshabur Watershed during Different Rainfall and Runoff Return Periods. Watershed Management Research. 39(3):123-142.
DOI: 10.22092/WMRJ.2026.372273.1660
Received: 12 February 2026, **Received in revised form:** 16 March 2026, **Accepted:** 21 June 2026, **Published online:** 23 September 2026
Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 123-142.
Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center
©Author(s)

The corresponding precipitation and runoff magnitudes for return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years were estimated using the Hyfran-Plus software. In this analysis, among various statistical distributions, the Weibull distributions for precipitation data and the Gumbel distributions for discharge data were selected as the best-fit distributions for the studied datasets, based on the recommendation of the decision support system and using Akaike and Bayes information criteria.

Results and Discussion

The results show that the rainfall magnitudes for return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years were 290.26, 357.25, 391.87, 418.47, 447.40, 465.67, and 482.54 mm, respectively. Across different sub-watersheds, the return periods of precipitation and runoff were not consistent, and with increasing precipitation return periods, the instantaneous peak discharge, mean annual discharge, and runoff volume increased significantly at all stations, but with different rates of change. In short-term periods of 5 to 2 years, the amounts of precipitation, maximum instantaneous discharge, mean annual discharge, and runoff volume recorded at Eishabad station are 1.23, 2.06, 2.39, and 4.91 respectively; at Taghoun station, 1.23, 2.00, 2.22, and 4.00 respectively; at Dorud station, 1.23, 1.90, 2.16, and 4.13 respectively; and at Zarandeh station, 1.24, 1.87, 2.09, and 2.78 respectively. While the aforementioned ratio in long-term periods of 200 to 100 years, the precipitation amounts, maximum instantaneous discharge, average annual discharge, and runoff volume were obtained at Eishabad station 1.04, 1.13, 1.14, and 1.28; at Taghoun station 1.04, 1.13, 1.13, and 1.28; at Dorud station 1.03, 1.13, 1.13, and 1.46; and at Zarandeh station 1.04, 1.13, 131, and 1.28 respectively. These differences are likely due to local watershed characteristics.

Conclusion and Suggestions

The findings of this study confirmed that the use of simultaneous and multivariate approaches in precipitation and runoff return period analysis is crucial for designing flood and sediment control structures, predicting hydrological events, and managing water and soil resources sustainably in semi-arid plains. The results show that the relationship between precipitation and runoff across different return periods is nonlinear and amplified, emphasizing the importance of considering these components together in flood risk assessment and water infrastructure planning. Additionally, the significant spatial differences in the hydrological response of sub-watersheds indicate the importance of developing management strategies based on the specific conditions of each watershed. Given the high susceptibility of semi-arid watersheds to climate change, the uncertainty in predictions can be reduced by combining long-term hydroclimatic data with advanced statistical models. Finally, expanding such studies to other similar watersheds, as well as incorporating the sediment component in future analyses, is an effective step towards comprehensive and resilient management of water and soil resources. Based on the results of this study, it is suggested that future research focus on developing integrated hydrological models that dynamically link climate projections with land-use change scenarios. With such models and analyses, the ability of experts to comprehensively manage water and soil resources, reduce flood risks, and plan land-use in a manner that is consistent and based on the conditions of each watershed will increase. Furthermore, it is recommended to promote collaboration among hydrologists, climatologists, and land-use planners to translate these scientific insights into appropriate and region-specific engineering policies and standards, in order to improve ecosystem services and community resilience in vulnerable semi-arid regions.

Keywords: Annual precipitation, annual runoff volume, maximum instantaneous discharge, mean annual discharge, return period, Runoff

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest
The authors of this article declare that they have no conflicts of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement
All information and results are provided in the text of the article.

Authors' Contribution
Author 1: Responsible for ideation, research conceptualization, research methodology, supervision of different research parts, and final editing of the article
Authors 2 to 6: Data collection, software/statistical analysis, writing the first draft of the article
Author 7: Assisting in conducting research in different stages, writing the draft of the article, and revising the initial draft

نام‌های داورانی که در این شماره با نشریه همکاری کردند:
(به‌ترتیب حروف الفبا)

احدیان، جواد
چوبین، بهرام
حزباوی، زینب
حسینعلی‌زاده، محسن
حقی‌آبی، امیرحمزه
خسروی، حسن
خلیلی، داور
دسترنج، علی
دستورانی، محمدتقی
رستمی‌زاد، قباد
زارع، محمد
سلیمان‌پور، سید مسعود
صوفی، مجید
عرفانی‌فرد، سید یوسف
فتح‌آبادی، ابوالحسن
کاویان، عطاالله
کله‌هویی، مهین
مصطفی‌زاده، رئوف
نوروزی، علی‌اکبر

پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

شیوه‌نامهٔ نگارش مقاله برای نشریهٔ علمی پژوهش‌های آبخیزداری

عنوان مقاله (حداکثر ۲۰ کلمه با قلم بی- نازنین ۱۵ پررنگ و کلمات انگلیسی احتمالی در عنوان، با قلم Times New Roman 14 Bold)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول*[۱]، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم[۲]، ... (بی- نازنین ۱۱ پررنگ)

۱- مرتبهٔ علمی نگارنده اول، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی- نازنین ۱۱)

۲- مرتبهٔ علمی نگارنده دوم، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی- نازنین ۱۱)

نکتهٔ مهم: در مورد جایگاه (ترتیب) نویسندگان و همچنین سمت سازمانی نویسنده‌ها آن است که جایگاه و عنوان‌های نوشته شده در مقاله با جایگاه و عنوان‌هایی که نویسندهٔ مسئول در تارنمای نشریه هنگام ثبت‌نام درج می‌کند، باید دقیقاً یکسان باشند.

درج کُد اُرکید همهٔ نویسندگان که در تارنمای نشریه در هنگام ارسال مقاله دریافت شده است در دایره سبز رنگ کنار نام نویسندگان، الزامی است.(روش وارد کردن کد ارکید: روی دایره نماد کد ارکید (دایره سبز رنگ) کلیک سمت راست کنید از کادر باز شده گزینه ..Edit Hyperlink را انتخاب کرده و مجددا در کادر باز شده در بخش :Addressکد ارکید را برای هر نویسنده به جای اعداد صفر بنویسید و سپس گزینه ok را انتخاب کنید. در بخش انگلیسی هم این کد را در کنار نام هر نویسنده باید نوشته شود).

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

چکیدهٔ مبسوط باید به روشنی ارائه‌گر محتویات مقاله، بدون استفاده از علائم اختصاری، شکل، جدول و پاورقی بوده و به‌تفکیک دارای ساختاری به‌صورت مقدمه و هدف، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها و واژگان کلیدی باشد. تعداد کلمه‌ها در چکیدهٔ مبسوط بدون احتساب عنوان مقاله و واژه‌های کلیدی، بایستی دارای کمینهٔ ۶۰۰ و بیشینهٔ ۹۰۰ کلمه باشد. برای فونت قسمت چکیدهٔ مبسوط، کلمات فارسی با قلم بی- نازنین ۱۲ و کلمات انگلیسی با قلم Times New Roman 11 استفاده شود. تعداد کلمات در هر قسمت از چکیدهٔ مبسوط، حتی‌المقدور، بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ کلمه باشد.

نوع مقاله: پژوهشی

***مسئول مکاتبات**، نشانی الکترونیکی نویسندهٔ مسئول (قلم Times New Roman 11)

استناد: نام‌خانوادگی نویسندهٔ اول، حرف اول نام نویسندهٔ اول.، نام‌خانوادگی نویسندهٔ دوم، حرف اول نام نویسندهٔ دوم.، .... سال انتشار به عدد. عنوان کامل مقاله. پژوهش‌های آبخیزداری، ؟(؟): ؟؟-؟؟.

شناسهٔ دیجیتال: (قلم Times New Roman 11)

تاریخ دریافت: ؟؟/؟؟/؟؟؟؟، **تاریخ بازنگری**: ؟؟/؟؟/؟؟؟؟، **تاریخ پذیرش**: ؟؟/؟؟/؟؟؟؟، **تاریخ انتشار**: ؟؟/؟؟/؟؟؟؟

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ؟؟؟؟، دورهٔ ؟؟، شمارهٔ ؟، شمارهٔ پیاپی ؟؟؟، نام فصل، سال انتشار، صفحه‌های ؟؟ تا ؟؟.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان
CC BY

مواد و روش‌ها

مواد و روش‌ها، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

نتایج و بحث

نتایج و بحث، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری و پیشنهادها در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه)

واژگان کلیدی

به‌ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی، با کمینهٔ ۴ و بیشینهٔ ۶ کلمه، در انتهای چکیدهٔ مبسوط آورده شود. (قلم بی-نازنین ۱۱ پررنگ)

مقدمه (قلم بی- نازنین ۱۲ پررنگ)

در این الگوی تهیه شده، نمونه روش تهیهٔ مقاله برای برای «مجلهٔ علمی پژوهش‌های آبخیزداری» آمده است و قسمت‌ها و بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازهٔ آن‌ها که در تهیهٔ یک مقاله به‌کار می‌روند شرح داده شده است. برای سهولت کار، کلیهٔ شیوه‌های مورد نیاز برای بخش‌های مختلف، از پیش تعریف شده و تنها کافی است که نویسنده، مقالهٔ خود را با این شیوه‌نامه تطبیق و متن خود را در آن قرار دهد.

بخش‌های اصلی مقالهٔ ارسالی به این نشریه بایستی به‌ترتیب دارای: عنوان فارسی، چکیدهٔ مبسوط فارسی، واژه‌گان کلیدی فارسی، مقدمه، مواد و روش‌ها (منطقهٔ مطالعه‌شده و روش پژوهش)، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها، سپاس‌گزاری (اختیاری)، تضاد منافع نویسندگان، دسترسی به داده‌ها، مشارکت نویسندگان، منابع، عنوان انگلیسی، چکیدهٔ مبسوط انگلیسی و واژگان کلیدی انگلیسی باشد.

مقاله با استفاده از نرم‌افزار MS Word 2010 نسخهٔ ۲۰۱۰ یا بالاتر در فرمت DOCX و بیشینهٔ ۱۴ صفحه تهیه شود.

متن مقاله باید در صفحات A4 با قلم نازنین ۱۲ معمولی برای کلمات فارسی و قلم Times New Roman 11 برای کلمات انگلیسی تایپ شود. بایستی فاصلهٔ متن از بالا در صفحهٔ اول و صفحهٔ عنوان انگلیسی ۵۰ میلی‌متر و در سایر صفحات ۳۰ میلی‌متر باشد. در کلیه صفحات فاصله از پایین ۳۰ میلی‌متر و از چپ و راست نیز ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. متن مقاله به‌صورت دو ستونی با فاصلهٔ ۸ میلی‌متر بین دو ستون تایپ شود. فاصلهٔ سطرها باید تک فاصله‌ای (Single) باشد. هیچ پاراگرافی، نیاز به تورفتگی ندارد. عنوان‌های هر بخش از ابتدای ستون و بدون رها نمودن فاصله تایپ شود. عنوان فارسی هر بخش باید با قلم بی-نازنین پررنگ ۱۲ و عنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 11 به‌صورت Bold تایپ شود. عنوان‌های فرعی فارسی با قلم بی-نازنین پررنگ ۱۱ و زیرعنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 10 به صورت Bold نوشته شوند. در این نشریه از عدد و شماره‌گذاری، برای مشخص کردن ترتیب عنوان‌ها استفاده نمی‌شود.

تا حد امکان، از به‌کار بردن کلمات انگلیسی در متن مقاله اجتناب شود و معادل فارسی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

برای کلماتی که جدا شدن بخش‌های آن‌ها نیاز به یک فاصلهٔ کامل ندارد، از نیم‌فاصله استفاده شود.

در عنوان مقاله و تمام بخش‌های مقاله، به جای استفاده از واژهٔ "حوزهٔ آبخیز" یا "حوزهٔ آبریز" و موارد مشابه، از واژهٔ فارسی "آبخیز" استفاده شود. همچنین به‌جای استفاده از "ی" در انتهای کلماتی که به "ه" ختم می‌شود از "ء" استفاده شود. مانند: (نادرست: منطقه‌ی. درست: منطقهٔ).

مطالب مربوط به واژه‌نامه، توضیحات جانبی مختصر، معادل لاتین اسامی و اصطلاحات و بیان کامل واژه‌های مخفف بایستی به‌صورت

زیرنویس[1] و شماره‌دار و به‌صورت شماره‌گذاری پیوسته در پاورقی آورده شوند. در پاورقی، بایستی حروف فارسی با قلم بی- نازنین ۱۰ و حروف لاتین با قلم Times New Roman 9 تایپ شوند.

شیوه (Style) های مورد نیاز برای کلیه قسمت‌های مقاله، در این مقاله تعریف شده‌اند و مؤلفان می‌توانند پس از انتقال محتوای آن به این فایل با استفاده از Styles در منوی Home به‌سرعت فایل مقاله خود را با شیوهٔ مورد نظر تطبیق دهند. این کار با استفاده از ابزارهای Past | Copy و Format Painter نیز در این مقاله به سادگی انجام‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

موقعیت جغرافیایی و دیگر مطالب برای معرفی منطقهٔ پژوهش در این بخش آورده می‌شود. ارائه نقشه، در قالب موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مطالعه‌شده، در این بخش، توصیه می‌شود.

روش پژوهش

در این قسمت، روش پژوهش، به‌صورت دقیق و روشن، آورده می‌شود.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش، با تأکید بر یافته‌های جدید، همراه با بحث‌های مرتبط، آورده می‌شوند. در این قسمت از جدول‌ها، شکل‌ها، نمودارها نیز استفاده و بحث در مورد آن‌ها انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری دربارهٔ نتایج به‌دست آمده و تفسیر و جمع‌بندی یافته‌ها با تأکید بر مقایسه با پژوهش‌های مشابه، و تحلیل علمی نتایج به‌دست آمده و دادن پیشنهادهای کاربردی، در این قسمت آورده می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسنده (نویسندگان) می‌توانند (در صورت تمایل) در این قسمت از سازمان‌ها، دانشگاه‌ها، و یا افرادی که در انجام این پژوهش او (ایشان) را یاری کرده‌اند سپاسگزاری و قدردانی کنند.

(وجود این بخش، اختیاری است).

تضاد منافع نویسندگان

در صورتی که تضاد منافع در خصوص مقاله وجود دارد در این بخش قید شود، در غیر این‌صورت، عبارت زیر درج شود:

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

(وجود این بخش، الزامی است).

دسترسی به داده‌ها

در این بخش، شیوهٔ دسترسی به داده‌ها و کُدهای استفاده شده، و یا نقشه‌ها و نتایج تولید شده در پژوهش ذکر می‌شود. اگر داده‌ها و اطلاعات در متن مقاله ارائه شده است، ذکر شود که همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه‌شده است. اگر غیر از این، موارد اطلاعاتی قابل ارائه است؛ عبارت زیر درج شود: داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

(وجود این بخش، الزامی است).

مشارکت نویسندگان

در این بخش شیوهٔ مشارکت نویسندگان در انجام پژوهش ارائه می‌شود. برای درج این بخش، از شیوهٔ زیر به‌عنوان نمونه می‌توان استفاده کرد. شایان ذکر است می‌توان بخش‌هایی از انجام کار، برای افراد مشارکت‌کننده در مقاله مشترک باشد.

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

1-Footnote

نویسندهٔ سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

(وجود این بخش، الزامی است).

روابط ریاضی

روابط باید به ترتیب و در جدولی مشابه جدول زیر از ابتدا تا انتها شماره‌گذاری شوند.

$$(x+a)^n = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} x^k a^{n-k} \qquad (۱)$$

شماره معادلات باید در انتهای سمت راست هر ستون و در امتداد خط حاوی معادلات و در پرانتز قید گردد. توضیحات تمام متغیرها، سنجه‌ها و نمادهای جدید در روابط، چنانچه پیش از آن توضیح داده نشده‌اند، باید بدون فاصله بعد از رابطه بیان شوند. نکته دیگر اینکه از درج فرمول به فرمت تصویر اجتناب شود و از روابط فرمول نویسی در نگارش آنها استفاده کنید تا افت کیفت در نسخه نهایی نداشته باشیم.

سیستم واحدها

سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین‌المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری، باید معادل آن در سیستم آحاد دیگر در داخل پرانتز به‌کار رود.

توضیحات در مورد جدول‌ها و شکل‌ها و نمودارها

جدول‌ها و شکل‌ها باید به‌ترتیبی که در متن به آن‌ها اشاره شده است شماره‌گذاری و جا داده شوند. عنوان جدول‌ها در بالای آن‌ها، و عنوان شکل‌ها در زیر آن‌ها به دو زبان فارسی و انگلیسی وسط‌چین نوشته شود. عنوان انگلیسی در زیر عنوان فارسی قرار گیرد. همهٔ نوشتار روی شکل‌ها، نمودارها و داخل جدول‌ها باید به انگلیسی باشد. قلم فارسی عنوان جدول‌ها و شکل‌ها بی- نازنین پررنگ[2] ۱۱ و قلم انگلیسی آن‌ها Times New Roman 10 Bold انتخاب شده و قلم انگلیسی همهٔ نوشتار روی شکل‌ها، نمودارها و داخل جدول‌ها Times New Roman 10 باشند.

خط چهارچوب اطراف نمودارها برداشته شود و در جدول‌ها تنها خط‌های افقی بالا و پایین ردیف اول و خط افقی پایین ردیف آخر آورده شوند.

فقط جدول‌ها و شکل‌های کوچک مانند جدول ۱، که پهنایی متناسب با پهنای مطالب متن داشته باشند در داخل ستون قرار می‌گیرند.

جدول ۱- عنوان جدول (بی- نازنین ۱۱ پررنگ).
Table 1- (Times New Roman 10 Bold)

Model components	Factor	Index
Driving Force	D_1	People
Response	R_3	Cultural actions
Pressure	P_5	Rainfall
State	S_1	Drop rate

اگر پهنای شکل یا جدولی متناسب با پهنای مطالب متن نباشد (مانند شکل ۱ یا جدول ۲)، باید آن را به صورت تک ستونه آورد.

روش تغییر ستون از دو به یک یا برعکس در نسخه‌های مختلف ورد متفاوت است. به عنوان مثال در ورد ۲۰۱۶ روش کار انتخاب نوار Layout به صورت زیر می‌باشد:

Layout | Columns | More Columns

بعد از طی این مسیر با توجه به هدف، حالت دو ستونه یا تک ستونه انتخاب می‌شود و از فهرست کشویی Apply to گزینه This point forward را انتخاب می‌کنیم.

برای اجرای صفحه‌بندی مطلوب می‌توانید از سطرهای اضافه که قبل یا بعد از شکل‌ها، جدول‌ها یا منابع درج می‌کنید، بهره ببرید.

از آنجا که این مجله به‌صورت کاملاً رنگی منتشر می‌شود، لازم است که به‌منظور متمایز نمودن دیاگرام‌ها از رنگ‌های مختلف استفاده شود و از روش‌های متمایزسازی مختص تصاویر سیاه و سفید (مانند استفاده از ضخامت خطوط مختلف، نمادها و یا استفاده از خطوط ممتد، نقطه‌چین و خط‌چین) پرهیز شود.

روش ارجاع در متن

روش این نشریه بر اساس توصیه‌های شورای ویراستاران علمی (سی‌اس‌ای[3]) در وبگاه

2- Bold

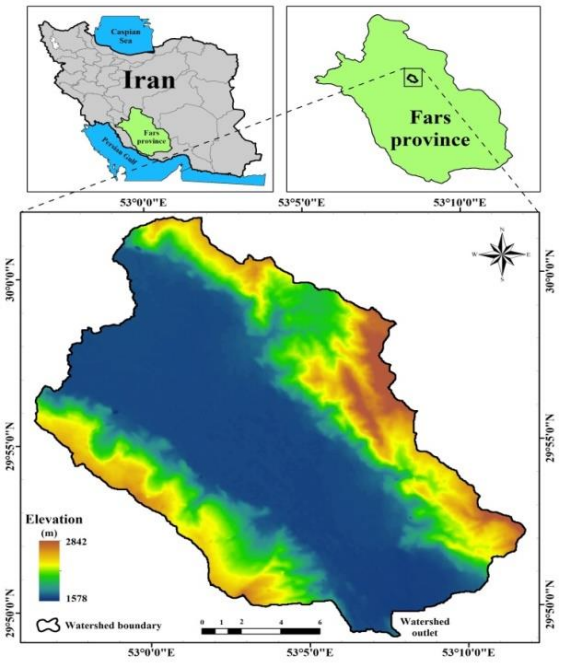
3- CSI

مربوطه[4]، در ویراستِ هفتمِ کتاب مرجع آنان به نام روش و قالب علمی: دستورِکار سی‌ای‌ای برای نویسندگان، ویراستاران و ناشران (۲۰۰۶) و با انتخاب روش نام سالِ سی‌ای‌ای است.

همهٔ منابع (اعم از فارسی و انگلیسی) مورد استفاده در متن مقاله باید با نام نویسنده(گان)، به زبان فارسی، و با ذکر تاریخ منبع مورد استفاده (بر حسب سال میلادی)، در داخل علامت دو کمان () نوشته شوند. مانند: کوثر (۲۰۱۹)، و یا تامسون و همکاران (۲۰۲۱).

اگر منبع ا ستفاده شده در پایان جمله آورده می شود، نام نویسنده و تاریخ باید درون دو کمان () نوشته شود. مانند: (احمدی ۲۰۲۲)، و (برادفورد و همکاران ۲۰۲۳).

فهرست منابع در پایان مقاله به‌ترتیب حروف الفبا آورده شود، و هیچ منبعی در زیرنویس آورده نشود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌شده.

Figure 1- Geographical location of the study area.

۱. ارجاع به منبع را با آوردن نام(های) نویسند(گان) و پس از آن سال انتشارِ نوشته انجام دهید. در هر ارجاع برای جدا کردن نام و تاریخ از دو کمان () استفاده کنید. پس از نام یک فاصلهٔ خالی بگذارید، اما ویرگول نگذارید: تازه‌ترین پژوهش بر شدت بارندگی در این منطقه (سیپیون ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که ..

۲. اگر نام نویسنده بخشی از جمله است، تنها تاریخ را در دو کمان () بگذارید:

مثال: هاگیهارا و اینو (۲۰۲۱) دریافتند که . . .

۳. کارِ انجام شده بیش از دو نویسنده: نام نویسندهٔ اصلی، سپس عبارتِ "و همکاران" و بعد تاریخ را بنویسید.

مثال: (هاگیهارا و همکاران ۲۰۲۳)

۴. بیش از دو کارِ انجام شده یک نویسنده: نام نویسنده و سپس تاریخ‌ها را به‌ترتیبِ زمانی بیاورید. برای جدا کردن تاریخ‌ها یک ویرگول و یک فاصله بگذارید:

4- http://www.councilscienceeditors.org

مثال: وایل (۱۹۹۹، ۲۰۱۰، ۲۰۲۲) مدل‌های مختلف برآورد سیلاب را شرح داده است.

۵. بیش از دو کارِ انجام شده یک نویسنده در یک سال: برای تمایز میان منابع چاپ شده از یک نویسنده در یک سال از حروف الفبا (الف، ب، و مانند آن‌ها) استفاده کنید. این ترتیب را هنگام فهرست کردن آن‌ها در بخش منابع نیز حفظ کنید.

مثال: راش (۲۰۲۰الف، ۲۰۲۰ب) پذیرفت که . . .

جدول ۲- عنوان جدول (قلم بی- نازنین ۱۱ پررنگ).

Table 2- (Times New Roman 10 Bold)

Component	Number of items	Calculated Cronbach's alpha
Driving force (D)	5	0.845
Pressure (P)	6	0.720
Response (R)	7	0.913

۶. کارهایی که یک سازمان به‌جای نویسنده منتشر کرده است: نام سازمان یا گروه را پیش از تاریخ چاپ بنویسید.

مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (خدمات ملی آمار کشاورزی ۲۰۲۱).

اگر نام این سازمان‌ها بسیار طولانی است، یا باید بارها در نوشتار به آن‌ها ارجاع دهید، می‌توانید کوتاه‌شدهٔ نام اصلی آن‌ها را بنویسید:

مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (یو اس دی ای ۲۰۰۰).

در فهرست منابع نیز نخست واژهٔ کوتاه‌شده و سپس نام کامل را بیاورید.

مثال:

USDA–National Agricultural Statistics Service. 2000.

فهرست منابع

همهٔ منابع مورد استفاده در متن مقاله (فارسی و انگلیسی) باید با الفبای انگلیسی و با دستورکار نشریه آورده شود و قلم آن Times New Roman 10 و هر منبع در صورت داشتن شناسهٔ دیجیتال یا DOI؛ حتماً لازم است این کُد نیز به‌طور کامل، نوشته شود.

۱. پس از نام‌خانوادگی، تنها حرف اول نام کوچک نویسنده‌ها می‌آید و این حرف‌ها با نقطه یا فاصله از هم جدا نمی‌شود. حرف اول تنها در اولین واژهٔ عنوانِ مقاله با حروف بزرگ نوشته می‌شود.

۲. پس از نام نویسنده، سال انتشار می‌آید. سپس یک نقطه، عنوان مقاله، نام مجله، یک نقطه، شمارهٔ مجلد نشریه، شمارهٔ انتشار در داخل دو کمان ()، یک نشانهٔ دونقطه (:)، و صفحه‌های مقاله آورده می‌شود. برای نوشتن شمارهٔ صفحه، همهٔ شماره‌ها را بیاورید: (۱۰۴۵–۱۰۳۷، نه ۴۵–۱۰۳۷). برای فاصلهٔ میان دو شمارهٔ صفحه از فاصلهٔ متوسط (خط اِن) – به‌جای خط تیره - استفاده کنید (نادرست: ۲۳۵-۲۵۰، درست: ۲۵۰–۲۳۵).

۳. در انتهای منابعی که نسخهٔ اصلی آن فارسی است باید در داخل پرانتز کلمه In Persian آورده شود.

۴. فهرست منابع را شماره‌گذاری نکنید.

۵. عنوان نشریات و مجلات علمی را به شکل کامل بیاورید. حرف اول عنوان هر نشریه یا مجله باید بزرگ باشد و بقیهٔ حروف کوچک باشد.

مثال‌های لازم برای نگارش فهرست منابع

Berengena J, Gavilan P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly adjective semiarid environment. Irrigation and Drainage Engineering, 131(2):147–163.

Naderi N, MohseniSaravi M, Malekian A, Ghasemian D. 2011. Analytical Hierarchy Process technique for deciding watersheds. Journal of Environment and Development, 4(2): 41–50. (In Persian).

Subramanya K. 1994. Engineering Hydrology. Tata McGraw–Hill Education.

Castejon M, Romero–Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of Orobanche cornea in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. Parasitic flowering plants. Marburg, F.R.G., pp. 121–126.

USDA–National Agricultural Statistics Service. 2000. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at http://www.nass.usda.gov:81/ipedb/ (accessed 15 May 2001; verified 24 Aug. 2001. USDA–NASS, Washington, DC. USA.

Ghorbani M. 2012. The role of social networks in operation mechanisms of rangeland (Case Study: Taleghan area). Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).

Niknahad Gharemakher H, Aghtabye A, Akbarlou M. 2018. Effects of grazing exclusive on some soil properties, erodibility and carbon sequestration (Case study: Bozdaghin rangelands, North Khorasan, Iran). Iranian Journal of Range and Desert Research. 24(4):708–718. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114058. (In Persian).

Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Title (Font: Times New Roman 14 Bold)

Author[1]*, Author[2], Author[3](Font: Times New Roman 10 Bold)

1- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)

2- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)

3- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)

Extended Abstract (Font: Times New Roman 12 Bold)

Introduction and Goal (Font: Times New Roman 11 Bold)

The extended abstract must include the title, author(s), introduction and objective, materials and methods, results and discussion, conclusion and suggestions. The extended abstract should be typed with single spacing using size 11 Times New Roman font. Extended abstract should summarize the contents of the paper and contain a minimum of 700 and maximum of 1000 words (With a logical balance between different sections of the abstract). Figures or Tables should not be included in the extended abstract. The total number of words should be about 200-250 words in the Introduction and objective section.

Materials and Methods (Font: Times New Roman 11 Bold)

The methodology must be clearly stated and described in sufficient detail or with sufficient references. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

Results and Discussion (Font: Times New Roman 11 Bold)

The findings and arguments of the work should be explicitly described. Note that no Tables, images and figures should be provided in the results and discussion section. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

Conclusion and Suggestions (Font: Times New Roman 11 Bold)

Conclusions should include (1) the principles and generalizations inferred from the results, (2) any exceptions to, or problems with these principles and generalizations, (3) theoretical and/or practical implications of the work, and (5) conclusions drawn and recommendations. This section should contain about 200-250 words.

Keywords: The authors should provide four to six keywords that are consistent with those in Persian (Font: Times New Roman 10 Bold)

Article Type: Research Article

***Corresponding Author's E-mail**: ??????

Citation: ?????, ?, ??????, ?., ??????, ?. Year ????. Title paper. Watershed Management Research. ??(?): ??-??.

DOI: ????????????????

Received: ????????, **Received in revised form:** ????????, **Accepted:** ????????,

Published online: ????????

Watershed Management Research, Vol. ??, No. ?, Ser. No, ???, Season ????, pp. ??-??.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)

CC BY

Article Type: Research Article

Acknowledgement
We would like to express our sincere gratitude to the University of XXXXX for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of Interest
The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article. If there is a conflict of interest, please state it in this section.

Data Availability Statement
The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author. /OR/ We have no permission to release data and codes.

Authors' Contribution
(For Example) Author 1: Writing - original draft preparation
(For Example) Author 2: Resources, Software, Manuscript editing
(For Example) Author 3: Formal analysis and investigation
(For Example) Author 4: Visualization, Supervision
(For Example) Author 5: Conceptualization, methodology

Watershed Management Research Journal

Founder: Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
ISSN: 2981-2038 Vol. 39, No. 3, Ser. No. 152, Autumn 2026

Director in Chief: A. Moradi - Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
Editor in Chief: A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Editorial Board :
M.T. Dastorani- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad
S.Y. Eerfanifard- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, Tehran University
A.H. Haghiabi- Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University Ataollah Kavian- Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural and Natural Resources University
D. Khalili - Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran M. Soufi- Emeritus Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
M. Zare- Professor of Earth Sciences Department, College of Sciences, Shiraz University

Executive Manager: S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
Language Editor and Editorial Office: M. Enayati - M.Sc. Expert, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
Statistics Consultant: L. Jowkar- Emeritus Fellow, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
Page Layout Expert: P. Haghighi - M.Sc. Expert, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Address: Office of the Journal of Watershed Management Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Janbazan Ave. Modarres Blvrd. Shiraz, I.R. Iran
Postal code: 71558-63511 **POB:** 71555-617 **Phone:** +987137204959
Website: http://wmrj@areeo.ir **Email:** wmrj@areeo.ac.ir

Watershed Management Research

152

ISSN: 2981-2038 Vol. 39, No. 3, Ser. No. 152, Autumn 2026

- **Spatial-Temporal Behavior Analysis of the Chaserka Babol Landslide by Combining Field Data and Remote Sensing**

  Reza Ali Rahimi Talarposhti, Ghorban Vahabzadeh, Ataollah Kavian, Seyed Ramezan Mousavi 1

- **Flood Hazard Zonation and Prediction using Deep Learning Models in the Qarasu Watershed, Golestan Province**

  Kourosh Shirani, Mohammad Ali Sadri 22

- **Laboratory Investigation of Water Flow Interaction and Energy Dissipation Phenomenon in a Vertical Gabion Drop Structure**

  Keyvan Kazemi Hasanvand, Hojatollah Younesi, Amir Hamzeh Haghiabi, Rasoul Daneshfaraz, Babak Shahinezhad 45

- **A Reinforcement Learning Framework for Flood Zoning in Mountainous Areas using the Deep Q-Learning Model**

  Saleh Yousefi, Sara Mardanian, Ahmad Reza Karimipour 64

- **Comparison of Runoff and Soil Erosion in Natural Stands of Iranian Oak (*Quercus brantii* Lindl.) and Afforested with Cupressus (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis) in the Zagros Forest Ecosystems**

  Somayeh Heydari, Noredin Rostami, Mehdi Heydari, Morteza Gheysouri 79

- **Modeling the Sustainability of Water, Energy, and Food Based on the System Dynamics Approach in the Sarab Seyed Ali Watershed, Lorestan Province**

  Arman Kiani, Kaka Shahedi, Mahmoud Habibnejad Roshan, Ali Haghizadeh 97

- **Hydrological Behavior Simulation of the Neyshabur Watershed in Iran during Different Rainfall and Runoff Return Periods**

  Seyed Hamidreza Sadeghi, Nastaran Naderi Marangalo, Sahar Mostafaei Yunjali, Asma Badameh, Zeinab Sheikhi, Ali Nori, Sudabeh Gharemahmudli 123