

تحلیل تغییرات زمانی خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان با استفاده از شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و بارش استاندارد

ابراهیم یوسفی مبرهن^۱، کاظم صابرچناری^{۲*}، سمیرا زندی فر^۳

۱- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سمنان، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران.

۲- استادیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: K.saberchenari@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

چکیده

لایه‌های آب‌دار زیرزمینی به‌طور عمده با بارش یا از طریق تعامل با آب‌های سطحی تغذیه می‌شوند، تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و آب سطحی در نهایت بر سیستم آب زیرزمینی اثر خواهد گذاشت. هدف از این پژوهش استفاده از شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و بارش استاندارد بررسی اثر تغییرات خشکسالی بر روی منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان می‌باشد. برای این منظور با استفاده از اطلاعات آب زیرزمینی (چاه‌های پیزمتری) منطقه مورد مطالعه، شاخص خشکسالی آب زیرزمینی محاسبه و تحلیل شد. همچنین با استفاده از پایگاه داده CHIRPS شاخص بارش استاندارد نیز برای مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه گردید. سپس ارتباط بین شاخص خشکسالی آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد و بارش سالانه بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص خشکسالی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در طول دوره آماری، روندی نزولی به سمت خشکسالی دارد به‌طوری که از سال ۱۳۹۰ شاخص خشکسالی منفی شده و تا پایان دوره آماری مقادیر منفی شاخص ادامه دارد. طبقه‌بندی خشکسالی با بارش استاندارد نشان داد که این منطقه در طبقه خشکسالی نزدیک به نرمال قرار دارد. نتایج همبستگی بین دو شاخص با استفاده از رگرسیون خطی که بین شاخص‌ها همبستگی معنی‌داری ($R^2 = 0.003$ و $P\text{-Value} = 0.053$) وجود ندارد، اگرچه از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند و پایین بودن میزان همبستگی بین شاخص‌ها می‌تواند بیان‌گر این موضوع مهم باشد که وضعیت خشکسالی آب‌های زیرزمینی در دشت قروه-دهگلان تنها متأثر از خشکسالی هواشناسی در منطقه نمی‌باشد و عوامل مهم‌تری نیز بر سطح آب‌های زیرزمینی دشت متأثر هستند که باید اثرات آن بر سطح آب زیرزمینی دشت بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: پایگاه داده CHIRPS، سطح تراز آب زیرزمینی، شاخص بارش استاندارد، شاخص خشکسالی آب زیرزمینی.

مقدمه

دوره حاکمیت خود تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون اثر خشکسالی بر روی منابع آب‌های زیرزمینی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (یوسفی‌مبرهن و زندی‌فر، ۱۴۰۲). خشکسالی حالتی نرمال و مستمر از اقلیم است. گرچه بسیاری به اشتباه آن را واقعه‌ای تصادفی و نادر می‌پندارند. این پدیده تقریباً در تمامی مناطق اقلیمی رخ می‌دهد، گرچه مشخصات آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر کاملاً متفاوت است. خشکسالی یک اختلال موقتی است و با خشکی تفاوت دارد، چرا که خشکی صرفاً محدود به مناطقی با بارندگی اندک است و حالتی دائمی

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش بسزایی داشته باشد. خشکسالی از پدیده‌های جوی است که می‌تواند در هر ناحیه‌ای رخ دهد و منجر به خسارت‌های عمده اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شود. این پدیده بخش‌های مختلف محیطی از جمله منابع آب‌های زیرزمینی را در طول

شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و دبی استاندارد شده بررسی کردند. نتایج نشان داد، در بیشتر محدوده‌های مطالعاتی همبستگی بین شاخص‌های GRI و SDI وجود دارد. (Jahanshahi and Shahedi, 2018) منابع آب‌های زیرزمینی و هیدرولوژیکی برای نظارت و پیش‌بینی خشکسالی در آب و هوای نیمه خشک مورد ارزیابی قرار دادند این پژوهش برای بررسی همبستگی بین شاخص‌ها و دوره‌های همپوشانی ۳ تا ۴۸ ماهه در ایران مرکزی در طول سال ۱۹۷۰ بر شاخص‌های بارش استاندارد شاخص، جریان استاندارد و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی متمرکز شده است. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه بیش از دو نوع خشکسالی دیگر از خشکسالی هواشناسی رنج می‌برد. علاوه بر نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه در سه دهه گذشته خشک‌تر شده است. (Sarlak and Agha, 2018) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های خشکی لانگ^۵، خشکی دومارتون^۶ برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد و شاخص خشکی ایرنک^۷ به مدت ۳۱ سال با هدف تعیین اراضی خشک و تغییر شرایط خشکی در عراق پرداختند. نتایج تغییرات مکانی نشان داد، حدود ۲۷ درصد از کشور را مناطق خشک و نیمه‌خشک در برگرفته و در مورد تغییرات زمانی، مشاهده شد که شاخص‌های خشکی برای کلیه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد؛ به نظر می‌رسد کاهش بارندگی و افزایش دما برای این منطقه باعث بدتر شدن اوضاع در آینده خواهد شد. مطالعه Javadinejad et al., (2020) خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی سطحی با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده، شاخص رواناب استاندارد^۸ و اثر خشکسالی های آبی- هوایی بر روی آب‌های زیرزمینی توسط شاخص خشکسالی آب زیرزمینی بررسی شد. نتایج نشان داد که شرایط خشک و مرطوب بر اساس سه شاخص در دهه‌های ابتدایی و بعدی در منطقه رخ می‌دهد. بین شاخص بارش استاندارد، شاخص رواناب استاندارد و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ۱۲ ماه ارتباط معنی‌داری وجود داشت.

وجود اطلاعات بارشی دقیق مستخرج از دستگاه‌های باران‌سنج و بارن نگار ایستگاه‌های هواشناسی، در مطالعات خشکسالی به‌عنوان داده پایه ضروری می‌باشد. اما هزینه احداث و نگهداری

از اقلیم است (عباسی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰). موضوع تغییر اقلیم از ابتدای دهه هشتاد میلادی مطرح شده است. از دلایل آن می‌توان به تغییر محور چرخش زمین، افزایش گازهای گلخانه‌ای، فعالیت‌های انسانی، موقعیت جغرافیایی، نزدیک بودن به محیط‌های بزرگ اقیانوسی و باد غالب اشاره کرد که در این بین افزایش گازهای گلخانه‌ای نقش مؤثرتری را ایفا کرده است (بختیاری و همکاران، ۱۴۰۰). تأثیر خشکسالی هواشناسی در سیستم آب‌های زیرزمینی، به‌طور کلی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه (Van Lanen et al., 2000; Bhuiyan et al., 2006) اتفاق می‌افتد. از آنجایی که لایه‌های آبدار زیرزمینی به‌طور عمده با بارش یا از طریق اندرکنش با آب‌های سطحی تغذیه می‌شوند، تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و آب سطحی در نهایت بر سیستم آب زیرزمینی اثر خواهد گذاشت. خشکسالی آب زیرزمینی همچنین به ترکیب خطر فیزیکی و آسیب‌پذیری انسان در ارتباط با کاهش در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی و دسترسی به دوره خشکسالی اشاره دارد (Yousefi Mobarhan and Villholth et al., 2013; Karimi Sangchini, 2021). پژوهش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است: میراکبری و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط شاخص جریان استاندارد^۱، شاخص بارش-تبخیرتغرق استاندارد^۲، شاخص بارش استاندارد^۳ و شاخص منابع آب زیرزمینی^۴ را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش جهت بررسی تأثیر خشکسالی‌ها بر یکدیگر، همبستگی بین شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد که شاخص بارش-تبخیرتغرق استاندارد در مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه با ۳ ماه تأخیر با شاخص خشکسالی آب زیرزمینی بیشتری همبستگی را دارد که حاکی از تأثیرگذاری خشکسالی هواشناسی بعد از گذشت دو سال و بیشتر بر منابع آب زیرزمینی است. خسروی ده کردی و همکاران (۱۳۹۸) خشکسالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص خشکسالی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، از آمار ۳۲ چاه پی‌زومتری در دشت شهرکرد در دوره ۳۱ ساله (۹۴-۱۳۶۴) استفاده شد. زندی فر و همکاران (۱۳۹۸) روند تغییرات آب زیرزمینی و ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی در حوزه آبریز زهره- جراحی با استفاده از

⁵ Lang⁶ De Martonne⁷ Erinc⁸ Standard Runoff Index¹ Standard Discharge Index² Standard Precipitation Evaporation Index³ Standard Precipitation Index⁴ Groundwater Resource Index

در این تحقیق از این پایگاه داده بارش برای محاسبه شاخص بارش استاندارد جهت بررسی وضعیت خشکسالی‌های منطقه مورد مطالعه استفاده گردید.

با توجه به اهمیت موضوع و با استفاده از داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه مانند: میزان بارندگی، تراز آب زیرزمینی و دما، تلاش می‌شود که یک همبستگی بین شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد و تاثیر آن‌ها بر هم ارزیابی گردد. افت سطح آب زیرزمینی و پیامدها حاصل از آن، یکی از معضلات حال حاضر کشور محسوب می‌گردد. با توجه به تغییرات کاهشی در میزان بارش، وقوع خشکسالی‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های کشاورزی، دامداری و صنعتی و هم چنین افزایش جمعیت به‌خصوص در ۱۰ سال اخیر باعث افزایش مصرف آب و در نتیجه کاهش ذخایر آب زیرزمینی و بیلان منفی سفره‌های آب دشت‌های قروه-دهگلان شده است (عباسی، ۱۳۹۵). به‌طور کلی هدف از این پژوهش تحلیل تغییرات زمانی خشکسالی‌های اخیر بر منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان با استفاده از شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی، بارش استاندارد در منطقه مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قروه-دهگلان یکی از ۱۱ محدوده یا دشت حوزه آبریز سفیدرود بزرگ می‌باشد که با متوسط بارندگی سالانه ۳۵۲ میلی‌متر و اقلیم نیمه‌خشک و سرد، در شرق شهرستان سنندج و شمال غربی همدان بین طول‌های جغرافیایی $47^{\circ}14'$ تا $48^{\circ}04'06''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ}06'$ تا $35^{\circ}20'09''$ شمالی قرار دارد و از نظر زمین‌شناسی دشت قروه-دهگلان بخشی از زون ساختمانی سنندج-سیرجان بوده که جزء فعال‌ترین زون‌های ساختمانی ایران محسوب می‌گردد (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۶). حداقل و حداکثر دمای آن به ترتیب ۲۳- و ۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد میانگین رطوبت نسبی سالانه ۴۵ درصد و حداکثر تبخیر در تیر ماه به بیش از ۳۵۰ میلی می‌رسد اراضی دشت قروه-دهگلان غالباً جزء اراضی قابل کشت می‌باشد خاک این اراضی از نظر آبیاری و زراعت دارای استعداد و قابلیت زیادی بوده و کشت انواع گیاهان زراعی و بومی با هزینه کم عملکرد خوبی

این ایستگاه‌ها بالا بوده و در بعضی مناطق قابل احداث نمی‌باشد و این موضوع تعداد و پراکنش مناسب ایستگاه‌ها را در ارتباط با نیاز مطالعاتی اقلیم منطقه تحت شعاع قرار می‌دهد. از این رو به‌کارگیری فناوری‌های سنجش از دور و توسعه مدل‌های باز تحلیلی، به‌عنوان منابع داده‌ای جایگزین، ضرورت پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از این پایگاه‌های داده‌ای سنجش از دور در مطالعات خشکسالی توسعه پیدا کرده است. از جمله جدیدترین پایگاه داده‌ای بارش توسعه یافته می‌توان به ^۱CHIRPS اشاره کرد که از ترکیب ریاضی داده‌های ماهواره ای مادون قرمز ایجاد شده است و از جمله ویژگی مهم در کاربرد آن، قدرت تفکیک مکانی و زمانی این داده‌ها است. پایگاه داده‌ای بارش توسعه یافته با قدرت تفکیک 0.5° درجه، از نظر قدرت تفکیک زمانی و مکانی یکی از بهترین پایگاه داده‌ای بارش در دنیاست (غلامی و همکاران، ۱۴۰۲). از جمله مطالعات مشابهی که تاکنون در زمینه کاربرد پایگاه داده‌ای انجام شده عبارتند از: Gao et al., (2018) در بررسی عملکرد پایگاه داده بارش توسعه یافته را با استفاده از شاخص بارش استاندارد برای حوزه آبریز رودخانه‌های در کشور چین به این نتیجه رسیدند این پایگاه داده‌ای در شناسایی خشکسالی‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه عملکرد خوبی داشته است. Mianabadi et al., (2022) در مطالعه خود عملکرد پایگاه CHIRPS در شناسایی خشکسالی‌ها و روند آن در جنوب شرق کشور ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد این پایگاه داده در مقیاس‌های ماهانه و فصلی نسبت به مقیاس روزانه عملکرد بهتری دارد. همچنین استمرار خشکسالی‌ها در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۹ ماهه کاهش یافته درحالی که شدت خشکسالی‌ها افزایش داشته است. Das, (2022) در بررسی کارایی پایگاه‌های CHIRPS و PERSIANN-CDR^۲ در محدوده دریاچه ویکتوریا گزارش کردند که هر دو پایگاه داده توانایی مناسبی در آشکارسازی رفتار شدت خشکسالی‌ها در گام‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ دارند و همچنین CHIRPS توانایی بهتری نسبت به PERSIANN-CDR از خود نشان داد. با توجه به نتایج قابل قبول پایگاه داده بارش توسعه یافته در زمینه مطالعات خشکسالی و مطالعات انگشت‌شمار صورت گرفته در این زمینه در اقلیم‌های مختلف ایران، قابلیت‌ها و عملکرد این داده‌ها در کشور نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشد. از این رو

² Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record

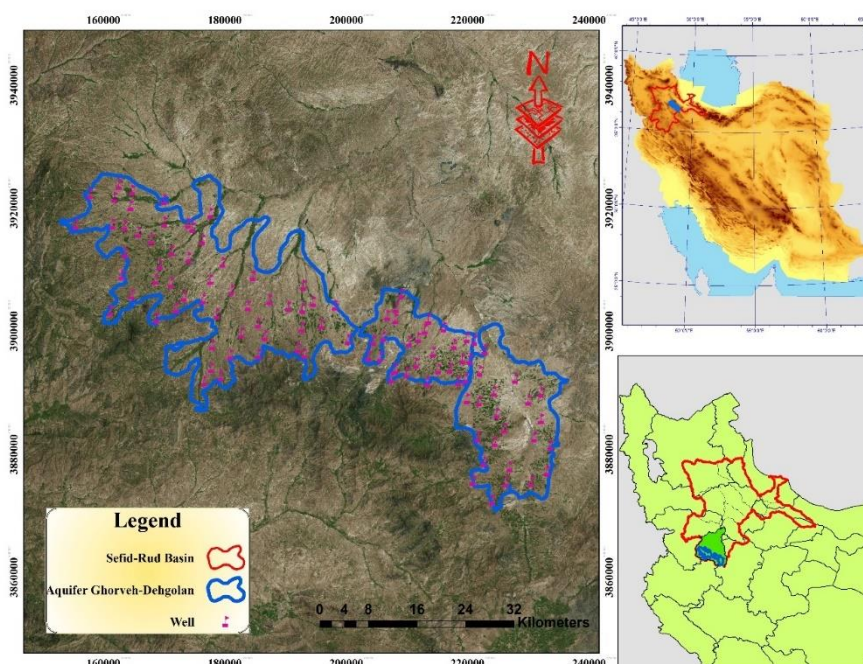
¹ Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data

مخاطرات طبیعی است. این پایگاه داده‌ها برای مناطق با عرض جغرافیایی ۵۰ درجه شمالی و جنوبی به صورت روزانه و ماهانه قابل دسترس است. این پایگاه یک مجموعه داده با بیش از سی سال بارندگی و قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه در مقیاس جهانی است که در این تحقیق از اوایل ژانویه ۲۰۰۰ تا ابتدای آوریل ۲۰۲۱ به صورت ماهانه استخراج گردید. این خروجی تنها یک داده خام نبوده بلکه توسط ایستگاه‌های هواشناسی تدقیق شده است. خروجی این پایگاه بیشتر برای ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی به کار می‌روند (Funk et al., 2015؛ غلامی و همکاران، ۱۴۰۲).

دارد این اراضی دارای خاک‌های سطحی عمیق با بافت متوسط تا سنگین و قدرت نگهداری آب زیاد می‌باشند. دشت قروه-دهگلان با اراضی کشاورزی (گندم و جو)، مراتع دامداری، زمین‌های بایر و کوهستانی، و توسعه محدود شهری شناخته می‌شود و با چالش‌هایی مانند فرسایش خاک و کاهش منابع آب روبرو است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

پایگاه داده CHIRPS

CHIRPS پایگاه داده جهانی بارش رستری مستخرج از ماهواره‌های مادون قرمز و ایستگاه‌های هواشناسی گروه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نسبت به کشور.

Figure 1- location of the study area in the country.

جنبه‌ی اندازه‌ی زیان‌های وارده در صدر قرار دارد (یوسفی مبرهن و زندی‌فر، ۱۴۰۲). این پدیده در درازمدت موجب کاهش منابع آب، از طریق خشکیدگی جریان‌های سطحی و زیرزمینی می‌گردد. بدین منظور از شاخص خشکسالی برای بیان کمی این پدیده استفاده شده است. معمولاً این شاخص‌ها به صورت نقطه‌ای محاسبه می‌شوند و لازم است تا به صورت مکانی پردازش شده و نقشه‌های مربوط ارائه گردند. شاخص خشکسالی آب زیرزمینی به عنوان شاخصی قابل اعتماد به منظور پایش وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی پیشنهاد شد (Mendicino et al., 2008). شاخص GRI نشان‌دهنده میزان آب ورودی به سفره‌های زیرزمینی است و می‌تواند برای بررسی

الگوریتم بارشی سنجش از دور CHIRPS در سامانه گوگل ارث انجین وجود داشته و اطلاعات مورد نیاز پس از مشخص کردن زمان و مکان مورد مطالعه، اندازه پیکسل‌ها و نوع محصول استخراج شده است. در این تحقیق از داده‌های مستخرج از این الگوریتم برای محاسبه شاخص استاندارد بارش جهت بررسی شرایط خشکسالی منطقه مورد مطالعه در بازه‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده شد.

بررسی شاخص خشکسالی هیدروژئولوژیکی

خشکسالی یکی از زیان‌بارترین، مخاطرات طبیعی به شمار می‌رود. در بین بلاهای طبیعی تهدیدکننده‌ی انسان و محیط‌زیست، خشکسالی هم از نظر فراوانی رخداد و هم از

شاخص بارش استاندارد یکی از پرکاربردترین شاخص‌هایی است که در پایش خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yousefi mobarhan et al., 2024). این شاخص جهت کمی کردن بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف جهت پایش خشکسالی هواشناسی استفاده می‌شود (فردمرادی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۳). طول این دوره می‌تواند از یک ماه تا چندین سال متغیر باشد. معادله ۲ برای محاسبه شاخص بارش استاندارد می‌باشد که سپس براساس دو مقدار نشان داده شده در یک جدول طبقه‌بندی می‌شود. در این مطالعه از پایگاه داده‌ای CHIRPS برای محاسبه این شاخص استفاده شده است:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (2)$$

که در آن SPI: شاخص بارش استاندارد

P_i : مقدار بارندگی دوره

$\bar{P}$: متوسط بارندگی دوره آماری موردنظر

SD : انحراف معیار بارندگی دوره آماری موردنظر

جدول ۲- طبقه‌بندی مقادیر خشکسالی در SPI (عباسی‌نیا و

همکاران، ۱۴۰۰).

NO.	Severity of drought	SPI
1	Acute fear	$2 <$
2	severe fear	1.99-1.50
3	Moderate fear	1.49-1
4	normal	0.99-0
5	Mild drought	0- (-0.99)
6	Moderate drought	(-1)- (-1.49)
7	severe drought	(-1.5)- (-1.99)
8	Acute drought	< -2

نتایج و بحث

پایش زمانی خشکسالی با استفاده از بارش استاندارد

منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص بارش استاندارد، براساس دوره زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه از نظر خشکسالی طبقه‌بندی شده است. مقدار شاخص بارش استاندارد در مقیاس‌های زمانی ذکر شده با استفاده از پایگاه داده‌ای CHIRPS به‌دست آمد. براساس نتایج به‌دست آمده در بازه زمانی ۱ ماهه منطقه مورد مطالعه از نظر خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد در طبقه متوسط قرار می‌گیرد. در بازه زمانی ۳ ماهه در طبقه نرمال قرار گرفت، در بازه ۶ ماهه منطقه مذکور در طبقه نرمال قرار گرفت، در بازه زمانی ۹ ماهه براساس طبقه‌بندی شاخص بارش استاندارد منطقه

وضعیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد. مقدار این شاخص با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (1)$$

که در آن $D_{y,m}$ مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر تراز آب زیرزمینی در ماه m در طول دوره آماری می‌باشند (Mendicino et al., 2008). طبقه‌بندی مقادیر شاخص خشکسالی آب زیرزمینی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- طبقه بندی شدت خشکسالی با استفاده از شاخص

خشکسالی آب زیرزمینی.

Table 1- Classification of drought severity with GRI index.

NO	Drought classes	GRI
1	Very intense fear	≥ 2
2	severe fear	2 -1.5
3	Moderate fear	1.5-1
4	Mild fear	1-0.5
5	normal	0.5- (-0.5)
6	Mild drought	(-0.5)- (-1)
7	Moderate drought	(-1)- (-1.5)
8	severe drought	(-1.5)- (-2)
9	Very intense drought	$-2 \geq$

بررسی تغییرات درازمدت و نوسانات سطح آب زیرزمینی

به‌منظور بررسی میزان افت سطح آب، تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به مهر ماه سال ۱۳۹۷ از تراز آب در مهر ماه ۱۳۹۲، تراز آب در مهر ماه ۱۳۹۲ از تراز آب در مهر ماه ۱۳۸۷ و نیز تراز آب در مهر ماه ۱۳۸۷ از تراز آب در مهر ماه ۱۳۸۰ کسر می‌گردد و نقشه پهنه‌بندی تغییرات آب زیرزمینی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 تهیه گردید. به‌منظور بررسی تغییرات درازمدت و نوسانات سطح آب- زیرزمینی و نیز تشخیص دوره‌های افزایش و کاهش سطح آب، آبنمود معرف در طول دوره آماری برای آبخوان قروه تهیه شده است. هیدروگراف واحد یا آبنمود معرف، هیدروگراف متوسطی است که معرف آبخوان‌های منطقه است و از طریق آن، تغییرات سطح آب در طول دوره‌های مختلف چندین ساله و بالا رفتن و پایین آمدن سطح آب آبخوان مشخص می‌شود. با توجه به هیدروگراف واحد می‌توان دوره‌های بیشینه و کمینه سطح آب در آبخوان را تعیین کرد (یوسفی مبرهن و زندی‌فر، ۱۴۰۲).

تعیین شاخص بارش استاندارد

یاسمنی و همکاران (۱۳۹۱) و مطالعه Mendicino et al., (2008)، همخوانی و در بررسی تغییرات مکانی کیفی آب زیرزمینی در دشت قروه دهگلان (یوسفی مبرهن و زندی فر، ۱۴۰۲) مطابقت دارد.

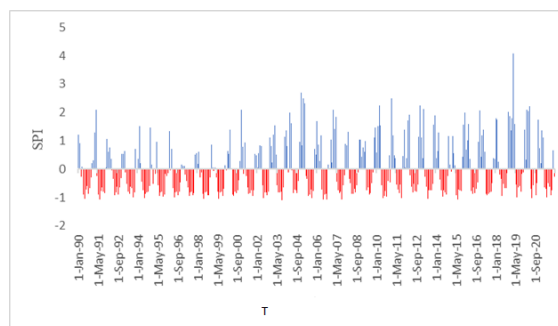
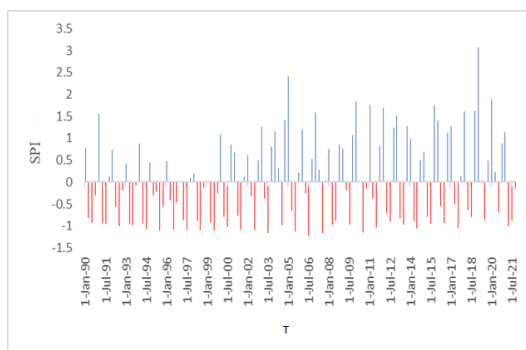
جدول ۳- طبقه بندی خشکسالی براساس شاخص بارش

استاندارد در منطقه مورد مطالعه.

Table 3- Classification of drought based on SPI index in the study area.

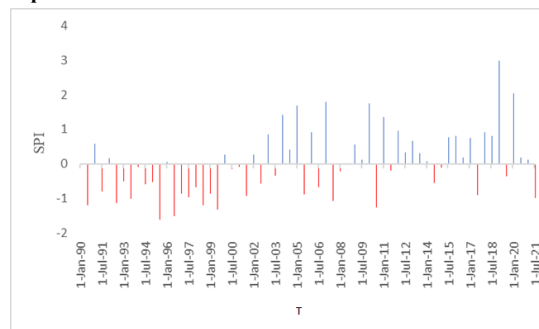
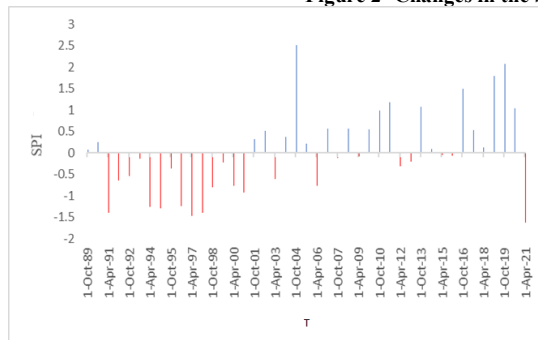
NO.	time (months)	Classification of drought
1	1	normal
2	3	normal
3	6	normal
4	9	normal
5	12	normal
6	24	normal
7	48	normal

مورد مطالعه در طبقه نرمال قرار گرفته است، در دوره زمانی ۱۲ ماهه خشکسالی در طبقه متوسط قرار گرفت و در بازه های زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه به ترتیب در طبقات نرمال و متوسط قرار گرفت. جدول ۳ بیانگر طبقات خشکسالی براساس دوره های زمانی مذکور می باشد (شکل های ۲ تا ۵). نتایج به دست آمده با نتایج مطالعه فروتن و گلپایگانی (۱۳۹۹) در بررسی تغییرات آب زیرزمینی و شاخص خشکسالی در حوضه آبخیز شریف آباد قم و مطالعه جهانشاهی و همکاران (۱۴۰۱) در ارزیابی اثر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص بارش استاندارد در شهر بابک و غلامی و همکاران (۱۴۰۲) در ارزیابی عملکرد پایگاه داده CHIRPS در آشکارسازی خشکسالی، عباسی و همکاران (۱۳۹۵)، همچنین با نتایج مطالعات



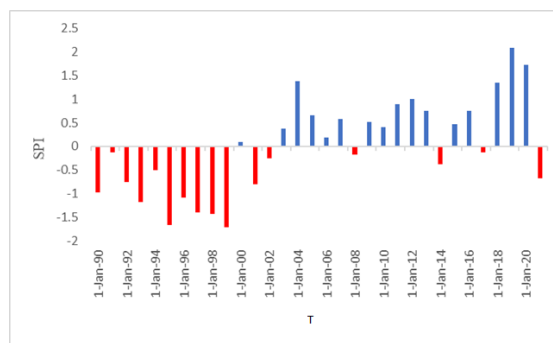
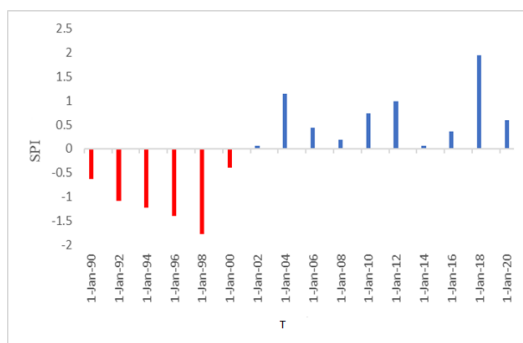
شکل ۲- نمودار تغییرات شاخص بارش استاندارد در دوره زمانی ۱ و ۳ ماهه.

Figure 2- Changes in the SPI in the period of 1 and 3 months.



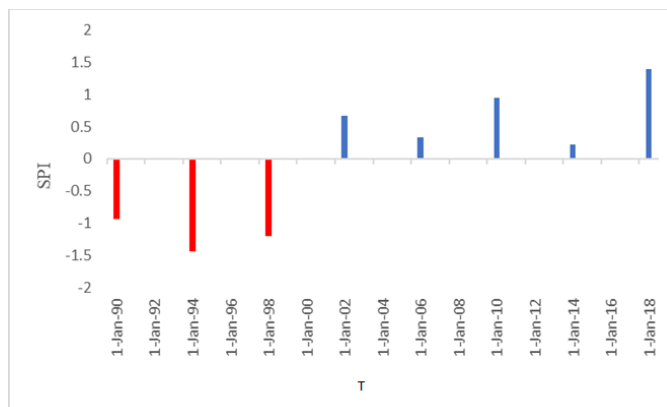
شکل ۳- نمودار تغییرات شاخص بارش استاندارد در دوره زمانی ۶ و ۹ ماهه.

Figure 3- Changes in the SPI in the period of 6 and 9 months.



شکل ۴- نمودار تغییرات شاخص بارش استاندارد در دوره زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه.

Figure 4- Changes in the SPI in the period of 12 and 24 months.



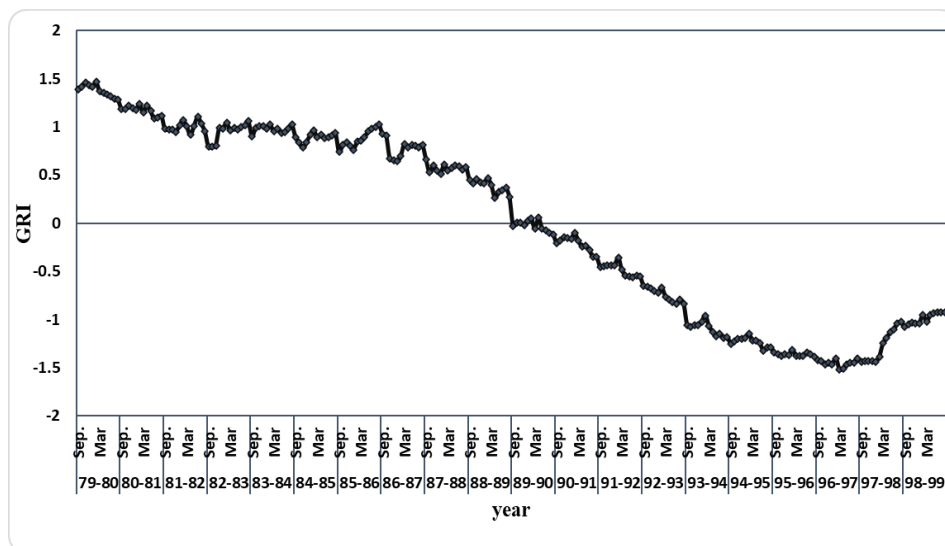
شکل ۵- نمودار تغییرات شاخص بارش استاندارد در دوره زمانی ۴۸ ماهه.

Figure 5- Changes in the SPI in the period of 48 month.

طول دوره آماری بیست ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۹) برای آبخوان قروه نشان داده شده است. براساس این نمودار، شاخص منابع آب زیرزمینی در طول دوره آماری بیست ساله روندی نزولی به سمت خشکسالی دارد به طوری که از سال ۱۳۹۰ شاخص خشکسالی منفی شده و تا پایان دوره آماری مقادیر منفی شاخص ادامه یافته که بیانگر کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه است. همچنین سال ۱۳۹۷ در طبقه‌بندی خشکسالی شدید با رقم شاخص $-1/52$ به وقوع پیوسته است.

پایش زمانی خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت

در سال‌های اخیر به علت کاهش منابع آب سطحی، با افزایش شدید در استفاده از آب‌های زیرزمینی این دشت مواجه هستیم که به تبع آن سطح آب زیرزمینی در اکثر نواحی آن به صورت چشمگیری افت پیدا کرده است. تا به حال شاخص‌های خشکسالی متعددی جهت پیش بینی و تعیین شدت خشکسالی ارائه شده است، اما شاخصی جهت برآورد شدت خشکسالی آب‌های زیرزمینی در این دشت ارائه نشده است. در شکل ۶ مقادیر شاخص خشکسالی آب زیرزمینی در



شکل ۶- تغییرات شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی آبخوان دشت در دوره بیست ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۹).

Figure 6- Changes in the GRI in the period of 20 years.

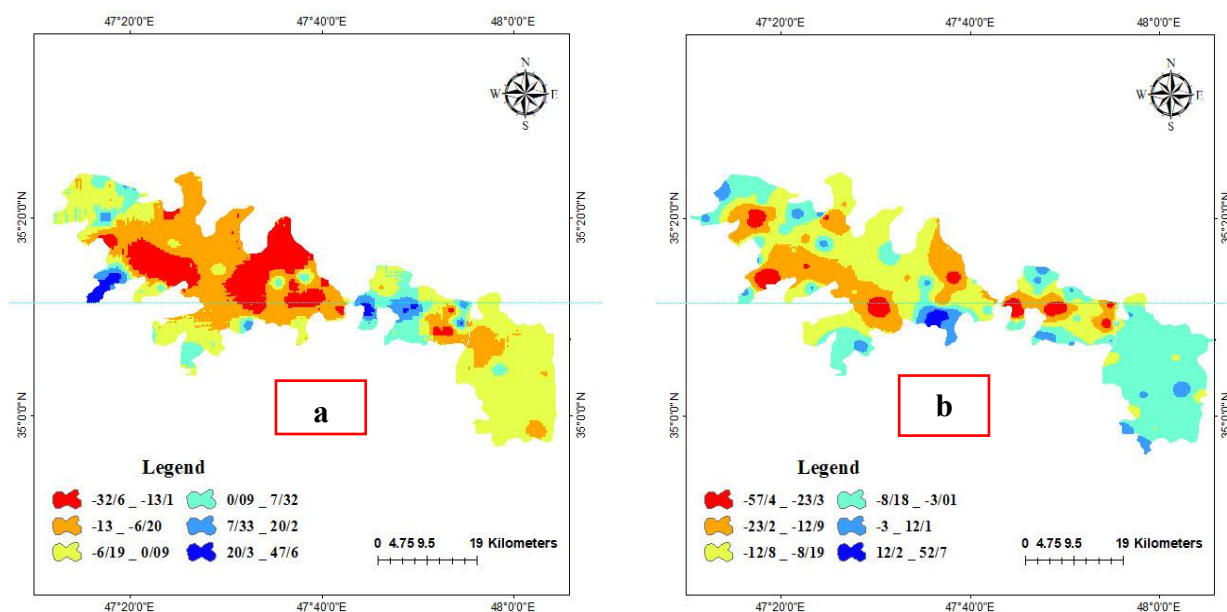
زمین کمتر شده و مناطقی که دارای مقادیر مثبت هستند یعنی سطح آب زیرزمینی در انتهای دوره نسبت به ابتدای آن، نسبت به سطح زمین بیشتر شده است. در دوره زمانی ۱۳۸۷-

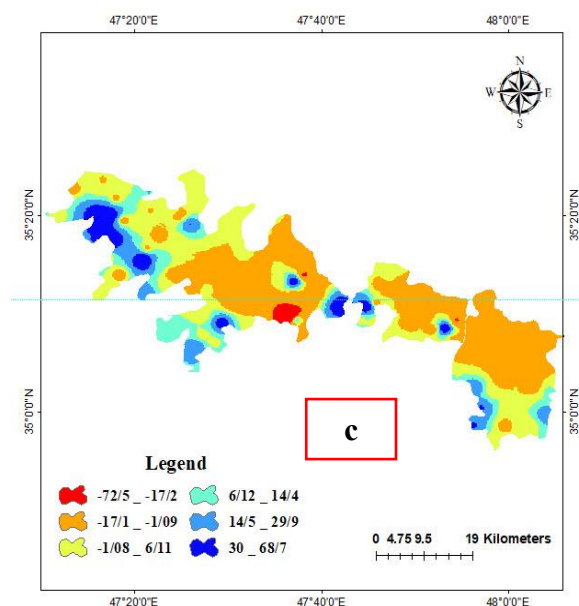
تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی

مناطق که دارای مقادیر منفی هستند یعنی سطح آب زیرزمینی در انتهای دوره نسبت به ابتدای آن، نسبت به سطح

در قسمت‌های غربی منطقه افزایش تراز داشته‌اند. همچنین بخش‌هایی از منطقه تا ۹ متر افزایش تراز داشته‌اند. اعداد به‌دست آمده از بخش‌های مختلف دشت نشان‌دهنده افزایش افت سطح آب در هر دوره نسبت به دوره قبل می‌باشد. نتایج حاصل از تغییرات افت آب زیرزمینی با تحقیقات یوسفی مبرهن و زندی‌فر (۱۴۰۲) در دشت قروه-دهگلان، احمدی و رنجبر (۱۳۹۱) در دشت دهگلان، زارعی و همکاران (۱۳۹۸) در دشت قروه همخوانی و همسویی نزدیکی دارد. احمدی و همکاران (۱۳۹۱) دریافتند که در طی دو دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۰) به طور میانگین از حدود ۳/۲ متر تا ۱۵/۵ متر دچار افت سطح آب زیرزمینی شده است. همچنین زارعی و همکاران به این نتیجه رسیده است که در طی دو دوره پنج ساله (۱۳۹۲-۱۳۸۳) به ترتیب ۲/۱ و ۵/۷ متر آب زیرزمینی آبخوان قروه افت پیدا کرد. شکل ۷ پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

۱۳۸۰ (الف) بیشترین و کم‌ترین تراز آب زیرزمینی به ترتیب معادل ۳/۲ متر و ۴/۷ متر در منطقه است. در طی دوره زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۲ (ب)، فقط تعداد محدودی از چاه‌ها، افزایش سطح آب داشته‌اند یعنی با بهره‌برداری از چاه‌های منطقه مورد مطالعه که در دوره زمانی اول، وضعیت مطلوبی داشت به مناطقی تبدیل شده‌اند که سطح تراز آب زیرزمینی کاهش یافته است همچنین شدت افت دوره زمانی دوم (ب) به دوره اول (الف) بیشتر بوده به‌طوری که بیش از ۹۰ درصد از دشت با کاهش سطح آب زیرزمینی (۵/۷ تا ۱ متر) مواجهه شده است که نشان می‌دهد این نواحی وضعیت خوبی از نظر تراز آب زیرزمینی ندارند که می‌تواند به دلیل افزایش چاه‌های بهره‌برداری و تخلیه از آبخوان باشد که باعث پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در این قسمت از آبخوان شده است. در طی دوره زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۲ (ج) محدوده بسیار کوچکی از جنوب دشت با بیش از ۷ متر افت، بیشترین کاهش تراز آب زیرزمینی در ۳ دوره زمانی، در برخی مناطق شرایطی بدون تغییر و حتی





شکل ۷- پهنه‌بندی تغییرات افت آب زیرزمینی (برحسب سانتی‌متر) در سه دوره زمانی ۸۷-۸۰ (الف)، ۹۲-۸۷ (ب) و ۹۷-۹۲ (ج).
Figure 7- Groundwater Level Change Zoning (in cm) during three time periods 2001-2008 (a), 2008-2013 (b), and 2013-2018 (c).

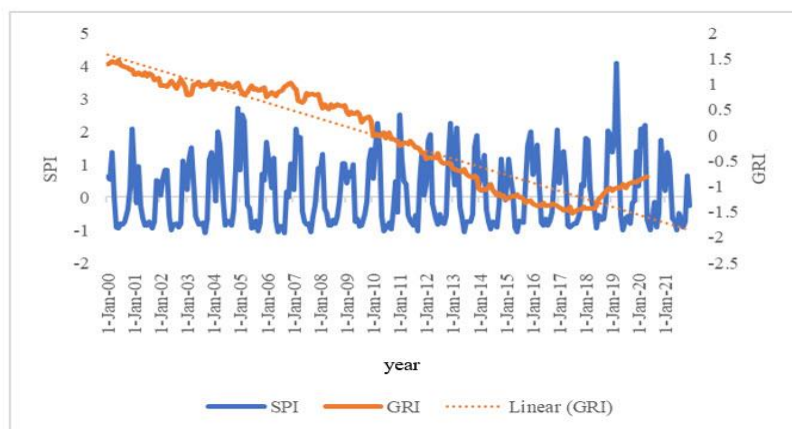
غیرمستقیم و جریان‌های زیرسطحی، است (میریعیقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). این پیچیدگی‌ها بیانگر اهمیت در نظر گرفتن عوامل فراتر از بارش در تحلیل خشکسالی منابع آب زیرزمینی هستند. به‌طور کلی، در دوره‌های با بارندگی قابل‌توجه، ارزش شاخص خشکسالی آب زیرزمینی افزایش می‌یابد، درحالی که در دوره‌های خشکسالی، مقدار تراز آب زیرزمینی کاهش می‌یابد (شکل ۹)، با نتایج مطالعات Khan et al., (2008) در بررسی خشکسالی و تأثیرات آن بر سطح آب زیرزمینی در اراضی کشاورزی بخشی از استرالیا، Shahid and Hazarika, (2010) در تأثیر خشکسالی بر آب زیرزمینی در شمال بنگلادش، ایمانی و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی آثار خشکسالی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت بهاباد یزد، صیف و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی اثر خشکسالی بر آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت فسا، چمن‌پیرا و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت الشتر، بختیاری و همکاران (۱۳۹۴) در آبخوان دشت هشترگرد، آخوومه و همکاران (۱۳۹۴) در ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی دشت مرودشت خرامه استان فارس و بررسی‌های نوری و ملکیان (۱۴۰۲) مطابقت دارد.

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است بین بارش سالانه و مقدار شاخص بارش استاندارد رابطه مثبت برقرار است. به عبارت دیگر در سال‌هایی که مقدار بارش کاهش یافته

بررسی ارتباط شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص بارش استاندارد

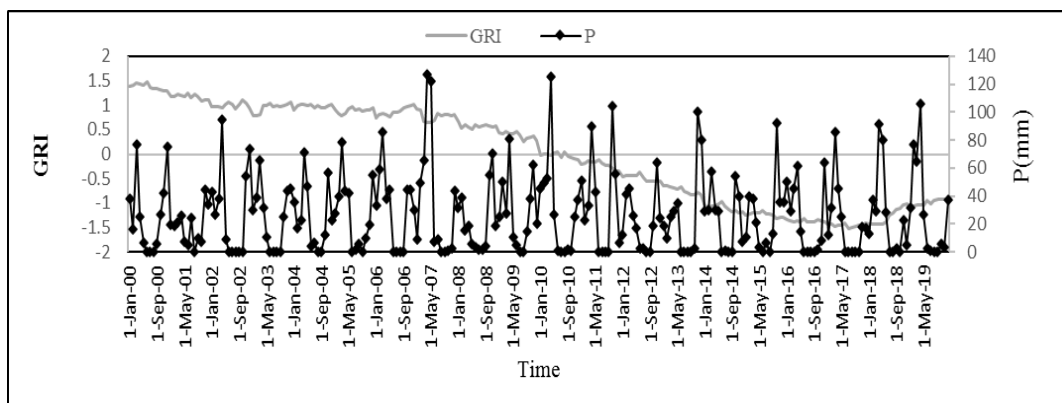
با تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نمودار همبستگی در مقایسه شاخص‌های بارش استاندارد و منبع آب زیرزمینی، مشخص شد که در طول بازه زمانی تحت بررسی، شاخص منابع آب زیرزمینی همراه با تشدید شدت خشکسالی افزایش یافت. علاوه بر این، ارتباط بین شاخص خشکسالی آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد در یک دوره ۲۰ ساله معنی‌دار نبود (با $P\text{-Value} = 0.053$ و مقدار $R^2 = 0.003$ ، در حالی که الگوی روند شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص بارش استاندارد ارتباط داشت. نمودار ارائه شده در زیر نشان می‌دهد (شکل ۸) که یک همبستگی قوی بین شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و بارش استاندارد در این زمینه وجود ندارد. نبود همبستگی قوی بین شاخص خشکسالی منابع آب زیرزمینی (GRI) و شاخص بارش استاندارد (SPI) عمدتاً به تأخیر زمانی در پاسخ منابع آب زیرزمینی به بارش، خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه (مانند نفوذپذیری و عمق سفره‌ها)، تأثیر فعالیت‌های انسانی (مانند برداشت بی‌رویه)، توزیع مکانی و زمانی نامناسب بارش، و مقیاس‌های زمانی متفاوت این شاخص‌ها بازمی‌گردد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که SPI تنها به تغییرات کوتاه‌مدت بارش توجه دارد، درحالی که GRI متأثر از تغییرات بلندمدت و عواملی غیر از بارش، مانند تغذیه

شاخص نیز کاهش یافته است و بالعکس؛ که با نتایج مطالعات عباسی‌نیا و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد.



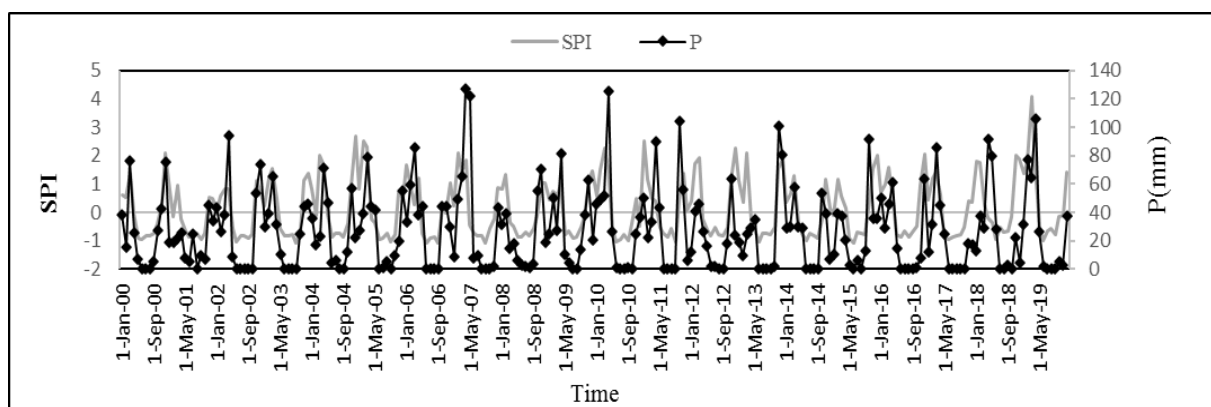
شکل ۸- نمودار رابطه تغییرات بین شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و بارش استاندارد.

Figure 8- The relationship of changes between GRI and SPI.



شکل ۹- نمودار رابطه تغییرات بین بارش و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی.

Figure 9- The relationship of changes between Rain and GRI.



شکل ۱۰- نمودار رابطه تغییرات بین بارش و شاخص بارش استاندارد.

Figure 10- The relationship of changes between Rain and SPI.

بنابراین داشتن یک کشاورزی پایدار نیازمند مدیریت و برنامه-

ریزی دقیق در مورد نحوه استفاده از این منابع است که این خود مستلزم داشتن شناخت کافی در مورد تغییرات مکانی

نتیجه‌گیری

آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین نیازهای کشاورزی بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود؛

کاهش ذخایر آبی دشت در درجه نخست به عوامل انسانی مربوط است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). اضافه برداشت و افت سطح آب زیرزمینی، روند رو به رشد تعداد چاه‌های بهره‌بردار و به دنبال آن افزایش برداشت و تخلیه از سفره آب زیرزمینی سبب افت مستمر سطح آب زیرزمینی دشت قره-دهگلان در دوره آماری مطالعه شده شده است.

منابع

احمدی آخوومه، م.، نوحه‌گر، الف.، سلیمانی‌مطلق، م.، طایی سمیرمی، م.، ۱۳۹۴. بررسی خشکسالی آب‌زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های SWI و GRI در آبخوان محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران ۶(۱): ۱۰۵-۱۱۸.

احمدی، ف.، رنجبر، ح.، ۱۳۹۱. بررسی افت سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان با استفاده از GIS. سی و یکمین همایش علوم زمین، ۱۱ آذر ۱۳۹۱، تهران.

ایزدی، ع.، داوری، ک.، عزیزاده، الف.، قهرمان، ب.، ۱۳۸۷. کاربرد مدل داده‌های ترکیبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۲(۲): ۱۳۳-۱۴۴.

ایمانی، م.، طالبی اسفندارانی، ع.، ۱۳۹۰. بررسی آثار خشکسالی بر تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی دشت بهاباد یزد با استفاده از شاخص‌های GRI, SPI. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۰. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

بختیاری، ب.، مهدوی، ن.، سیاری، ن.، ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت و بررسی تغییرات شاخص خشکی (AI) در چند نمونه اقلیمی ایران. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۱): ۱-۱۵.

بختیاری، ب.، ملکیان، الف.، سلاجقه، ۱۳۹۴. آنالیز همبستگی پایه زمانی و تأخیر زمانی بین خشکسالی اقلیمی و خشکسالی آب‌شناختی دشت هشتگرد. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۴): ۶۰۹-۶۱۶.

بهروزی خورگو، س.، قاسمی، س.، ۱۳۹۹. تعیین نوع اقلیم جزیره ابوموسی با استفاده از روش دومارتن. پنجمین همایش

سطح آب زیرزمینی در یک دوره زمانی مشخص است. آب‌های زیرزمینی در طی دهه‌های اخیر به دلیل برداشت بیش از تغذیه با کاهش کمی روبرو شده‌اند. در این مطالعه روند ارتباط سطح آب زیرزمینی با شاخص بارش استاندارد در دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل گردید: با توجه به نتایج به دست آمده و بررسی شاخص بارش استاندارد به دست آمده از اطلاعات پایگاه داده CHIRPS نشان داد که منطقه مورد مطالعه در خشکسالی نزدیک به نرمال طبقه‌بندی شد. نتایج طبقه‌بندی اقلیمی در سه ایستگاه سینوپتیک در منطقه نشان داد که این منطقه در طبقه نیمه‌خشک اقلیمی قرار دارد هرچند که با تداوم کاهش نزولات جوی پتانسیل این وجود دارد که این منطقه در طبقه اقلیمی خشک هم قرار بگیرد. شاخص منابع آب زیرزمینی در طول دوره آماری بیست ساله روندی نزولی به سمت خشکسالی دارد به طوری که از سال ۱۳۹۰ شاخص خشکسالی منفی شده و تا پایان دوره آماری این مقادیر ادامه دار است. نتایج به دست آمده از نقشه‌های هم‌پهنه افت، نشان داد که بیش‌ترین سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی سوم (۱۳۹۲-۱۳۹۷) در بخش جنوبی آبخوان به اندازه ۷/۳ متر، در دوره زمانی دوم (۱۳۹۲-۱۳۸۷) در بخش مرکزی آبخوان به اندازه ۵/۷ متر و در دوره زمانی اول (۱۳۸۷-۱۳۸۰) در بخش‌های شمالی و میانی به اندازه ۳/۳ متر افت پیدا کرده است. میانگین میزان تراز آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان در طول دوره آماری ۲۰ سال نشان داد بیشترین میزان افت مربوط به سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ است که نسبت به سال قبل خود با افت ۲/۸۵ متری مواجه شده است. تراز آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان در تمامی پیژومترها روند کاهشی داشته و افت تراز آب زیرزمینی کاهش چشم‌گیری داشته است. بررسی ارتباط بین دو شاخص نشان داد که این دو شاخص ارتباط معنی‌داری با یکدیگر ندارند در صورتی که در دوره‌های خشکسالی میزان تراز آب زیرزمینی کاهش و برعکس آن در دوره‌های ترسالی میزان تراز آب زیرزمینی در منطقه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از برقراری یک رابطه مثبت بین بارش سالانه و شاخص بارش استاندارد می‌باشد. یعنی در سال‌هایی که مقدار بارش افزایش یافته، مقدار شاخص بارش استاندارد نیز افزایش پیدا کرده است و برعکس. لازم به ذکر است که عدم همبستگی قوی بین GRI و SPI نشان‌دهنده پیچیدگی روابط بین منابع آب زیرزمینی و بارش است و بر لزوم در نظر گرفتن عوامل هیدروژئولوژیکی، انسانی، و مکانی در تحلیل‌ها تأکید می‌کند. به نظر می‌رسد سهم عمده

- بین المللی و یازدهمین همایش ملی گردشگری جغرافیا و محیط زیست پایدار. ۲۳ اسفند ۱۳۹۹. همدان.
- جهانشاهی، الف.، مقدم نیا، ع.، نهتانی، م.، ۱۴۰۱. ارزیابی اثر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SPI (مطالعه موردی: دشت شهر بابک، استان کرمان). مهندسی اکوسیستم بیابان، ۵(۱۰): ۸۵-۹۸.
- خسروی ده کردی، الف.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، صمدی بروجنی، ح.، قاسمی دستگردی، الف.ر.، ۱۳۹۸. پایش و پیش بینی خشکسالی های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکف. نشریه هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۱۱۱-۱۲۵.
- چمن پیرا، غ.، زهتابیان، غ.، احمدی، ح.، ملکیان، الف.، ۱۳۹۴. بررسی تاثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی به منظور مدیریت بهینه بهره برداری، مطالعه موردی: دشت الشتر. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۶(۱): ۱۰-۲۰.
- رحمتی، الف.، نظری سامانی، ع.الف.، مهدوی، ۱۳۹۶. ارزیابی کارایی روش تحلیل سلسله مراتبی در پیش بینی پتانسیل آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قروه-دهگلان). نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۰(۴): ۸۶۹-۸۷۹.
- زارعی، الف.، نکوئی اصفهانی، الف.، نوروزی الف.، کاکاپور، و زارعی، س.، ۱۳۹۸. شناسایی مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان دشت قروه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). فصلنامه زمین شناسی محیط زیست، ۱۳(۴۸): ۳۹-۵۱.
- زندى فر، س.، فیجانی، الف.، نعیمی، م.، خسروشاهی، م.، ۱۳۹۸. تغییرات زمانی و مکانی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی، مطالعه موردی: حوزه آبریز زهره- جراحی. مجله هیدروژئولوژی. ۲(۴): ۱۰۸-۱۳۰.
- صیف، م.، ۱۳۹۱. ارزیابی تاثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت فسا در استان فارس. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- عباسی نیا، ع.، مرشدی، ج.، ظهوریان، م.، قربانیان، ج.، ۱۴۰۰. تحلیل و مقایسه شاخص های SPI و GRI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی و آب های زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت مهران استان ایلام. جغرافیای طبیعی، ۱۴(۵۱): ۹۵-۱۱۴.
- عباسی، ف.، فرزاد مهر، ج.، چپی، ک.، بشیری، م.، آذرخشی، م.، ۱۳۹۵. تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و ارتباط آن با خشکسالی. هیدروژئولوژی، ۱(۲): ۱۱-۲۳.
- غلامی، س.، فرج زاده، م.، قویدل، ی.، ۱۴۰۲. بررسی تطبیقی عملکرد پایگاه های داده CHIRPS و ERA5-Land در آشکارسازی خشکسالی های ایران. فصل نامه جغرافیای طبیعی. ۱۵(۶۱): ۱-۲۲.
- فرد مرادی نیا، س.، باقری، ا.، جانی، ر.، فلسفیان، ا.، ۱۴۰۳. تحلیل و بررسی شاخص های خشکسالی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: روستای ماهنشان از توابع استان زنجان. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران، ۱۸(۶۵): ۸۴-۷۴.
- فروتن، الف.، گلپایگانی، ف.، ۱۳۹۹. بررسی رابطه تغییرات آب زیرزمینی و شاخص خشکسالی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شریف آباد در استان قم). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۵): ۲۵۵-۲۶۵.
- مزیدی، الف.، عنایت پور، م.، حسینی، س.، ۱۴۰۰. تعیین اقلیم استان کرمان با استفاده از روش های منحنی آمبروترمیک، ضریب خشکی دومارتن، اقلیم نمای آمبروزه. جغرافیا و روابط انسانی، ۴(۲): ۳۵-۴۳.
- محمدی، ص.، ناصری، ف.، نظری پور، حمید.، ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی و اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از شاخص های بارش استاندارد (SPI) و منابع آب زیرزمینی (GRI). اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۱۱-۲۲.
- میراکبری، م.، مرتضایی فریزهندی، ق.، محسنی ساروی، م.، ۱۳۹۷. بررسی تاثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط شاخص های SDI، SPEI، SPI و GRI. نشریه علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۲(۴۲): ۷۰-۸۱.

GIS. The 31st Symposium of Geosciences, 2 December 2012, Tehran. [In Persian]

Bakhtiari, B., Mahdavi, N., Siari, N., 1400. Sensitivity analysis and investigation of Aridity Index (AI) changes in several climatic samples of Iran. Iran-Water Resources Research, 17(1): 1-15. [In Persian]

Bakhtiari, B., Malekian, A., Salajegheh, 1394. Analysis of time base correlation and time lag between climatic drought and hydrological drought in Hashtgerd plain. Iranian Journal of Soil and Water Research, 46(4): 609-616. [In Persian]

Behrooz Khorgou, S., Ghasemi, S., 1399. Determining the climate type of Abu Musa Island using the De Martonne method. The 5th International and 11th National Conference on Tourism, Geography and Sustainable Environment. 13 March 2021. Hamadan. [In Persian]

Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N., 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8(4), 289-302.

Chamanpira, Gh., Zehtabian, Gh., Ahmadi, H., Malekian, A., 1394. Investigating the impact of drought on groundwater resources for optimal management of exploitation, case study: Alshater plain. Watershed Engineering and Management. 6(1): 10-20. [In Persian]

Das, P., Zhang, Z., Ren, H., 2022. Evaluating The Accuracy of Two Satellite-Based Quantitative Precipitation Estimation Products and Their Application for Meteorological Drought Monitoring Over the Lake Victoria Basin, East Africa. Geospatial Information Science, 25(3), 500-518.

De Martonne, E., 1926. A new climatological function: The Aridity Index. Gauthier-Villars, Paris, France, 485.

Deniz, A., Toros, H., Incecik, S., 2011. Spatial variations of climate indices in Turkey. International Journal of climatology, 31(3), 394-403.

Fard Moradi Nia, S., Bagheri, A., Jani, R., Falsafian, A., 1403. Analysis and investigation of hydrological drought indices (Case study: Mahenshan village, Zanjan province). Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 18(65):74-84. [In Persian]

Forootan, A., Golpayegani, F., 1399. Investigating the relationship between groundwater changes and drought index (Case study: Sharifabad watershed in Qom province). Environmental Science and Technology Quarterly, 22(5), 255-265. [In Persian]

میریعیقوبزاده، م.ح.، خسروی، س.ا.، ذبیحی، م.، ۱۳۹۸. مروری بر شاخص‌های خشکسالی و بررسی عملکرد آن‌ها. آب و توسعه پایدار. ۶(۱)، ۱۱۲-۱۰۳.

نوری، ز.، ملکیان، ا.، ۱۴۰۲. پهنه‌بندی شدت خشکسالی‌های هیدروژئولوژیک در مناطق خشک و ارتباط آن با خشکسالی‌های هواشناسی (مطالعه موردی: دشت گرمسار). نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۶(۲): ۱۰۶-۱۱۴.

یاسمنی، س.، محمدزاده، ح.، مساعدی، الف.، ۱۳۹۱. بررسی اثر خشکسالی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت تربت جام - فریمان با بکارگیری شاخص‌های GRI و SPI. شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. ۱۴ شهریور ۱۳۹۱. شیراز. ایران.

یوسفی مبرهن، الف.، زندی‌فر، س.، ۱۴۰۲. پهنه‌بندی تغییرات افت سطح آب زیرزمینی و پایش زمانی خشکسالی در دشت قروه-دهگلان. سامانه‌های سطوح آبگیر باران (علمی - پژوهشی)، ۱۱(۱)، ۳۵-۱۷.

یوسفی مبرهن، الف.، زندی‌فر، س.، ۱۴۰۲. بررسی و پایش زمانی شاخص GRI بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت زنجان). حفاظت منابع آب و خاک (علمی - پژوهشی)، ۱۲(۴)، ۸۷-۹۹.

References

Abbasi, F., Farzadmehr, J., Chapi, K., Bashiri, M., Azarkhshi, M., 1395. Temporal and spatial variations of qualitative parameters of groundwater in Ghorveh and Dehgolan plains and its relationship with drought. Hydrogeology, 1(2), 11-23. [In Persian]

Abbasinia, A., Morshedi, J., Zohourian, M., Ghorbanian, J., 1400. Analysis and comparison of SPI and GRI indices in the assessment of meteorological and groundwater droughts, case study: Mehran plain, Ilam province. Physical Geography, 14(51), 95-114. [In Persian]

Ahmadi Akhoormeh, M., Nouhgar, A., Soleimani Motlagh, M., Taei Samiromi, M., 1394. Investigation of groundwater drought using SWI and GRI indices in the aquifer of the Marvdasht-Khorrameh study area, Fars province. Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering 6(1): 105-118. [In Persian]

Ahmadi, F., Ranjbar, H., 1391. Investigation of groundwater level decline in the Dehgolan plain using

Ambrothermic curve method, De Martonne aridity index, and Emberger climate index. *Geography and Human Relationships*, 4(2): 35-43. [In Persian]

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22): 179-183.

Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302.

Mianabadi, A., Salari, K., Pourmohamad, Y., 2022. Drought Monitoring Using the Long-Term Chirps Precipitation Over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(1), 183.

Mirakbari, M., Mortazaei Farizhendi, Gh., Mohseni Saravi, M., 1397. Investigation of the impact of meteorological drought on surface and groundwater resources using SDI, SPEI, SPI and GRI indices. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(42): 70-81. [In Persian]

Miri Yaghoobzadeh, M.H., Khosravi, S.A., Zabihi, M., 1398. A review of drought indices and an examination of their performance. *Water and Sustainable Development*. 6(1), 103-112. [In Persian]

Mohammadi, S., Naseri, F., Nazaripour, H., 1397. Investigation of temporal variations and the effect of meteorological drought on groundwater resources of Kerman plain using Standardized Precipitation Index (SPI) and Groundwater Resources Index (GRI). *Ecohydrology*, 5(1), 11-22. [In Persian]

Nouri, Z., Malekian, A., 1402. Zoning the intensity of hydrogeological droughts in arid regions and its relationship with meteorological droughts (Case study: Garmsar plain). *Journal of Range and Watershed Management*, 76(2): 106-114. [In Persian]

Rahmati, A., Nazari Samani, A.A., Mahdavi., 1396. Evaluation of the efficiency of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method in predicting groundwater potential (Case study: Ghorveh-Dehgolan plain). *Journal of Range and Watershed Management*, 70(4), 869-879. [In Persian]

Sarlak, N., Mahmood Agha, O.M., 2018. Spatial and temporal variations of aridity indices in Iraq. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 89-99.

Sayf, M., 1391. Evaluation of the impact of drought on groundwater resources of the Fasa plain aquifer in Fars province. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. [In Persian]

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., et Al., 2015. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Sci Data* 2, 150066.

Gao, F., Zhang, Y., Ren, X., et Al., 2018. Evaluation Of Chirps and Its Application for Drought Monitoring Over the Haihe River Basin, China. *Natural Hazards*, 92(1), 155-172.

Gholami, S., Farajzadeh, M., Ghavidel, Y., 1402. Comparative evaluation of the performance of CHIRPS and ERA5-Land data bases in revealing droughts in Iran. *Physical Geography Quarterly*. 15(61):1-22. [In Persian]

Imani, M., Talebi Esfandarani, A., 1390. Investigating the effects of drought on changes in the groundwater level of the Bahabad plain, Yazd, using GRI and SPI indices. The 4th Iranian Water Resources Management Conference, 3 May 2011. Amirkabir University of Technology, Tehran. [In Persian]

Izadi, A., Davari, K., Alizadeh, A., Ghorbani, B., 1387. Application of composite data models in predicting groundwater level. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(2): 133-144. [In Persian]

Jahanshahi, A., Moghaddam Nia, A., Nahtani, M., 1401. Evaluation of the effect of drought on groundwater resources using the SPI index (Case study: Shahre Babak plain, Kerman province). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5 (10): 85-98. [In Persian]

Jahanshahi, A., Shahedi, K., 2018. Evaluation of meteorological, hydrological and groundwater resources indicators for drought monitoring and forecasting in a semi-arid climate. *Desert*, 23(1), 29-43.

Javadinejad, S., Dara, R., Jafary, F., 2020. Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical and future droughts and their impact on groundwater. *Resources Environment and Information Engineering*, 2(1), 71-83.

Khan, S., Gabriel, H.F., Rana, T., 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage Systems*, 22, 159-177.

Khosravi Dehkordi, A., Mirabbasi Najafabadi, R., Samadi Boroujeni, H., Ghasemi Dastgerdi, A.R., 1398. Monitoring and forecasting groundwater droughts in the Shahrekord plain using the GRI index and Markov chain model. *Hydrogeology Journal*, 4(1): 111-125. [In Persian]

Mazidi, A., Enayatpour, M., Hosseini, S., 1400. Determining the climate of Kerman province using the

Environmental Geology Quarterly, 13(48), 39-51. [In Persian]

Shahid, S., Hazarika, M. K., 2010. Groundwater drought in the northwestern districts of Bangladesh. Water resources management, 24, 1989-2006.

Van Lanen, H.A., Peters, E., 2000. Definition, effects and assessment of groundwater droughts. In Drought and drought mitigation in Europe (pp. 49-61). Dordrecht: Springer Netherlands.

Villholth, K.G., Tøttrup, C., Stendel, M., Maherry, A., 2013. Integrated mapping of groundwater drought risk in the Southern African Development Community (SADC) region. Hydrogeology Journal, 21(4), 863-885.

Yasmini, S., Mohammadzadeh, H., Mosaedi, A., 1391. Investigating the effect of drought on groundwater level changes in Torbat Jam – Fariman plain using GRI and SPI indices. The 16th Symposium of the Geological Society of Iran. 4 September 2012. Shiraz. Iran. [In Persian]

Yousefi Mobarhan, A., Zandifar, S., 1402. Investigation and temporal monitoring of GRI index on groundwater level fluctuations (Case study: Zanjan plain). Protection of Water and Soil Resources (Scientific-Research), 12(4), 87-99. [In Persian]

Yousefi Mobarhan, A., Zandifar, S., 1402. Zoning of groundwater level decline changes and temporal monitoring of drought in Ghorveh-Dehgolan plain. Rainwater Catchment Systems (Scientific-Research), 11(1), 17-35. [In Persian]

Yousefi Mobarhan, E., Karimi Sangchini, E., 2021. Continuous Rainfall-Runoff Modeling Using HMS-SMA with Emphasis on the Different Calibration Scale. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 52 (2): 112-119.

Yousefi Mobarhan, E., Khaleghi, A., Zandifar, S., 2024. Examining the evolving patterns of recent droughts and climate categorization's impact on groundwater reserves through the utilization of GRI and SPI indices in the southern plain of the Sefidroud Basin, Iran, PREPRINT (Version 1) available at Research Square.

Zandifar, S., Fijani, A., Naeimi, M., Khosroshahi, M., 1398. Temporal and spatial variations of groundwater drought index, case study: Zohreh-Jarrahi basin. Hydrogeology Journal. 2(4): 108-130. [In Persian]

Zarei, A., Nekoe Isfahani, A., Norouzi A., Kakapour, V., Zarei, S., 1398. Identification of recharge and discharge areas of the Ghorveh plain aquifer using Geographic Information System (GIS).

فرآیندهای هیدروشیمی در آبخوان های بهبهان، رامهرمز و زیدون استان خوزستان با استفاده از نمودارهای ترکیبی و ایزوتوپی

هادی محمدی^۱، نصراله کلانتری^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳، علی محرابی نژاد^۴

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استادیار، گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران.

۴- دانش آموخته سنجش از دور، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: n.kalantari@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

چکیده

به منظور شناسایی عوامل اصلی تغییرات هیدروشیمی و بررسی فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل کننده آب زیرزمینی در دشت های بهبهان، رامهرمز و زیدون جنوب شرق استان خوزستان از روش تلفیقی هیدروشیمی و ایزوتوپی استفاده شده است. در این تحقیق از نمودارهای ترکیبی کل جامدات محلول (TDI) در مقابل یون های عمده، نمودار تبادل کاتیونی و نمودارهای ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) استفاده شده است. نتایج حاصل از نمودارهای ترکیبی، فرآیندهای اصلی انحلال در آبخوان ها ابتدا به انحلال سولفات و سپس کلراید مربوط می باشد. با افزایش TDI، غلظت سولفات به طور خطی افزایش می یابد. این رابطه خطی بین یون های سولفات و کلسیم نیز وجود دارد که نشان دهنده فرآیند انحلال ژپس در آب زیرزمینی دشت های مورد مطالعه است. با این تفاوت که میزان سولفات در نمونه های آب دشت ها به صورت رامهرمز < بهبهان < زیدون می باشد. روند خطی بسیار خوب در نمودار سدیم در مقابل کلراید در دشت زیدون نسبت به دشت رامهرمز و بهبهان مشاهده می شود که این موضوع نیز مؤید انحلال هالیت در منطقه مورد مطالعه است. یافته های ایزوتوپی نشان می دهند که غنی شدگی ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در دشت رامهرمز بیشتر از سایر مناطق است و نمونه های این دشت در مقدار دوتریوم مازاد (D-excess) به وضوح اثر تبخیر شدید را نشان می دهند. رابطه مستقیم بین افزایش کلراید و غنی شدگی ایزوتوپی در دشت رامهرمز تأیید کننده اثر فرآیندهای تبخیری است، در حالی که در دشت زیدون این رابطه ضعیف تر است. فرآیندهای هیدروژئوشیمی غالب در آبخوان های مورد مطالعه به ترتیب غالب بودن در حالت کلی شامل انحلال کانی های تبخیری ژپس و سپس هالیت، انحلال کربنات ها، تبخیر و در نهایت تبادل کاتیونی نرمال و معکوس (به طور موضعی) می باشند.

کلمات کلیدی: ایزوتوپ های پایدار، بهبهان، تبادل یونی، رامهرمز، زیدون، نمودارهای ترکیبی.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی تنها منبع قابل اعتماد آب برای اهداف زیست محیطی و اقتصادی به ویژه در مناطق خشک هستند (Dogramaci and Skrzypek, 2015; Zarei et al., 2013). با توجه به کمبود منابع آب در بسیاری از نقاط جهان، مدیریت کمی و کیفی آبخوان ها امری ضروری است. کیفیت و ترکیب شیمیایی آب بستگی به محیط، شرایط و فرآیندهایی دارد که در هنگام عبور از حوضه بر آن تأثیر می گذارند. از جمله عوامل مؤثر بر تکامل ژئوشیمیایی آب های زیرزمینی می توان به زمان ماندگاری آب، موادی که در واکنش های آب-سنگ حضور دارند و وقوع اختلاط میان منابع مختلف آب اشاره نمود (He

فرآیندهای فیزیکوشیمیایی بین آب زیرزمینی و محیط اطراف قابل تغییر می‌باشند. این ویژگی باعث می‌شود که اثر اصلی خود را حفظ کنند. این روش برای ارزیابی زمان‌ها و مسیرهای جریان و همچنین میزان اختلاط با آب‌های زیرزمینی و شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمی در سراسر جهان مؤثر است (Asomaning et al., 2023). در سال‌های اخیر، کاربرد ترکیبی و اعتبار متقابل این روش‌ها به‌عنوان یک نقطه توجه در تحقیقات فعلی در مورد هیدرووشیمی آب‌های زیرزمینی و هیدروژئولوژی پدیدار شده است (Ji et al., 2024). فنون هیدرووشیمی و ایزوتوپی به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی منابع تغذیه آب زیرزمینی، ویژگی‌های هیدرووشیمی، منابع آلودگی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال Bryan et al., (2016) با استفاده از هیدرووشیمی و ایزوتوپ‌ها ($D-^{18}O$, ^3H) نفوذ آب دریا به لنزهای آب شیرین را در جزیره روتنست، استرالیا را مورد بررسی قرار دادند. (Esmacili et al., 2018) عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت قره ضیال‌الدین در استان آذربایجان غربی را بررسی نمودند. نتایج مدسازی‌های ژئوشیمیایی معکوس، وقوع فرآیندهای هوازدهی، انحلال کانی‌های کربناته، سولفات، هالیت و تبادل یونی را در بخش‌های مختلف آبخوان تأیید می‌کرد و شاخص‌های کلروآلکالین محاسبه شده، نشانگر وقوع تبادل یونی عادی بود. نمونه‌های آب نسبت به کانی‌های کربناته و کوارتز حالت فوق اشباع داشتند؛ درحالی‌که نسبت به کانی‌های سولفات و هالیت تحت اشباع بودند. (Akshitha et al., 2021) با استفاده از تحلیل هیدرووشیمی و روش‌های آماری چند متغیره، عوامل کنترل‌کننده غالب ویژگی‌های هیدرووشیمی و نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی کارناتاکا هند را نشان داد. (Chen et al., 2023) شرایط هیدروژئولوژی و تکامل هیدرووشیمی سیستم آبخوان چند لایه جزیره دونگهای چین با استفاده از شیمی آب زیرزمینی و ایزوتوپ‌های پایدار مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که یون‌های اصلی و کل مواد جامد محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی کم‌عمق بیشتر از آب‌های زیرزمینی محصور است و این آبخوان‌ها تحت تأثیر نفوذ قابل توجه آب دریا قرار نگرفته‌اند. بررسی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸،

et al., 2019; Ledesma-Ruiz et al., 2015; همکاران، ۱۴۰۰). به‌عنوان مثال، اجزای شیمیایی ماده معدنی و منبع تغذیه آب زیرزمینی، ویژگی‌های شیمیایی اصلی آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند. شدت بارندگی بر میزان هوازدهی سطح تأثیر می‌گذارد (Gabet et al., 2010). تبخیر شدید و تغذیه محدود بارندگی می‌تواند منجر به شوری آب‌های زیرزمینی کم عمق شود. همچنین مسیر جریان طولانی و افزایش زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی نیز باعث شور شدن آب‌ها و تغییر در نوع آب از بیکربناته به سولفات و کلروره می‌شود. انواع برهمکنش‌های آب / سنگ^۱ در جهت تکامل هیدرووشیمی آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهند و تغییرات ناشی از انسان در شرایط جریان آب زیرزمینی نیز می‌تواند تأثیر غیرقابل اغماض بر هیدرووشیمی آب زیرزمینی داشته باشد (Chen et al., 2023). به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد هر عاملی که غلظت یون‌ها در آب را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند کیفیت آب را تغییر دهد (Kwong et al., 2015; Liu et al., 2016).

در تعیین فرآیندهای هیدرووشیمی منابع آب زیرزمینی از روش‌ها و ابزارهای مختلفی ازجمله بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه، روش‌های گرافیکی، نمودارهای ترکیبی، روش‌های آماری و استفاده از ایزوتوپ‌های محیطی و مطالعات تجربی استفاده شده است (Han et al., 2014; Kazakis et al., 2016). استفاده از تکنیک نمودار ترکیبی برای بررسی چارچوب هیدروژئوشیمی سیستم آبخوان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Afriha et al., 2017; Asare-Donkor et al., 2018; Edjah et al., 2017; Egbi et al., 2019; Grzywna and Bronowicka-Mielniczuk, 2020).

اتحادیه هیدروژئولوژی جهانی طی سال‌های گذشته شاهد توسعه و کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در چندین رشته بوده است که شامل درک تکامل ژئوشیمیایی منابع آب است. ایزوتوپ‌های پایدار آب ($\delta^{18}O$ و δ^2H) دارای کاربرد ارزشمندی برای توصیف هیدرووشیمی هستند (Ala-Aho et al., 2018; Klaus and McDonnell, 2013). این تکنیک به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است زیرا $\delta^{18}O$ و δ^2H آب معمولاً نشان‌دهنده منشأ اولیه خود می‌باشند و در طبیعت تحت تأثیر

¹Water/rock interaction

در شرق امیدیه و بین طول جغرافیایی $۵۰^{\circ} ۰۴'$ تا $۵۰^{\circ} ۲۴'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۰^{\circ} ۳۰'$ تا $۳۰^{\circ} ۵۱'$ شمالی واقع است. آبخوان بهبهان از نوع آزاد است و جنس رسوبات آن، آبرفتی و عمدتاً دانه درشت و حاوی ذرات رس، سیلت و مارن می‌باشد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۳). آبخوان‌های مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی یکپارچه جنوب شرق ایران با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی یک‌صد هزارم بهبهان، هفتکل، آغاچاری و بندر دیلم شرکت ملی نفت ایران استخراج شده است (Geological and Exploration Division, 1966; Geological and Exploration Division, 1970). رسوبات آبرفتی دشت عمدتاً در پای ارتفاعات آهکی شرق و شمال دشت و تپه‌های کنگلومرایی جنوب و شمال غرب دشت، درشت دانه بوده که با روند سریعی به رسوبات ماسه ریزدانه در بخش میانی و سیلت رس در قسمت خروجی دشت (غرب دشت) تغییر می‌یابد. نهشته‌های کواترنری به‌صورت واریزه‌های دامنه‌ای در پای ارتفاعات و آبراهه‌ها و سپس نهشته‌های آبرفتی شامل قلوه‌سنگ، شن و ماسه به‌صورت پادگانه‌های آبرفتی و مخروط-افکنه‌ها در راستای دره‌های بزرگ تا میانه دشت قرار دارند. آبخوان رامهرمز بین طول جغرافیایی $۴۹^{\circ} ۱۱'$ تا $۴۹^{\circ} ۴۱'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۱^{\circ} ۰۹'$ تا $۳۱^{\circ} ۳۶'$ شمالی قرارگرفته است. این دشت یکی از ناودیس‌های زاگرس چین‌خورده است که در بخش شرقی تا شمال آن گسل تراستی رامهرمز، سازند گچساران را بر روی رسوبات آبرفتی عهد حاضر رانده است. رخنمون سازنده‌های منطقه شامل مارن و گچ سازند گچساران، تناوب مارن و ماسه سنگ آغاچاری و لهری و سازند بختیاری می‌باشد. آبخوان آبرفتی رامهرمز در بخش شمالی تا مرکز به جز در برخی نقاط در شمال که در نزدیکی سازند بختیاری واقع شده است، عمدتاً متشکل از رسوبات ریزدانه رس و سیلت می‌باشد. این رسوبات در ناحیه جنوبی با نزدیک شدن به سازند بختیاری درشت‌دانه شده و عمدتاً از ماسه و کنگلومرا تشکیل شده‌اند. البته وجود لنزهای گراولی در بین لایه‌های ریزدانه حاصل از آورد رودخانه اعلا در اطراف مسیر فعلی رودخانه و در کانال‌های رودخانه‌ای مدفون وجود دارد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲). آبخوان زیدون نیز در بین طول جغرافیایی $۴۹^{\circ} ۴۶'$ تا $۵۰^{\circ} ۱۷'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۰^{\circ} ۱۶'$ تا $۳۰^{\circ} ۳۳'$ شمالی واقع گردیده است. آبخوان دشت زیدون از

دوتریوم و دوتریوم مازاد (D-excess) نشان داد که آب‌های زیرزمینی کم‌عمق از بارش محلی نشأت می‌گیرند و دوره تغذیه آب‌های زیرزمینی محبوس با آب‌های کم‌عمق متفاوت است. تکامل آب‌های زیرزمینی حوضه رودخانه بلک ولتا با استفاده از تحلیل آماری و ایزوتوپی توسط (Asomaning et al., 2023) مورد بررسی قرار گرفت که فرآیندهای ژئوشیمیایی طبیعی، تأثیرات انسانی و انحلال اجزای سیلیکات از عوامل مؤثر در کیفیت آب معرفی شدند. نتایج حاصل از بررسی منشأ و مکانیسم‌های کنترل‌کننده کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمی و نمودارهای ترکیبی توسط (Ghorbanzadeh et al., 2024) نشان داد که یون سدیم محلول در آبخوان ارومیه دارای دو منشأ تبادلات یونی مستقیم و تبادلات یونی معکوس، یون منیزیم ناشی از سه منشأ فرآیند هوازدگی دولومیت، انحلال دولومیت-سنگ آهک و انحلال دولومیت، یون سولفات دارای منشأ غیرطبیعی و متأثر از کودهای کشاورزی و دفع فاضلاب‌های جذبی بوده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند هنگامی که تفسیرهای هیدروژئوشیمی با دانش زمین‌شناسی و اطلاعات هیدروژئولوژیکی ترکیب می‌شوند، روش‌های آماری و ایزوتوپی نیز می‌توانند به درک جریان و فرآیندهای غالب در سیستم پیچیده آبخوان کمک کنند (Cloutier et al., 2008).

هدف اصلی این مطالعه، شناسایی خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل‌کننده عمده در آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در جنوب شرقی استان خوزستان با استفاده از نمودارهای ترکیبی و ایزوتوپ‌های پایدار است. این مطالعه در نظر دارد تا تفاوت فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل‌کننده در تکامل شیمی آب‌های زیرزمینی را در آبخوان‌های مذکور را با تلفیق روش‌های گرافیکی (نمودارهای ترکیبی) و ایزوتوپ‌های پایدار در ارتباط با هدایت الکتریکی و یون کلراید شناسایی کند.

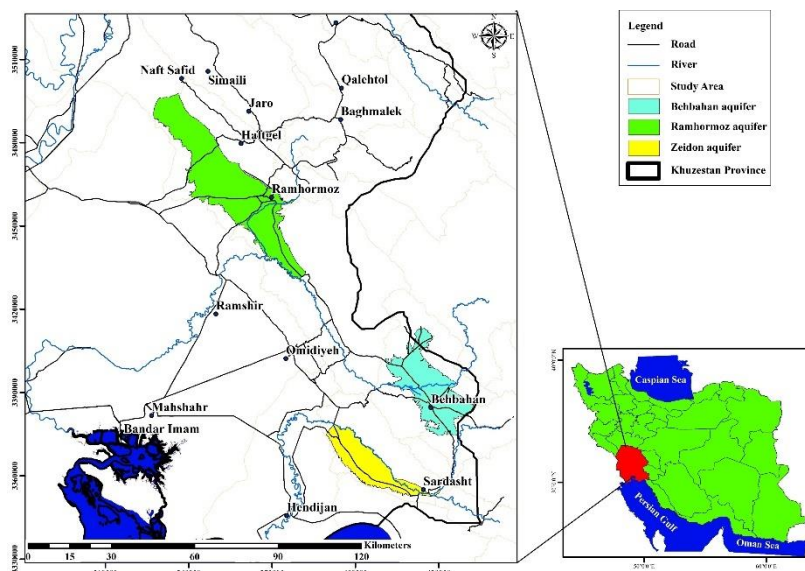
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شامل آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در جنوب شرق استان خوزستان می‌باشند (شکل ۱). آبخوان بهبهان با مساحت ۴۸۵ کیلومتر مربع،

نهشته‌های آبرفتی شامل قلوه‌سنگ، شن و ماسه به صورت پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌ها در راستای دره‌های بزرگ قرار دارند (فیروزی و همکاران، ۱۴۰۲). جهت شناخت بیشتر خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان و وضعیت هیدروژئولوژی می‌توان به منابع فوق‌الذکر مراجعه نمود.

شمال شرق به راندگی پازنان و تاقدیس پازنان محدود می‌گردد (مرز شمالی) و از جنوب غرب توسط لایه‌های سازند بختیاری و تاقدیس رگ‌سفید محدود می‌گردد (مرز جنوبی). در این دشت سازندهای گروه فارس و کنگلومرای بختیاری و رسوبات عهد حاضر رخنمون دارند. نهشته‌های کواترنر به صورت واریزه‌های دامنه‌ای در پای ارتفاعات و آبراهه‌ها و سپس



شکل ۱- نقشه موقعیت آبخوان‌های مورد مطالعه در جنوب شرق خوزستان.

Figure 1- Map of the Location of the Studied Aquifers in Southeastern Khuzestan.

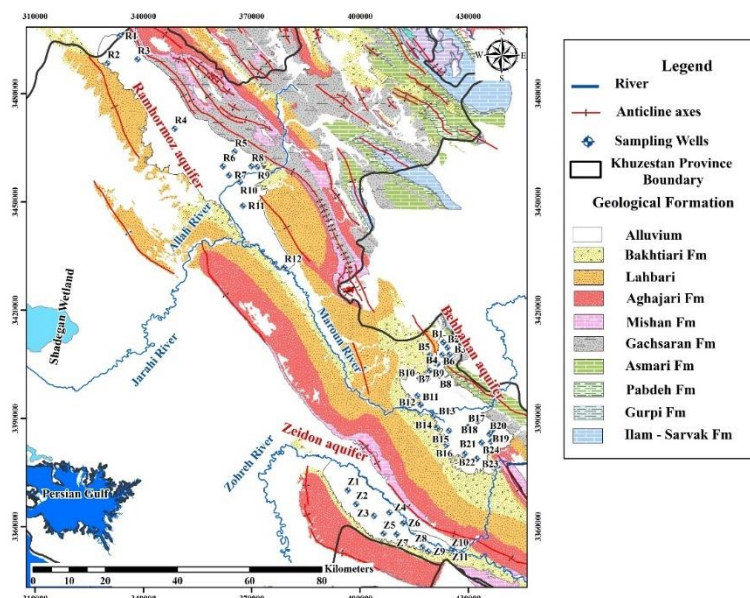
جمع‌آوری داده

سدیم، کربنات، بی‌کربنات و کلرید به صورت تیتراسیون، منیزیم و پتاسیم به روش فلومتری و سولفات با استفاده اسپکتوفتومتری DR2500 می‌باشد. نمونه‌های آب برای آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار آب قبل از جمع‌آوری در بطری‌های پلی‌اتیلن استریل ۵۰ میلی‌لیتری با استفاده از فیلترهای سر سرنگی ۰/۴۵ میکرون فیلتر شدند. نمونه‌های مربوط به ایزوتوپ‌های آب تا زمان آنالیز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و در یخچال نگهداری شدند. برای آنالیز $\delta^{18}\text{O}$ ، نمونه‌های آبی در تعادل با گاز CO_2 قرار گرفته و گاز CO_2 حاصله از طریق دستگاه ورودی دوگانه (Dual-Inlet) به اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی وارد شده و نسبت $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ آن با اندازه‌گیری نسبت پرتوهای مولکولی ^{46} به ^{44} مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در مورد اندازه‌گیری δD ، نمونه آب در حضور کاتالیست پلاتین با گاز H_2 به تعادل رسیده و گاز H_2 حاصله پس از رطوبت‌زدایی به دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی تزریق شده و نسبت D/H آن با اندازه‌گیری پرتوهای مولکولی

یکی از بخش‌های مهم مطالعات هیدروشیمی نمونه‌برداری از منابع آب است، چون اگر به درستی انجام نشود می‌تواند موجب اشتباه در تمام مراحل بعدی باشد. جهت شناخت سیستم ژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دو نوبت (آبان ۱۴۰۱ و اردیبهشت ۱۴۰۲) نمونه‌برداری به عمل آمد. تعداد نمونه‌های برداشت شده در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون به ترتیب ۲۴، ۱۲ و ۱۲ نمونه می‌باشد (شکل ۲). ایستگاه‌های نمونه‌برداری با توجه به توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری در دشت‌های مذکور، به نحوی انتخاب شدند که بهترین پراکنش را در سطح دشت داشته باشند. سنجش نمونه‌های آب از طریق سنجش‌های صحرایی (اندازه‌گیری پارامترهای دما، هدایت الکتریکی و pH) و آزمایشگاهی هیدروشیمی یون‌های عمده (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), HCO_3^- و CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ در آزمایشگاه شيراز و آنالیزهای ایزوتوپی برای یک فصل در آزمایشگاه مصباح انرژی انجام شده است. روش اندازه‌گیری کلسیم،

H₂ و HD مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها از روش خطای واکنش استفاده شده است. در این روش مجموع اکی‌والان کاتیون‌ها و آنیون‌های هر محلول باید با هم برابر و یا در محدوده خطای قابل قبول (کمتر از $\pm 5\%$ درصد) باشد که در

تمامی نمونه‌ها خطای واکنش در محدوده مجاز بوده است. خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی و ایزوتوپی نمونه‌های آب آبخوان‌های مورد مطالعه به‌ترتیبی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در آبخوان‌های مورد مطالعه (رقومی شده بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی یک صد هزارم شرکت ملی نفت ایران).

Figure 2- Location of sampling stations in the studied aquifers (Digitized based on the geological maps of the National Iranian Oil Company).

جدول ۱- خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی در آبخوان‌های مورد مطالعه (آبان ماه ۱۴۰۱).

Table 1- Statistical summary of the results chemical analysis in the studied aquifers (November, 2022).

Parameter	Aquifer	pH	EC	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl
			$\mu\text{m}/\text{cm}$	mg/l					meq/l		
Number of samples	Behbahan	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mean		7.19	3154	2053.21	13.9	7.43	9.54	0.16	4.18	17.94	9.49
Standard deviation		0.23	1535.68	988.58	6.94	4.43	6.41	0.1	0.73	11.73	6.16
Maximum		7.7	6128	4043	25.67	17.61	24.6	0.59	5.7	40.14	22.03
Minimum		6.94	770	530.84	3.5	1.05	2.59	0.08	2.88	1.25	2.95
Number of samples	Ramhormoz	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Mean		7.27	5084	3330.5	20.79	9.47	20.22	0.19	3.12	31.31	17.88
Standard deviation		0.26	1964.7	1224.25	3.23	5.5	15.17	0.13	1.12	13.18	10.02
Maximum		7.77	10965	6994	25	22	69.36	0.44	4.73	60	49
Minimum		6.98	3350	2280	15.81	4.8	9.22	0.09	1.25	18.5	5.75
Number of samples	Zeidon	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Mean		7.21	4263.64	2764.73	12.8	5.46	25.6	0.14	3.2	15.01	26.33
Standard deviation		0.12	1466.41	965.27	3.6	2.34	12.06	0.05	0.42	5.85	12.93
Maximum		7.4	7162	4723	18.8	9.75	51.1	0.2	3.8	25.5	48.39
Minimum		7.02	1813	1160	8.14	2.35	4.29	0.05	2.53	8.75	4.79

جدول ۲- خلاصه آماری نتایج ایزوتوپی در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Table 2- Statistical summary of isotopic results in the studied aquifers.

Parameter	Aquifer	D/H	¹⁸ O/ ¹⁶ O
		permil	
Number of samples	Behbahan	14	14
Mean		-15.18	-3.26
Standard deviation		3.44	0.67
Maximum		-9.68	-2.18

Minimum	-21.84	-4.57
Number of samples	11	11
Mean	-14.88	-2.99
Standard deviation	3.74	0.74
Maximum	-7.57	-1.34
Minimum	-20.64	-4
Number of samples	7	7
Mean	-16.53	-3.45
Standard deviation	2.21	0.39
Maximum	-12.51	-2.93
Minimum	-20.17	-4.19

نتایج و بحث

نمودارهای ترکیبی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی

نمودارهای دو متغیره کل یون‌های محلول (TDI) در مقابل سایر یون‌های عمده برای آبخوان‌های آبرفتی بهبهان، رامهرمز و زیدون در شکل ۳ ارائه شده است. فرآیندهای اصلی انحلال مربوط به انحلال سولفات و کلراید می‌باشد. در مناطق مورد مطالعه با افزایش TDI، غلظت سولفات به طور خطی افزایش می‌یابد. این رابطه خطی بین یون‌های سولفات و کلسیم نیز وجود دارد که نشان‌دهنده فرآیند انحلال ژپس در آب زیرزمینی دشت‌های مورد مطالعه است با این تفاوت که میزان سولفات در نمونه‌های آب دشت‌ها به صورت رامهرمز < بهبهان < زیدون می‌باشد. همچنین این ارتباط خطی در یون منیزیم نیز دیده می‌شود. منشأ اصلی افزایش غلظت منیزیم را می‌توان به رخداد دولومیتیزاسیون^۲ نسبت داد که رخداد غالب در آب‌های کربناته - کلسیکی است که در مسیر جریان با رسوبات گچی نیز در تماس قرار می‌گیرند. ۷۶ درصد نمونه‌ها در TDI زیر ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر قرار گرفته‌اند. در این بخش میزان یون Ca^{2+} در دشت بهبهان و رامهرمز تا ۲۵ میلی‌اکی‌والان و دشت زیدون تا ۱۵ میلی‌اکی‌والان افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. در این دامنه میزان یون SO_4 تقریباً نیز روند افزایشی دارد از TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر روند حرکت انتقالی انحلال ژپس به سمت هالیت دیده می‌شود ولی این توسعه ناکامل مانده است. این روند افزایشی در نمونه‌های دشت رامهرمز و بهبهان قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به بررسی شکل ۳ مشاهده می‌گردد که بیشترین همبستگی بین TDI و پارامترهای هیدروژئوشیمیایی در دشت رامهرمز با ضریب ۰/۹۳ مربوط به یون سدیم است و پس از آن یون سولفات و کلرید می‌باشد. در دشت زیدون بیشترین ضریب همبستگی با ضریب

روش‌شناسی

یکی از روش‌های تفسیر فرآیندهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، تعیین رابطه بین پارامترهای نمونه‌های آب از طریق رسم آن‌ها بر روی نمودارهای دو متغیره است که به نمودارهای ترکیبی^۱ معروف می‌باشند. با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را تعیین کرد. در این نمودارها موقعیت نقاط داده با نوع آب زیرزمینی مرتبط است و موقعیت نمونه‌هایی که از مابقی نمونه‌ها جدا می‌باشند، می‌تواند تحت تأثیر فرآیندهای مختلفی از قبیل تبادل یونی و یا اختلاط قرار گرفته باشد. بر این اساس نمودارهای ترکیبی همیشه باید با در نظر گرفتن سیستم هیدروژئوشیمی و هیدرودینامیک آبخوان تفسیر شود. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم از ابزارهای قدرتمند در تحلیل هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند. این ایزوتوپ‌ها اطلاعاتی درباره منشأ، مسیر جریان و فرآیندهای مؤثر بر آب زیرزمینی ارائه می‌دهند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند جنوب غرب ایران، جایی که منابع آبی محدود هستند، مطالعه رفتار ایزوتوپی می‌تواند به شناسایی تأثیر تبخیر، تغذیه مجدد و اختلاط منابع کمک کند. به منظور شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمی از نمودارهای ترکیبی TDI در مقابل عناصر عمده، نمودار Na-Cl، نمودار $HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} + Mg^{2+}$ در مقابل Cl- Na، نمودارهای پراکنش δD در مقابل $\delta^{18}O$ ، δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC، نمودار حبابی عمق آب زیرزمینی در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC، نمودار حبابی δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس Cl، Cl در مقابل $\delta^{18}O$ و δD و Cl در مقابل D-Excess در آبخوان‌های مورد مطالعه که در محیط Excell ترسیم شده‌اند و استفاده شده است.

²Dedolomitization

¹Composition diagrams

۰/۹۶ متعلق به یون سدیم بوده و پس از آن کلرید و منیزیم دارای ضریب همستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. همچنین در دشت بهبهان بر خلاف دشت زیدون و رامهرمز بیشترین ضریب همستگی با ضریب ۰/۹۲ و ۰/۹۱ درصد به ترتیب یون سولفات و کلسیم بوده و در دشت‌های مذکور ضعیف‌ترین همستگی در یون بی‌کربنات مشاهده می‌گردد که این همستگی در دشت رامهرمز منفی می‌باشد.

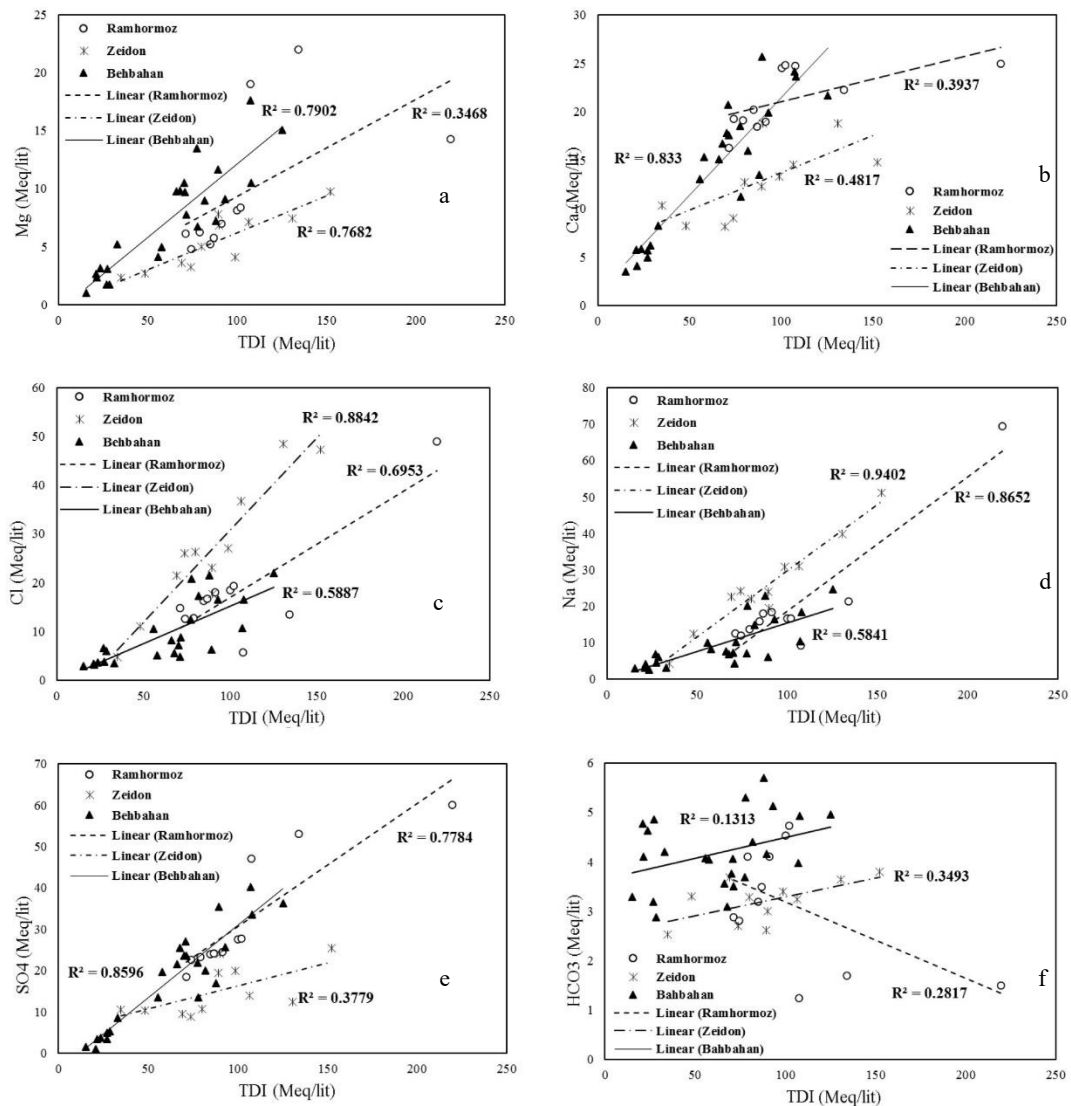
الگوی نمودار سدیم در مقابل TDI با نمودار کلراید در مقابل TDI کاملاً مشابه است. این روند در دشت زیدون روند خطی بسیار خوبی در نمودار سدیم در مقابل کلراید نسبت به دشت رامهرمز و بهبهان مشاهده می‌شود که این موضوع نیز مؤید انحلال هالیت در منطقه مورد مطالعه است. تحول شیمیایی آب بر اساس این نمودارها از بی‌کربناته - منیزیک به بی‌کربناته - کلسیک، بی‌کربناته (سولفات) - منیزیک، سولفات - کلسیک (منیزیک) و سولفات (کلروه) - منیزیک در دشت بهبهان و رامهرمز می‌باشد. در صورتی که سیستم تحت تأثیر تکامل شیمیایی طبیعی قرار بگیرد انتظار بر این است که انحلال کلروها بعد از انحلال سولفات‌ها اتفاق بیفتد. در واقع از TDI حدود ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به بعد می‌بایست کلرایدها افزایش یابند و دیگر انحلال ژپیس رخ ندهد، ولی همان گونه که از شکل ۵ مشخص است افزایش کلرایدها همزمان با افزایش سولفات‌ها صورت گرفته است. در دشت زیدون برخلاف دشت رامهرمز و بهبهان افزایش غلظت کلرایدها بعد از انحلال سولفات‌ها اتفاق افتاده است و نشان دهنده این موضوع است که در ابتدا انحلال ژپیس صورت پذیرفته و پس از آن انحلال هالیت در منطقه رخ داده است.

تبادلات کاتیونی (عادی و معکوس) در شکل‌گیری غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی نقش مهمی دارند و در شناسایی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی کاربرد فراوانی دارند. نمونه‌هایی که تبادل کاتیونی عادی در آن‌ها صورت گرفته است و دارای منشأ دوگانه‌اند. منشأ دوگانه بودن، این موضوع را بیان می‌کند که افزایش نسبت مولی Na/Cl از دو طریق انحلال هالیت و جانشینی کلسیم محلول در آب به جای سدیم موجود در کانی‌های رسی و در نتیجه، آزاد شدن یون سدیم و ورود آن به آب زیرزمینی است. همچنین در این نمودار وقتی نسبت مولاریته Na/Cl

کمتر از یک شود، فرآیندهای شیمیایی مانند تبادل کاتیونی معکوس رخ می‌دهد. در تبادل کاتیونی معکوس، کانی‌های رسی مانند مونتوریلونیت و دگرسانی فلدسپات‌ها باعث تبادل کاتیونی کلسیم و منیزیم به جای سدیم و کاهش نسبت مولاریته Na/Cl می‌شوند (Yan et al., 2024). بر اساس نمودار Na-Cl (شکل ۴) مشخص می‌شود که برخی از نمونه‌ها مقدار یون Na^+ نسبت به Cl^- بیشتر است. بالاتر بودن مقادیر Na^+ نسبت به Cl^- نشان‌دهنده تبادل کاتیونی است. بیشتر بودن مقدار Na^+ و رخداد تبادل کاتیونی باعث خروج Ca^{2+} از محلول می‌شود. در دشت بهبهان نمونه‌های B6 و B8، در دشت رامهرمز نمونه‌های R1، R2، R3، R11 و در دشت زیدون نمونه‌های Z3، Z4 و Z5 تحت تأثیر تبادل کاتیونی عادی واقع شده‌اند. همچنین نمونه‌های B3 و B9 در دشت بهبهان، نمونه‌های R4، R6، R8 در دشت رامهرمز و نمونه‌های Z2، Z6 و Z7 تحت تأثیر تبادل کاتیونی معکوس قرار گرفته‌اند.

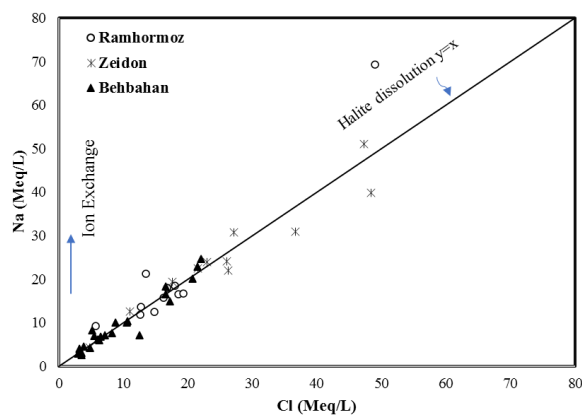
غلظت کلر بیش از غلظت سدیم نشان‌دهنده تبادل کاتیونی معکوس است که با توجه به نمودار Na در مقابل Cl این فرآیند در آبخوان‌های مورد نظر قابل ملاحظه می‌باشد. بخصوص نمونه‌های واقع در قسمت شمالی و جنوبی دشت زیدون، در قسمت‌های جنوبی و مرکز دشت رامهرمز و بخش‌های شمالی و جنوبی دشت بهبهان تبادل کاتیونی معکوس اتفاق افتاده است. همچنین در شکل ۵ نمودار $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ در مقابل HCO_3^- که بیانگر فرآیند تبادل کاتیونی می‌باشد را نشان می‌دهد. در این نمودار نمونه‌هایی که بر روی محور x نزدیک به مقدار صفر قرار می‌گیرند، تحت تأثیر تبادل کاتیونی واقع نشده‌اند. علاوه بر این اگر انحلال کلسیت، دولومیت و ژپیس به طور سازگار روی دهد و تبادل کاتیونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ نیز نزدیک به مقدار صفر خواهد شد. نمونه‌هایی که تبادل کاتیونی را متحمل می‌شوند در طول خط با شیب ۱- قرار می‌گیرند (Jankowski and Acworth, 1997). بعضی از نمونه‌های دشت بهبهان در نمودار فوق بر مقدار (۰ و ۰) منطبق هستند و نشانگر انحلال کربنات‌ها و ژپیس می‌باشند. با توجه به توضیحات ارائه‌شده می‌توان گفت فرآیندهای هیدروژئوشیمی غالب در آبخوان‌های مورد مطالعه فرآیندهای هیدروژئوشیمی به‌ترتیب غالب بودن در حالت کلی شامل

انحلال کانی‌های تبخیری ژپس و سپس هالیت، انحلال موضعی می‌باشند. کربنات‌ها و در نهایت تبادل کاتیونی نرمال و معکوس (به‌طور



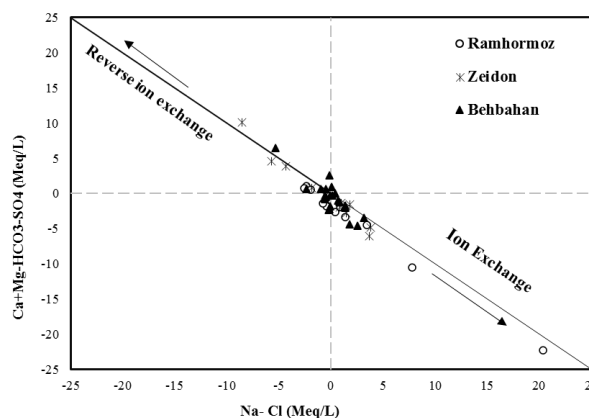
شکل ۳- نمودارهای ترکیبی یون‌های اصلی نسبت به TDI در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون.

Figure 3- Composition diagrams of major ions relative to TDI in Behbahan, Ramhormoz and Zeidon plains.



شکل ۴- نمودار ترکیبی نسبت سدیم به کلراید (میلی اکی والان بر لیتر).

Figure 4- Composition diagram of Sodium vs. Chloride (meq/Lit).



شکل ۵- نمودار $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$ در مقابل $\text{Na}-\text{Cl}$.

Figure 5- Diagram of $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$ VS $\text{Na}-\text{Cl}$.

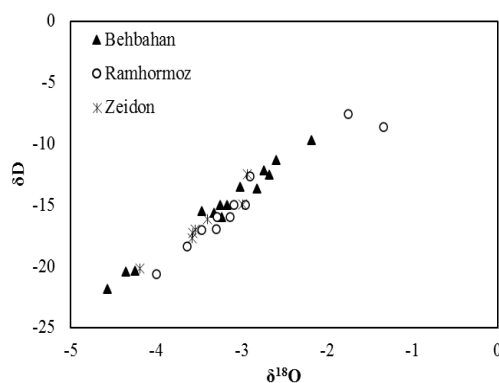
روابط ایزوتوپی‌های پایدار

ترکیبات ایزوتوپی پایدار ($\delta^{18}\text{O}$ و δD) نمونه‌های آب دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در شکل ۶ برای دوره خشک نشان داده شده است. به‌طور کلی، مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی در دشت‌های مورد مطالعه در محدوده δD ۴/۵۷‰ تا ۱/۳۴‰ با میانگین $3/21$ ‰ و برای δD در محدوده $21/84$ ‰ تا $7/57$ ‰ با میانگین $15/37$ ‰ قرار دارند. سه نمونه در دشت بهبهان، یک نمونه در دشت رامهرمز و یک نمونه در دشت زیدون به طور جدا از بقیه نمونه‌ها در مقادیر اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴‰ قرار گرفته‌اند و بیانگر آب‌های تغذیه‌ای شیرین می‌باشند. دو نمونه از دشت رامهرمز به‌صورت جدا از دیگر نمونه‌ها، غنی‌شدگی شدید مقادیر ایزوتوپی را نشان می‌دهند که به دلیل رخداد تبخیر در این نمونه‌ها می‌باشد. این مسئله برای شش نمونه در دشت بهبهان نیز دیده می‌شود که البته غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ بین ۲- تا ۳-‰ را نشان می‌دهند. دیگر نمونه‌ها در دشت‌های مورد مطالعه در دامنه اکسیژن ۱۸ بین ۳- تا ۴-‰ و دوتریوم بین ۱۷- تا ۱۳-‰ قرار دارند.

نمونه‌های آب زیرزمینی که در دشت‌های بهبهان و رامهرمز غنی‌شدگی نشان می‌دهند اثر تبخیر را با انحراف از LMWL (فرهادی و همکاران، ۱۳۹۹) و GMWL (Craig, 1961) در شکل ۷ به خوبی نشان می‌دهند. تأیید غنی‌شدگی در اثر تبخیر با کاهش D-Excess در دو نمونه رامهرمز در شکل ۱۰ به خوبی مشخص است، ولی تعداد نمونه‌های مورد تأیید غنی‌شدگی به واسطه تبخیر در دشت بهبهان به ۵ نمونه کاهش یافته است.

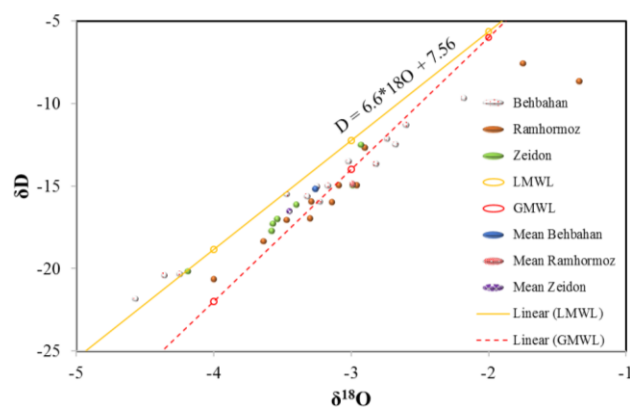
عدم تأثیر کامل پدیده شور شدگی به واسطه تبخیر در نمونه‌های دشت بهبهان در نمودار روابط ایزوتوپی حبابی با EC در شکل ۸a به وضوح تأیید می‌گردد. این نمونه‌ها با مقادیر هدایت الکتریکی کمتر از دیگر نمونه‌های دشت بهبهان که تهی شدگی نشان می‌دهند بیانگر تغذیه از شبکه‌های آبیاری و زهکشی در سطح دشت می‌باشند. اثر شوری به واسطه تبخیر در دو نمونه حد انتهایی دشت رامهرمز با غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ تأیید می‌شود. به‌طور کلی در نمونه‌های بخش میانی که فرآیند تکاملی نشان می‌دهند، میزان شوری به ترتیب از زیدون به دشت بهبهان و در نهایت دشت رامهرمز افزایش نشان می‌دهد. مقدار میانگین اکسیژن ۱۸ و دوتریم در آبخوان‌های بهبهان و زیدون بین خط بارش محلی و جهانی واقع شده‌اند و این انحراف از خط بارش محلی ناشی از تغذیه آبخوان‌ها توسط رودخانه مارون در دشت بهبهان و رودخانه زهره در دشت زیدون می‌باشد که سرچشمه این رودخانه‌ها در استان‌های بالادست بخصوص کهگلویه و بویراحمد است. میانگین اکسیژن ۱۸ و دوتریم در دشت رامهرمز با انحراف از خط جوی جهانی و غنی‌شدگی است که بیشتر تحت تأثیر تبخیر ناشی از نمونه‌های با شوری بالا واقع در شمال دشت می‌باشد. منشأ آب زیرزمینی این آبخوان، علاوه بر تغذیه از سازندهای زمین-شناسی، رودخانه اعلا می‌باشد. لذا انحراف از خط جوی محلی در شکل ۷ مشاهده می‌گردد. در نمودار دو متغیره اکسیژن ۱۸ با دوتریم که با EC طبقه‌بندی شده است (شکل ۸b) مشخص گردیده که همبستگی منفی و منطقی نسبت اکسیژن ۱۸ با عمق در آبخوان بهبهان وجود دارد. در آبخوان رامهرمز عملاً رابطه خاصی دیده نمی‌شود و تغییرات با ضریب همبستگی

نزدیک به صفر می‌باشد. در آبخوان زیدون این همبستگی حتی منفی شده است به طوری که عمق آب زیرزمینی در نمونه‌های با اکسیژن ۱۸ زیادتر، تا بیش از ۲۰ متر افزایش یافته است. بر این اساس عملاً به جز آبخوان بهبهان در دو آبخوان دیگر در حال کلی افزایش اکسیژن ۱۸ با کاهش عمق مشخص نمی‌باشد.



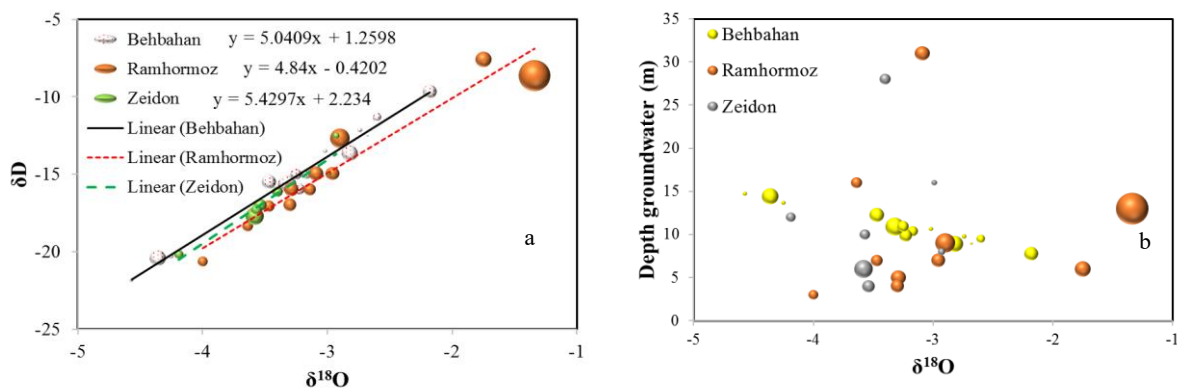
شکل ۶- نمودار پراکنش δD در مقابل $\delta^{18}O$ نمونه‌های آب زیرزمینی مناطق مورد مطالعه.

Figure 6- Scatter diagram of the δD versus $\delta^{18}O$ in groundwater samples of study areas.



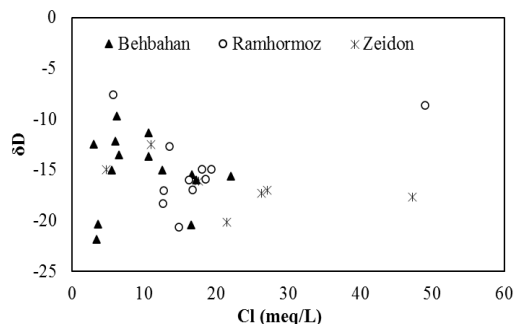
شکل ۷- نمودار δD در مقابل $\delta^{18}O$ در آبخوان‌های مورد مطالعه به همراه خط آب جوی محلی LMWL و جهانی GMWL.

Figure 7- Plot of δD versus $\delta^{18}O$ in the study aquifers along with LMWL (local meteoric water line) and GMWL (global meteoric water line).



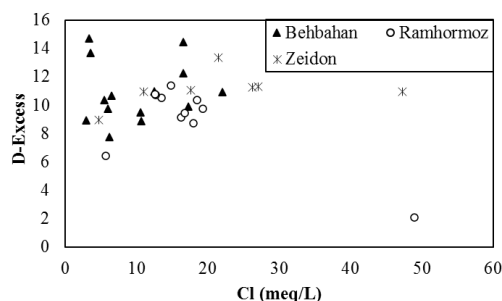
شکل ۸- (الف) نمودار حبابی δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC (ب) نمودار حبابی عمق آب زیرزمینی در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Figure 8- a) Diagram of δD vs. $\delta^{18}O$ bubbled with EC (b) diagram of groundwater depth vs. $\delta^{18}O$ bubbled with EC in the study aquifers.



شکل ۱۱- نمودار Cl در مقابل δD در آبخوان‌های مورد مطالعه.
Figure 11- Cl vs. δD diagram in the study aquifers.

نمودار دوتریوم مازاد در مقابل کلراید (شکل ۱۲) نمایانگر افزایش کلراید با دوتریوم مازاد می‌باشد به‌طوری‌که به‌جز دو نمونه در دشت بهبهان با حداکثر دوتریوم مازاد که غلظت کلراید پایین دارند، در دیگر نمونه‌ها، دوتریوم مازاد با کلراید افزایش نشان می‌دهد. دشت زیدون مطابق با دیگر نمودارها، کلراید نیز در مقابل ایزوتوپ‌ها بدون ارتباط مشخص می‌باشد. در آبخوان رامهرمز نیز عمده نمونه‌ها در مقدار دوتریوم مازاد بین ۸ تا ۱۲ ‰ قرار گرفته‌اند و نمونه با بیشترین مقدار کلراید حداقل مقدار دوتریوم مازاد را دارد که اثر شدید تبخیر را نمایان می‌سازد.

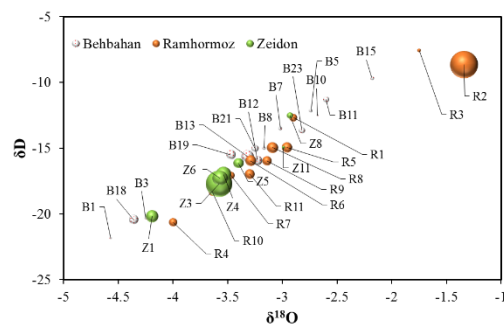


شکل ۱۲- نمودار Cl در مقابل D-Excess در آبخوان‌های مورد مطالعه.
Figure 12- Cl vs. D-Excess diagram in the study aquifers.

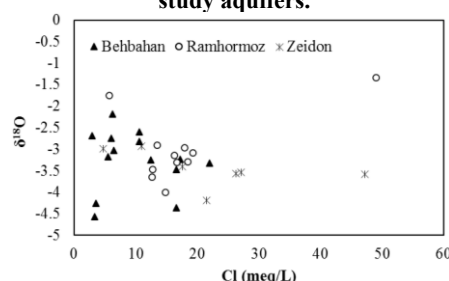
در دشت بهبهان مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۳/۲- تا ۴/۵- ‰ و دوتریوم بین ۱۵/۷- تا ۲۱/۸- ‰ اندازه‌گیری شد. مقادیر هدایت الکتریکی (EC) کمتر از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در بسیاری از نمونه‌ها نشان‌دهنده تأثیر کم تبخیر و تغذیه مجدد از شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. در دشت رامهرمز مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۲/۴- تا ۳/۸- ‰ و دوتریوم بین ۱۰/۶- تا ۱۷/۵- ‰ اندازه‌گیری شد. شوری

نمودار دو متغیره اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتریوم که با مقدار کلراید نمادگذاری شده (شکل ۹)، نمایانگر عدم تأثیر انحلال هالیت بر روابط ایزوتوپی در آبخوان بهبهان می‌باشد. در آبخوان رامهرمز غلظت کلراید میانه با نسبت‌های ایزوتوپی میانی منطبق می‌باشند و از دو نمونه با حداکثر غنی‌شدگی یک نمونه با کلراید حداکثر و دیگری بدون تأثیر انحلال هالیت و متأثر از انحلال ژپس می‌باشد. نمونه‌های آب زیرزمینی زیدون نیز که تهی‌شدگی دارند (محتوی اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴- ‰)، غلظت کلراید کمتری نسبت به نمونه‌های با مقادیر اکسیژن ۱۸ بین ۳/۵- تا ۳- دارند.

کلراید به‌عنوان یک یون پایستار^۱ خود می‌تواند به‌عنوان شاخص تکامل هیدروشیمی در ارتباط با ایزوتوپ‌های پایدار آب به‌کار گرفته شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). نمودار کلراید در مقابل اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در آبخوان زیدون الگوی خاصی نشان نمی‌دهد. در آبخوان رامهرمز به‌جز یک نمونه با کلراید بیش از ۵۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، به‌نظر می‌رسد با افزایش غلظت کلراید تهی‌شدگی در اکسیژن ۱۸ و دوتریوم رخ می‌دهد. در آبخوان بهبهان نیز افزایش غلظت کلراید با تهی‌شدگی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم قابل تأیید است.



شکل ۹- نمودار حبابی δD در مقابل δ¹⁸O بر اساس Cl در آبخوان‌های مورد مطالعه.
Figure 9- Diagram of δD vs. δ¹⁸O bubbled with Cl in the study aquifers.



شکل ۱۰- نمودار Cl در مقابل δ¹⁸O در آبخوان‌های مورد مطالعه.
Figure 10- Cl vs. δ¹⁸O diagram in the study aquifers.

¹Conservative ion

قرارگرفته‌اند و بیانگر آب‌های تغذیه‌ای شیرین می‌باشند. دو نمونه از دشت رامهرمز به‌صورت جدا از دیگر نمونه‌ها، غنی‌شدگی شدید مقادیر ایزوتوپی را نشان می‌دهند که به دلیل رخداد تبخیر در این نمونه‌ها می‌باشد. این مسئله برای شش نمونه در دشت بهبهان نیز دیده می‌شود که البته غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ بین ۲- تا ۳-‰ را نشان می‌دهند. دیگر نمونه‌ها در دشت‌های مورد مطالعه در دامنه اکسیژن ۱۸ بین ۳- تا ۴-‰ و دوتریوم بین ۱۷- تا ۱۳-‰ قرار دارند. تحلیل ترکیبات ایزوتوپی نشان داد که غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در دشت رامهرمز ناشی از تبخیر شدید است و با افزایش کلراید، غلظت ایزوتوپ‌ها نشان‌دهنده تأثیر تغذیه مجدد از شبکه‌های آبیاری و زهکشی و محدود بودن اثرات تبخیر است. در دشت زیدون، همبستگی منفی اکسیژن-۱۸ با عمق آب زیرزمینی حاکی از اختلاط آب‌های عمیق و سطحی است.

به‌طور کلی، تحول شیمیایی آب زیرزمینی در این مناطق به‌ترتیب تحت تأثیر انحلال کانی‌های تبخیری (ژپس و هالیت)، انحلال کربنات‌ها، فرآیندهای تبخیری و تبادل یونی (نرمال و معکوس) است. این یافته‌ها، علاوه بر روشن کردن منشأ و تحول شیمیایی آب‌های زیرزمینی، اطلاعات مفیدی برای مدیریت منابع آب و کاهش آثار ناشی از شوری و آلودگی فراهم می‌کند.

قدردانی

مؤلفین این تحقیق از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و مدیریت دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت سازمان آب و برق خوزستان که تسهیلات لازم و پشتیبانی مالی این تحقیق را فراهم آورده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

فرهادی، ص.، علی‌جانی، ف.، و ناصری، ح.، ۱۳۹۹. مقایسه مشخصات ایزوتوپ‌های پایدار بارش سیل آسا فروردین ۱۳۹۸ در جنوب غرب کشور با خط آب جوی دیگر مناطق ایران و کشورهای مجاور. هوشناسی کشاورزی، ۸(۲): ۴۴-۵۹.

فیروزی، س.، کلانتری، ن.، محمدی، ه.، ۱۴۰۲. تلفیق روش‌های هیدروشیمیایی و آماری جهت ارزیابی کیفیت

بالتر در این دشت EC (بیش از ۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و همبستگی مثبت با افزایش غلظت کلراید (تا ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) نشان‌دهنده تأثیر تبخیر شدید است. در دشت زیدون مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۳/۵- تا ۵/۳-‰ و دوتریوم بین ۱۸/۴- تا ۲۵/۷-‰ اندازه‌گیری شد. غلظت کلراید در این دشت بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تغییر کرد که بیانگر نقش محدودتر تبخیر و ترکیب آب‌های سطحی و زیرزمینی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیندهای هیدروشیمیایی و ایزوتوپی آب‌های زیرزمینی در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که انحلال ژپس و هالیت از مهم‌ترین فرآیندهای مؤثر در شیمی آب زیرزمینی این دشت‌ها است. رابطه خطی بین غلظت یون‌های سولفات و کلسیم با TDI بیانگر غالب بودن انحلال ژپس است، درحالی‌که انحلال هالیت در TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر آغاز می‌شود. این روند در دشت زیدون قوی‌تر از رامهرمز و بهبهان است. ۷۶ درصد نمونه‌ها در TDI زیر ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر قرارگرفته‌اند. در این بخش میزان یون Ca^{2+} در دشت بهبهان و رامهرمز تا ۲۵ میلی‌اکی‌والان و دشت زیدون تا ۱۵ میلی‌اکی‌والان افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. در این دامنه میزان یون SO_4 تقریباً نیز روند افزایشی دارد از TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر روند حرکت انتقالی انحلال ژپس به سمت هالیت دیده می‌شود. بیشترین همبستگی بین TDI و پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت‌های رامهرمز و زیدون به ترتیب با ضریب ۰/۹۳ و ۰/۹۶ متعلق به یون سدیم بوده و در دشت بهبهان بر خلاف دشت زیدون و رامهرمز بیشترین ضریب همبستگی با ضریب ۰/۹۲ و ۰/۹۱ درصد به ترتیب یون سولفات و کلسیم می‌باشد.

مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی در دشت‌های مورد مطالعه در محدوده ۴/۵۷-‰ تا ۱/۳۴-‰ با میانگین ۳/۲۱-‰ و برای δD در محدوده ۲۱/۸۴-‰ تا ۷/۵۷-‰ با میانگین ۱۵/۳۷-‰ قرار دارند. سه نمونه در دشت بهبهان، یک نمونه در دشت رامهرمز و یک نمونه در دشت زیدون به‌طور جدا از بقیه نمونه‌ها در مقادیر اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴-‰

- Asare-Donkor, N.K., Ofosu, J.O., Adimado, A.A., 2018. Hydrochemical characteristics of surface water and ecological risk assessment of sediments from settlements within the Birim River basin in Ghana. *Environmental Systems Research*, 7, 1-17 .
- Asomaning, J., Antwi, E.O., Laar, C., Saka, D., 2023. Statistical and isotopic analysis of sources and evolution of groundwater. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 129, 103337 .
- Bryan, E., Meredith, K.T., Baker, A., Post, V.E., Andersen, M.S., 2016. Island groundwater resources, impacts of abstraction and a drying climate: Rottnest Island, Western Australia. *Journal of Hydrology*, 542, 704-718 .
- Chen, Z., Zhou, P., Wang, G., Mao, H., Feng, X., Huang, H. 2023. Groundwater chemistry and isotope for interpreting the hydrogeological conditions and hydrochemical evolution of multilayer aquifer system of Donghai island, China. *Applied Geochemistry*, 159, 105833 .
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3-4): 294-313.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in natural waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Dogramaci, S., Skrzypek, G., 2015. Unravelling sources of solutes in groundwater of an ancient landscape in NW Australia using stable Sr, H and O isotopes. *Chemical Geology*, 393, 67-78 .
- Edjah, A., Akiti, T., Osae, S., Adotey, D., Glover, E., 2017. Hydrogeochemistry and isotope hydrology of surface water and groundwater systems in the Ellembelle district, Ghana, West Africa. *Applied Water Science*, 7, 609-623 .
- Egbi, C.D., Anornu, G., Appiah-Adjei, E.K., Ganyaglo, S. Y., Dampare, S. B., 2019. Evaluation of water quality using hydrochemistry, stable isotopes, and water quality indices in the Lower Volta River Basin of Ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 3033-3063 .
- Esmaili, S., Barzegar, R., Kazemian, N., 2018. The effective factors on the groundwater chemical quality of Qareh-Ziaeddin plain, West Azarbaijan. *شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت زیدون، استان خوزستان. آبخوان و قنات*, ۴(۲): ۱۸۷-۲۰۴.
- قبادی، م.، محمدیان، م.، محسنی، ح.، کرمی، ر.، ۱۳۹۲. مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند گچساران در منطقه رامهرمز (مخزن سد جره)، شرق خوزستان. *مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته*، ۷، ۱۲-۱.
- کلانتری، ن.، زروش، ن.، علیجانی، ف.، دانشیان، ح.، باشتی، م.، ۱۴۰۳. بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی با تاکید بر منشا و تعیین شاخص آلودگی نیترات با استفاده از روش های هیدروشیمی و تکنیک های آماری چند متغیره در بخش جنوبی آبخوان بهبهان استان خوزستان. *هیدروژئولوژی*، ۹(۱): ۴۰-۵۶.
- کلانتری، ن.، شیخزاده، ع.، محمدی، ه.، چقازردی، ز.، ۱۴۰۰. ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی آبخوان عقیلی با تاکید بر روش های آماری چند متغیره. *هیدروژئولوژی*، ۶(۲): ۹۵-۱۰۸.
- کلانتری، ن.، عنبری، ا.، محمدی، ه.، ۱۳۹۷. بررسی هیدروشیمی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بستان با استفاده از تکنیک های آماری چندمتغیره. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴(۲): ۲۴۲-۲۵۳.

Reference

- Afrifa, G.Y., Sakyi, P.A., Chegbele, L.P., 2017. Estimation of groundwater recharge in sedimentary rock aquifer systems in the Oti basin of Gushiegu District, Northern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 131, 272-283 .
- Akshitha, V., Balakrishna, K., Udayashankar, H.N., 2021. Assessment of hydrogeochemical characteristics and saltwater intrusion in selected coastal aquifers of southwestern India. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112989 .
- Ala-Aho, P., Soulsby, C., Pokrovsky, O., Kirpotin, S., Karlsson, J., Serikova, S., Vorobyev, S., Manasyrov, R., Loiko, S., Tetzlaff, D., 2018. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. *Journal of Hydrology*, 556, 279-293 .

of Laizhou Bay, China. *Journal of Hydrology*, 508, 12-27 .

He, B., He, J., Wang, L., Zhang, X., Bi, E., 2019. Effect of hydrogeological conditions and surface loads on shallow groundwater nitrate pollution in the Shaying River Basin: Based on least squares surface fitting model. *Water Research*, 163, 114880 .

Jankowski, J., Acworth, R.I., 1997. Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes and the development of dryland salinity in the yass river catchment, new south wales, australia. *Hydrogeology journal*, 5(4): 71-88 .

Ji, D., Ma, J., Xue, J., Wu, X., Wang, Z., Wei, S., 2024. Identifying groundwater characteristics and controlling factors in Jiaozhou Bay's northern coastal region, China: a combined approach of multivariate statistics, isotope analysis, and field empirical investigations. *Scientific Reports*, 14(1): 23856 .

Kalantari, N., Anbari, A., Mohammadi, H., 2018. Investigation of Hydrochemistry of Surface and Groundwater Resources of Bostan Plain Using Multivariate Statistical Techniques. *Iran Water Resources Research*, 14(2): 242-253. [In Persian]

Kalantari, N., Sheikhzadeh, A., Mohammadi, H., Chaghazary, Z., 2021. Assessment of Hydrogeochemical Status of Aghili Aquifer Groundwater with Emphasis on Multivariate Statistical Methods. *Hydrogeology*, 6(2): 95-108. [In Persian]

Kalantari, N., Zarrush, N., Alijani, F., Daneshian, H., Bashti, M., 2024. Investigation of Groundwater Quality with Emphasis on Origin and Determination of Nitrate Pollution Index Using Hydrochemical Methods and Multivariate Statistical Techniques in the Southern Part of Behbahan Aquifer, Khuzestan Province. *Hydrogeology*, 9(1): 40-56. [In Persian]

Kazakis, N., Pavlou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K., Soulios, G., Pliakas, F., Tsokas, G., 2016. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*, 543, 373-387 .

Klaus, J., McDonnell, J., 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64 .

Kwong, H.T., Jiao, J.J., Liu, K., Guo, H., Yang, S., 2015. Geochemical signature of pore water from core

province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(108): 245-256 .

Farhadi, S., Alijani, F., and Naseri, H., 2020. Comparison of Stable Isotopes Characteristics of the April 2019 Torrential Rains in the Southwest of the Country with the Atmospheric Water Line of Other Regions of Iran and Neighboring Countries. *Agricultural Meteorology*, 8(2): 44-59. [In Persian]

Firouzi, S., Kalantari, N., Mohammadi, H., 2023. Integration of Hydrochemical and Statistical Methods for Assessing the Chemical Quality of Groundwater Resources in Zeydoon Plain, Khuzestan Province. *Aquifer and Qanat*, 4(2): 187-204. [In Persian]

Gabet, E. J., Wolff-Boenisch, D., Langner, H., Burbank, D.W., Putkonen, J., 2010. Geomorphic and climatic controls on chemical weathering in the High Himalayas of Nepal. *Geomorphology*, 122(1-2): 205-210.

Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Agha Jari, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.

Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Banar-e-Deylam, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.

Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Haft Kel, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.

Geological and Exploration Division, 1970. Geological map of Behbahan, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.

Ghobadi, M., Mohammadian, M., Mohseni, H., Karami, R., 2013. Study of Engineering Geological Properties of Gachsaran Formation in Ramhormoz Area (Jarreh Dam Reservoir), East of Khuzestan. *Advanced Applied Geology Journal*, 7, 1-12. [In Persian]

Ghorbanzadeh, R., Mirhaji, N., Rezaie, H., 2024. Investigating the Origin and Controlling Mechanisms of the Underground Water Quality in Urmia Plain Aquifer Using Hydrogeochemical Methods and Composite Diagrams. *Iran-Water Resources Research*, 20(2): 33-60 .

Grzywna, A., Bronowicka-Mielniczuk, U., 2020. Spatial and temporal variability of water quality in the Bystrzyca river basin, Poland. *Water*, 12(1): 190 .

Han, D., Song, X., Currell, M.J., Yang, J., Xiao, G., 2014. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer

samples and its implications on the origin of saline pore water in Cangzhou, North China Plain. *Journal of Geochemical Exploration*, 157, 143-152 .

Ledesma-Ruiz, R., Pastén-Zapata, E., Parra, R., Harter, T., Mahlkecht, J., 2015. Investigation of the geochemical evolution of groundwater under agricultural land: a case study in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 521, 410-423 .

Liu, J., Chen, Z., Wang, L., Zhang, Y., Li, Z., Xu, J., Peng, Y., 2016. Chemical and isotopic constrains on the origin of brine and saline groundwater in Hetao plain, Inner Mongolia. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 15003-15014 .

Yan, M., Wang, L., Wang, Q., Liu, Z., 2024. Hydrochemical Characteristics and Origin Analysis of Groundwater in Nanling County, Anhui Province. *Water*, 16(11): 1579 .

Zarei, M., Raëisi, E., Merkel, B.J., Kummer, N.A., 2013. Identifying sources of salinization using hydrochemical and isotopic techniques, Konarsiah, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 70, 587-604.

ارزیابی دقت مدل‌های داده محور تصادفی و قطعی در مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر دبی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه‌های غرب و جنوب غرب دریاچه ارومیه)

فاطمه روحانی نیا^۱، مجید منتصری^۲، بهزاد حصاری^۳ ID، جلال شیری^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: b.hessari@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

چکیده

شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه جهت آگاهی از آورد رودخانه در دوره زمانی مختلف، از جمله مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر به ارزیابی و تعیین مدل مناسب پیش‌بینی جریان در ۷ ایستگاه آب‌سنجی بر روی رودخانه‌های غرب و جنوب غرب دریاچه ارومیه پرداخته شده است. مدل‌های مورد استفاده جهت دستیابی به هدف مطروحه شامل الگوهای مختلف مدل استوکاستیک ARIMA و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شامل ANN، ELM و SVM بود. نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل‌های ذکر شده نشان داد که الگوهای برازش ARIMA(1,0,0) و ARIMA(2,0,1) دارای عملکرد بهتر در مدل‌سازی جریان در رودخانه‌های مورد مطالعه بوده، به‌طوری‌که میانگین ضریب نش-ساتکلیف دو مدل ARIMA(1,0,0) و ARIMA(2,0,1) به ترتیب برابر ۰/۶۷ و ۰/۶۸ حاصل شد. در حالی‌که میانگین این ضریب برای مدل‌های داده محور ANN، SVM و ELM برای رودخانه‌های منطقه به ترتیب برابر ۰/۳۸، ۰/۴۷ و ۰/۲۱ برآورد گردید. ضمناً آماره ضریب همبستگی پیرسون نیز برای مدل‌های استوکاستیک (۰/۸۳) به‌طور معنی‌داری بالاتر از مدل‌های برتر داده‌محور حاصل (۰/۶۱) شد. بنابراین استفاده از مدل‌های استوکاستیک نسبت به مدل‌های هوش مصنوعی جهت مدل‌سازی و به‌کارگیری آن‌ها در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای برای آینده در منطقه مطالعاتی دارای اولویت بالاتری است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، سری زمانی، مدل‌های استوکاستیک، مدل‌های هوش مصنوعی.

مقدمه

آتی پدیده‌های هواشناسی و هیدرولوژی در قالب دو مفهوم پیش‌بینی کوتاه‌مدت^۱ و بلندمدت^۲ انجام می‌پذیرد. پیش‌بینی کوتاه‌مدت در مطالعات هیدرولوژی به معنای تخمین رخداد‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی برای چند دوره زمانی آینده بلافاصله بعد از دوره آماری مشاهداتی یا تاریخی است. هرچه بازه زمانی برای پیش‌بینی دورتر یا بافاصله زمانی بیشتر از انتها دوره تاریخی باشد، به دلیل افزایش تصاعدی وزن مؤلفه رفتار تصادفی در رخداد، پیش‌بینی نامطمئن‌تر و دارای عدم

از آنجائی که منابع آبی قابل‌دسترس به‌مرور کاهش می‌یابند، اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی آب بیش‌ازپیش مشخص می‌گردد. با توجه به گسترش شهرها و روند صنعتی شدن، تغییر الگوی کشت و رشد کشاورزی، تقاضای آب نیز افزایش پیدا کرده است. لذا مقوله پیش‌بینی پارامترهایی از قبیل جریان و بارش را می‌توان یکی از اساسی‌ترین کارها در این زمینه تلقی کرد. برآورد و تعیین رخداد‌های مورد انتظار

² Rediction

¹ Forecasting

روش سنتی رگرسیون، استفاده از تکنیک‌های داده محور یادگیری ماشین نظیر شبکه‌های عصبی^۲ (NNs) Noori and (Kalin, 2016؛ دلناز و همکاران، ۱۳۹۶؛ سراوانی و همکاران، ۱۴۰۲؛ صالح آبادی و عمادی، ۱۴۰۲)، ماشین‌های برداری پشتیبان^۳ (SVM) (Adnan et al., 2019)، منطق فازی^۴ (Fang) (Alvisi and Franchi, 2011) و تبدیل موجک^۵ (WT) (et al., 2019)، برای مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان سطحی مورد توجه زیاد محققین قرار گرفته است.

(Niu and Feng, 2021) در پژوهشی توانایی پنج روش هوش مصنوعی برای پیش‌بینی جریان روزانه ورودی به دو مخزن بزرگ برق‌آبی در چین را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه، چهار شاخص آماری به عنوان معیارهای ارزیابی برای مقایسه عملکرد این مدل‌ها استفاده شدند. نتایج حاصل مطالعه در دو مخزن عظیم برق‌آبی نشان داد که پنج روش هوش مصنوعی می‌توانند به نتایج پیش‌بینی رضایت‌بخشی دست یابند در حالی که روش‌های SVM، GPR، ELM دارای عملکرد بهتری نسبت به ANN و ANFIS نشان دادند. (Farfan et al., 2020) به پیش‌بینی دبی جریان با استفاده از دو مدل فیزیک پایه WEAP و GR2M و دو مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی در حوضه آبخیز Andean اکوادور پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب این روش‌ها قادر است عملکرد منفرد مدل‌های مذکور را بهبود بخشد و نتایج خوبی را در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی ارائه دهد. (Tayyab et al., 2019) به تلفیق مدل‌های شبکه مصنوعی و تبدیل موجک گسسته برای فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبخیز رودخانه Jinsha پرداخته و نشان دادند که RBFNN در تلفیق با تبدیل موجک گسسته از قابلیت پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌های توسعه داده شده برخوردار است. مجددی ریزه‌ئی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی کارایی مدل‌های ترکیبی نسبت فراوانی ماشین بردار پشتیبان به منظور شناسایی مناطق مستعد سیل‌خیزی در منطقه کلات پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل FR-SVM دقت بالا و عملکرد بهتری نسبت به مدل SVR دارد و این نتایج را می‌توان در مناطق مستعد سیل و خطرپذیر استفاده نمود. احمدی

قطعی‌تر می‌شود. در حالی که پیش‌بینی بلندمدت (prediction) یک ارزیابی و تخمین شرایط یا رفتار محتمل مورد انتظار پدیده هواشناسی و هیدرولوژی در آینده است، بدون اینکه به بازه زمانی خاص در آینده ارتباط داشته باشد (Chu et al., 2021). از آنجاکه بارش و جریان وابستگی غیرخطی شدیدی به عوامل جوی و فعالیت‌های انسانی داشته، تغییرات وسیع و فوق‌العاده‌ای در فضای مکانی و زمانی دارد که پیش‌بینی کوتاه و بلندمدت آن را بسیار پیچیده و دشوار می‌کند (Xiao et al., 2019). مدل‌های پیش‌بینی بارش و جریان براساس ماهیت ورودی و عدم قطعیت، مشخصات مکانی و روند پردازش در سه کلاس کلی؛ مدل‌های ریاضی (داده محور) قطعی (مانند رگرسیون، هوش مصنوعی و ...)، مدل‌های ریاضی (داده محور) تصادفی (مانند خود همبسته) و مدل‌های فیزیکی (فرآیند محور) (مانند بارش-رواناب) قرار می‌گیرند (Feng et al., 2020).

مدل‌های ریاضی یا داده‌محور قطعی تلاش می‌کنند روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را براساس داده‌های مشاهداتی هیدرولوژیکی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت هیدرولوژیکی و بدون فرض درک فرآیند داخلی، تولید کنند. این مدل‌ها اغلب به راحتی توسعه می‌یابند و می‌توانند برآوردهای قابل اطمینان را زمانی که مدل‌ها را با داده‌های قوی و دقیق آموزش داده شوند، ارائه دهند (Wagena et al., 2020). این مدل‌ها می‌توانند جایگزین بسیار خوبی برای مدل‌های فرآیند محور^۱ باشند که درک ارتباط بین اجزا فرآیند پیچیده و مشکل است (Abrahart et al., 2004). در این مدل‌ها به تشریح فرآیند پدیده هیدرولوژیک پرداخته نمی‌شود و برای تعیین شاخص‌ها و ایجاد ساختار مدل به داده‌های مشاهداتی ورودی و خروجی نیاز دارند و نیاز به تعریف فیزیکی از روابط خود نیستند (Liong et al., 2000). مدل‌های ریاضی یا داده محور قطعی مانند روش رگرسیون می‌توانند خروجی‌های مناسبی را در بازه داده‌های تجربی به دست آورند. در حقیقت این مدل‌ها در میانایی بسیار مناسب هستند ولی در برون‌یابی ناتوان هستند و معمولاً نتیجه مطلوبی از عملکرد این مدل‌ها حاصل نمی‌شود (Stelling, 2000). در دهه‌های اخیر، علاوه بر

⁴Fuzzy logic⁵Wavelet transfer¹Process-based models²Neural networks³Support vector machine

استوکاستیکی و هوش مصنوعی مختلف، گامی مهم در جهت یافتن ابزارهای مؤثرتر برای مدیریت و پیش‌بینی منابع آب این منطقه است. بر همین اساس هدف از این پژوهش ارزیابی دقت روش‌های استوکاستیک و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش‌بینی و برآورد جریان در ۷ ایستگاه آب‌سنجی رودخانه‌های واقع در غرب و جنوب غربی دریاچه ارومیه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

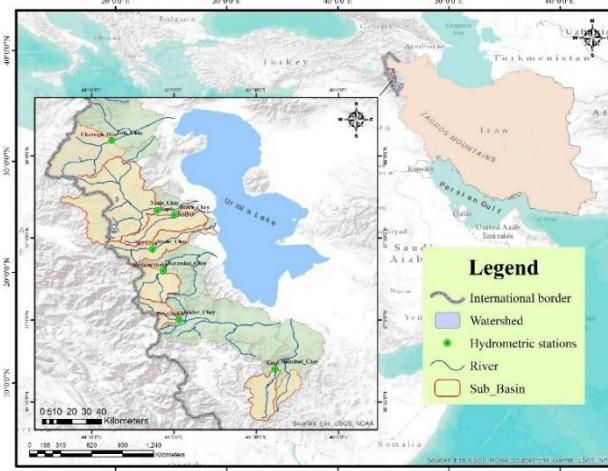
در این مطالعه از داده‌های جریان ماهیانه ۷ رودخانه زولا، نازلو، روضه، شهر، باراندوز، گادار و مه‌آباد در ایستگاه‌های آب‌سنجی چهاریق علیا، تپیک، کلهور، میرآباد، هاشم‌آباد، پی قلعه و کوتر استفاده شد. اطلاعات و موقعیت جغرافیایی رودخانه‌های مذکور و ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب در جدول ۱ و نقشه شکل ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که محل ایستگاه میرآباد شهرچای از سال ۱۳۸۴ به محل جدید در بالادست رودخانه (برده سور) انتقال یافته و داده‌های میرآباد برای سال‌های ۱۳۸۴ به بعد از ایستگاه برده سور تکمیل شده است. ضمناً در این مطالعه، داده‌های جریان رودخانه‌های مذکور در طی سال‌های آماری ۱۳۷۱ الی ۱۴۰۰ به کار گرفته شده است.

(۱۳۹۹) به ارزیابی عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (SVR) و سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) به منظور پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه‌های نازلو و سزار پرداخت، نتایج بیانگر عملکرد بهتر مدل SVR نسبت به مدل ANFIS در پیش‌بینی جریان ماهانه بوده و می‌توان با استفاده از تابع کرنل مناسب برای هر کدام از این مدل‌ها عملکرد بهتری ایجاد نمود. احمدپور و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی عملکرد مدل‌های سری زمانی خطی باکس جنکینز و مدل مفهومی IHACRES، مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مدل هیبریدی ARMA-ANN را به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان روزانه حوضه مارون مورد بررسی و مقایسه قرار داده و نشان دادند که مدل ARMA-ANN بیشترین مقادیری عددی ضریب تعیین ۰/۸۶ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۱ داشته و دارای عملکرد بهتری می‌باشد. با توجه به آنچه ذکر گردید می‌توان گفت مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق حساس و پرچالش نظیر حوضه‌های آبریز غرب و جنوب غرب دریاچه ارومیه که پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها نقش مهمی در برنامه‌ریزی منابع آب، کنترل سیلاب، تخصیص بهینه آب و مدیریت پایدار اکوسیستم‌های آبی این حوضه‌های آبریز دارد، نیازمند شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق جریان رودخانه‌ها می‌باشد و با توجه به تغییرات اقلیمی و نوسانات هیدرولوژیکی، شناسایی مدل‌های پیش‌بینی دقیق و مناسب، از ضرورت‌های اصلی در این حوضه‌های آبریز می‌باشد. لذا بررسی مدل‌های

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی.

Table 1- Characteristics of the Study Stations in West Azerbaijan Province.

ELEVATION(M)	LATITUDE	LANGITUDE	RIVER	STATION	NO
1533	38.60	44.60	Zola-Chay	Chahrigh_Olia	1
1715	37.66	44.90	Nazlo-Chay	Tapik	2
1285	37.65	44.83	Rozeh_Chay	Kalhor	3
1525	37.43	44.87	Shahr_Chay	MirAbad	4
1464	37.28	44.90	Barandoz_Chay	HashemAbad	5
1500	37.00	45.03	Gadar_Chay	Pei-Ghaleh	6
1400	36.70	45.61	Mahabad_Chay	Kotar	7



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

Figure 1- Geographical location of the study area.

روش انجام پژوهش

ضرایب α_1 و α_2 و ... نیز ضرایب ثابتی از مدل رگرسیونی را نشان می‌دهند (Salas et al., 1988). MA نیز از این واقعیت استخراج می‌شود که X_t با استفاده از وزن‌های β_1 و β_2 و ... و β_q برای متغیرهای ε_t و ε_{t-1} و ... و ε_{t-q} به دست می‌آید. اگر زمان به عنوان یک واحد اضافه شود و این وزن‌ها برای متغیرهای ε_t و ε_{t+1} استفاده شود، X_{t+1} را می‌توان به دست آورد.

$$X_t = \beta_0 \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q} \quad (2)$$

این مدل همچنین نشان می‌دهد که یک فرآیند میانگین متحرک مرتبه q توسط $MA(q)$ نمایش داده می‌شود. ضرایب β_1 و β_2 و ... و β_q ضرایب ثابت میانگین متحرک و ε_t و ε_{t-1} و ... و ε_{t-q} باقیمانده‌های یک گام قبل، دو گام قبل و ... q گام قبل است (Nirumand and Bozorgnia, 2010).

به این ترتیب مدل ARMA که از ترکیب دو مدل رگرسیون و میانگین متحرک به دست آمده است با درجه خودهمبسته p و میانگین متحرک q به صورت $ARMA(p, q)$ نشان داده می‌شود و معادله آن به صورت زیر است (Salas et al., 1988):

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} \quad (3)$$

مدل ARIMA نیز با افزودن درجه تفاضل d به ARMA ایجاد می‌شود که به صورت $ARIMA(p, d, q)$ نشان داده می‌شود و معادله آن به صورت زیر است (Salas et al., 1988):

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d X_t \quad (4)$$

$$= (1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q) \varepsilon_t$$

در این مطالعه ۸ الگوی مختلف مدل استوکاستیک $ARIMA(p, d, q)$ با ترکیب مرتبه‌های مختلف یعنی $p=1, 2$ ، $q=0, 1$ و $d=0, 1$ و سه مدل هوش مصنوعی جهت برازش سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی در ۷ رودخانه مورد مطالعه استفاده و نتایج آن باهم مقایسه شده است. ذیلاً مشخصات و ساختمان تئوریک مدل‌های مورد استفاده به طور خلاصه ارائه شده است.

مدل‌ها داده محور تصادفی ARMA و ARIMA

اساس این مدل‌ها بر پایه زنجیره مارکوف در زنجیره زمانی بنا شده است. اگر هر داده ثبت شده سری زمانی t با زمان قبل و یا زمان بعد از خود مرتبط باشد. مدل سری زمانی که باکس-جنکینز نیز نامیده می‌شود، معمولاً برای اندازه‌گیری داده‌های مرتب شده بر اساس زمان استفاده می‌شود و فرآیندی است که در آن رویدادها در زمان‌های جداگانه و در فواصل زمانی ثابت رخ می‌دهند و هر یک از آن‌ها مستقل از مقادیر دیگر هستند (Salas et al., 1988). در پژوهش حاضر از مدل‌های سری زمانی ARMA و ARIMA برای مدل سازی استفاده شد. این مدل دو مدل پایه خودهمبسته و میانگین متحرک را ترکیب می‌کند که در معادلات زیر به آن‌ها اشاره شده است.

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} \quad (1)$$

که در معادله بالا که مربوطه به قسمت P-type اتورگرسیون می‌باشد $AR(p)$ را معرفی می‌کند؛ و پارامترهای X_{t-1} و X_{t-2} و ... و X_{t-p} داده‌های مدل سازی شده از مراحل قبل نظیر یک گام قبل، دو گام قبل و ... تا p گام قبل تر را نشان می‌دهند.

آموزش استخراج می‌شود. دو مدل اصلی SVM شامل SVM- ϵ (نوع اول) و SVM- ϵ (نوع دوم) هستند. در این پژوهش، از SVM- ϵ به دلیل کاربرد گسترده آن در مسائل رگرسیونی استفاده شده است. برای این مدل، تابع خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SVM-\epsilon = \frac{1}{2} W^T W + C \sum_{i=1}^N \xi_i + C \sum_{i=1}^N \xi_i^* \quad (6)$$

تابع خطای فوق لازم است با توجه به محدودیت‌های زیر کمینه گردد:

$$W^T \phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \quad (7)$$

$$y_i - W^T \phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i^* \quad (8)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad (9)$$

که در آن C ثابت گنجایش، W بردار ضرایب، W^T ترانهاده بردار ضرایب، ξ_i و ξ_i^* ضرایب کمبود، b ضریب ثابت، N الگوی آموزش مدل و ϕ تابع کرنل است. اطلاعات کمی در مورد انتخاب تابع غیرخطی مناسب ϕ در دسترس می‌باشد. در این پژوهش برای تنظیم بهتر این مدل، نخست از جستجوی شبکه‌ای (Grid Search) برای انتخاب بهترین هاپرپارامترها استفاده شد. همچنین جهت برآورد بهتر و دقیق‌تر این مدل از ۳ پارامتر (C , Epsilon, Kernel) استفاده شده است که دامنه انتخابی برای هر پارامتر به صورت ذیل می‌باشد:

C : (0.1, 1, 10, 100)

مقدار پایین C منجر به مدل نرم‌تر می‌شود که می‌تواند اختلالات بیشتری را تحمل کند، در حالی که مقادیر بالاتر سبب تطبیق بهتر داده‌ها می‌شود.

Epsilon: (0.01, 0.1, 0.2, 0.5)

این پارامتر برای مدل‌های رگرسیون SVM تعریف شده و تعیین می‌کند که تا چه حد خطا در پیش‌بینی‌ها قابل قبول بوده بدون اینکه تأثیری در بهینه‌سازی مدل داشته باشد. مقادیر پایین‌تر epsilon باعث می‌شود که مدل دقیق‌تر داده‌های آموزشی را پردازش و پیش‌بینی کند.

Kernel: (linear, rbf, poly)

که این سه تابع به ترتیب برای داده‌های خطی، داده‌ها با پیچیدگی مناسب و داده‌های خیلی پیچیده به کار می‌روند.

شبکه عصبی یادگیری ماشین حداکثر (ELM)

شبکه عصبی ELM یک رویکرد بسیار ساده‌ای برای حل این مسئله ارائه کرده است و به همین دلیل سرعت یادگیری

مدل‌ها داده محور قطعی (شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، یادگیری ماشین حداکثر)

در دهه‌های اخیر، مدل‌های داده‌محور مبتنی بر اصول فیزیکی مانند (شبکه‌های عصبی، ماشین‌های برداری پشتیبان، منطق فازی و رگرسیون) برای تحلیل پدیده‌های طبیعی با حافظه کوتاه‌مدت و بلندمدت توسعه یافته‌اند (Ni et al., 1988). مدل‌های فرآیند محور نیز با استفاده از شاخص‌های حاصل از مشاهدات، به واسطه مدل کمک کرده و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی را از طریق سناریوهای مختلف مدنظر قرار می‌دهند (Kottegoda, 1980).

مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN

مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با شبیه‌سازی عملکرد مغز از نورون‌های متصل به هم تشکیل شده که خروجی هر لایه به عنوان ورودی لایه بعدی عمل می‌کند. وزن‌های اتصال بین نورون‌ها انتقال اطلاعات را مشابه سیناپس‌های مغزی شبیه‌سازی کرده و از طریق تنظیم این وزن‌ها، فرآیند یادگیری در شبکه صورت می‌گیرد. در این پژوهش از یک شبکه عصبی چندلایه پرسپترون (MLP) که در کتابخانه scikit-learn قرار داشته و برای پیش‌بینی به کار می‌رود استفاده شده است. همچنین تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نورون‌های موجود در هر لایه به ترتیب برابر با (۱۰۰)، (۱۰۰) و (۱۰۰) و (۵۰ و ۵۰) تنظیم گردید.

مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک مدل یادگیری با ناظر است که با استفاده از داده‌های برجسبدار، یک هاپرپلین بهینه برای طبقه‌بندی داده‌های جدید ایجاد می‌کند. در مدل رگرسیونی SVM، هدف تخمین وابستگی متغیر وابسته y به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل x است (Hamel, 2011). فرض بر این است که مانند دیگر مسائل رگرسیونی، رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل توسط یک تابع معین f به علاوه مقدار اضافی نویز (Noise) مشخص شود:

$$y = f(x) + Noise \quad (5)$$

هدف اصلی ماشین بردار پشتیبان (SVM) یافتن تابع f است که بتواند به درستی داده‌های جدید را پیش‌بینی کند. این تابع از طریق فرآیند بهینه‌سازی تابع خطا روی یک مجموعه

استفاده می‌شود. در این حالت، کرنل ELM به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_{ELM} = HH^T: \Omega_{ELM_{ij}} = h(x_i) \cdot h(x_j) = K(x_i, x_j) \quad (14)$$

$$f(x) = h(x)H^T \left(\frac{1}{C} + HH^T \right)^{-1} = \left[\frac{K(x, x_1)}{K(x, x_N)} \right]^T \left(\frac{1}{C} + \Omega_{ELM} \right)^{-1} T \quad (15)$$

که نماد T نشان‌دهنده ترانزاده یک بردار، $k(x_i, x_j)$ بیان‌کننده ارتباط بین دو متغیر x_i و x_j بر حسب تابعی از K است. پارامتر I ماتریس تشخیص از ابعاد مناسب است (نوشیار و قاسمی مرزبالی، ۱۳۹۸).

ارزیابی دقت مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از چهار آماره یا معیار: نش-ساتکلیف (NSE)^۱، میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و ضریب تعیین (R^2)^۳ به عنوان معیارهای ارزیابی مدل استفاده شده است. مقدار بهینه ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برابر با یک و برای ریشه میانگین خطای تبدیل شده عدد صفر می‌باشد (غضنفری مقدم و همکاران، ۱۳۹۷).

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_E - Q_O)^2}{\sum (Q_O - \bar{Q}_O)^2} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum (Q_E - Q_O)^2 / n} \quad (17)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_O - Q_E)^2 \quad (18)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Q_E - Q_E^-)(Q_O - Q_O^-)}{\sqrt{\sum (Q_E - Q_E^-)^2 \sum (Q_O - Q_O^-)^2}} \right) \quad (19)$$

که در این روابط Q_O و $\bar{Q}_O$: مقدار مشاهداتی یا تاریخی و میانگین آن‌ها، روابط Q_E و $\bar{Q}_E$: مقدار برآوردی و میانگین آن‌ها و n تعداد داده‌ها است (Wagener et al., 2009).

نتایج و بحث

نتایج مطالعه در دو بخش اصلی مدل‌های استوکاستیک و هوش مصنوعی تنظیم شده است. برای به کارگیری مدل‌های استوکاستیک و تعیین مرتبه مناسب پارامترهای مدل استوکاستیک ARIMA(p,d,q) در رودخانه‌های مورد مطالعه، خودهمبستگی با تأخیر یک تا سیزده سری زمانی جریان ماهیانه در قالب نمودار ACF محاسبه و تعیین شد. نتایج نشان

بسیار بالایی دارد و سرعت یادگیری آن در مقایسه با MLP شاید حدود ۱۰۰۰ برابر و حتی بیشتر باشد.

روش ELM

ماشین یادگیری شدید (ELM) یک روش یادگیری است که باهدف یکپارچه‌سازی روش‌های مختلف ماشین پشتیبان بردار (SVM) توسعه یافته و در ابتدا برای شبکه‌های تعمیم یافته پیش‌خور با تک لایه مخفی (SLFN) معرفی شد، سپس به نسخه‌های تعمیم یافته SFLN گسترش یافت. تابع خروجی SLFN-های تعمیم یافته به صورت زیر است:

$$f(x) = h(x)\beta = \sum_{i=1}^L \beta_i h_i(a_i, b_i, x) \quad (10)$$

که در آن $h(x)_i$ درواقع فضای d بعدی ورودی (x) را به فضای L بعدی نگاشت می‌کند و a_i و b_i به ترتیب پارامترهای تولیدی تصادفی برای i امین گره‌اند. بین لایه نهان و لایه خروجی وزن β_i وجود دارد. برای یک مسئله دسته‌بندی دودسته‌ای تابع تصمیم‌گیر برای این مدل به صورت زیر است:

$$f(x) = \text{sign}(h(x)\beta) \quad (11)$$

بر اساس تئوری بارلت برای شبکه‌های SLFN، تابع هدف ELM به گونه‌ای فرموله شده که هم خطای آموزش و هم نرم وزن‌های خروجی را به حداقل برساند.

$$\text{Minimize: } \|H\beta - T\|^2 + \|\beta\| \quad (12)$$

که در آن T ماتریس هدف $[t_1, t_2, \dots, t_N]^T$ ، نماد $\|-\|$ نشان‌دهنده نرم استاندارد و H ماتریس لایه پنهان است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$H = \begin{bmatrix} G(a_1, b_1, x_1) & \cdots & G(a_L, b_L, x_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G(a_1, b_1, x_N) & \cdots & G(a_L, b_L, x_N) \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن $G(a_i, b_i, x_i)$ نشان‌دهنده ارتباط بین i امین متغیر و ضرایب وزنی آن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداقل کردن $\|\beta\|$ درواقع معادل حداکثر کردن فاصله حاشیه دودسته در دسته‌بندی دودسته‌ای یعنی حداکثر کردن $\| \beta \|^{-1}$ است. به منظور بهبود و توسعه مدل یادگیری و دور ماندن از نگاشت که گاهی برای طراح مشخص نیست، از مدل مبتنی بر کرنل

³Coefficient of determination

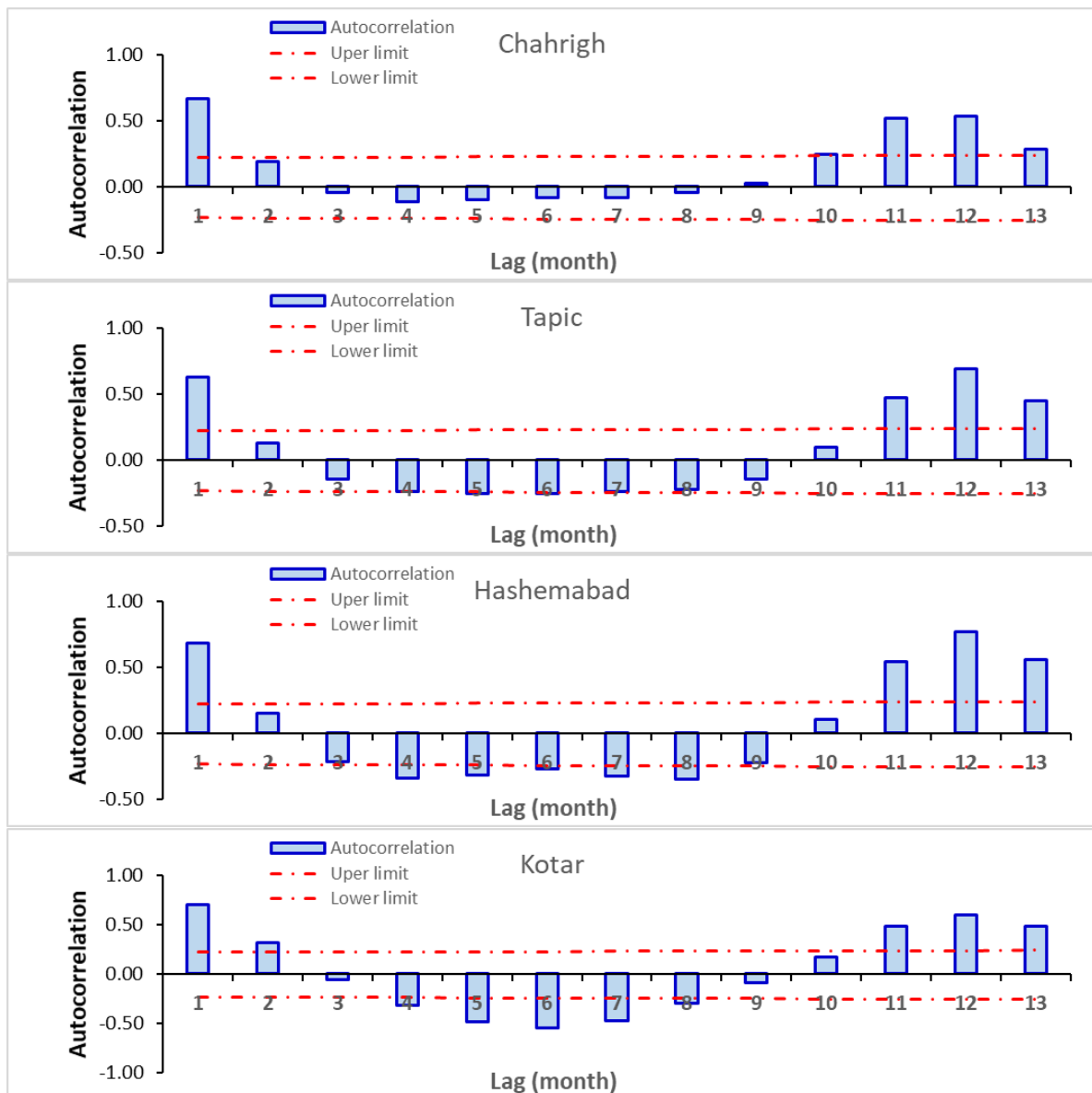
¹Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

²Box-Cox Transformed Root Mean Squared Error

مطالعاتی نشان می‌دهد. براین اساس، مرتبه p ، d و q به ترتیب برابر $p=1,2$ ، $d=0,1$ و $q=0,1$ به عنوان محدوده مناسب و مطلوب پارامترهای فوق انتخاب شد.

نهایتاً ۸ الگوی مختلف مدل سازی $ARIMA(p,d,q)$ با ترکیب مرتبه‌های انتخابی مذکور یعنی $ARIMA(1,0,0)$ ، $ARIMA(1,1,0)$ ، $ARIMA(1,1,1)$ ، $ARIMA(1,0,1)$ ، $ARIMA(2,0,0)$ ، $ARIMA(2,1,0)$ ، $ARIMA(2,0,1)$ و $ARIMA(2,1,1)$ جهت برازش سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی یا مشاهداتی استفاده شده است.

داد که از میان خودهمبستگی‌های کوتاه‌مدت چندماهه، تنها خودهمبستگی یک‌ماهه همراه با خودهمبستگی‌های ۱۱ تا ۱۳ ماهه بلندمدت یا فصلی در تمام ایستگاه‌ها معنی‌دار بوده است. همچنین برای حدود ۳۰ درصد رودخانه‌ها، خودهمبستگی‌های ۶ و ۷ ماهه بارش نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. شکل ۲ نمودار تغییرات مقادیر خودهمبستگی با تأخیرهای مختلف به همراه باند محدوده مجاز در سطح معنی‌دار ۰/۵ را برای سری زمانی جریان ماهیانه در ۴ رودخانه را به عنوان نمونه از منطقه



شکل ۲- خودهمبستگی سری زمانی ماهیانه جریان با تأخیر یک تا سیزده در ۴ ایستگاه آب‌سنجی منطقه مطالعاتی.

Figure 2- Autocorrelation of the monthly streamflow time series with lags from one to thirteen at four hydrometric stations in the study area.

در این پژوهش، به منظور توسعه و ارزیابی عملکرد مدل‌های استوکاستیک و هوش مصنوعی در مدل‌سازی داده‌های جریان، سری زمانی ماهیانه آن‌ها در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۱ معادل ۲۰۲۰-۱۹۹۱) استفاده شد. بدین منظور ۷۰

جریان رودخانه‌های مورد مطالعه در دوره آزمون یا اعتبارسنجی را ارائه می‌دهند. به‌طوری‌که متوسط مقادیر ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف برای ۷ رودخانه به‌ترتیب برابر ۰/۸۳ و ۰/۶۸ است. ضمناً از میان چهار الگوی برتر مذکور، الگوی ARIMA (2,0,1) با داشتن حداکثر متوسط مقادیر ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف یعنی ۰/۸۴ و ۰/۷ بالاترین عملکرد را دارد. این امر بیانگر اثر تنظیمات دقیق‌تر مدل استوکاستیک در بهبود دقت پیش‌بینی آن است. شکل ۳ مقایسه سری نزولی و زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی از مدل استوکاستیک برتر در رودخانه‌های نازلو و تپیک را نشان می‌دهد. شکل مذکور بیانگر عملکرد مطلوب هر چهار الگوی برتر در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای در منطقه مطالعاتی است. همچنین شکل ۴ مقایسه نمودار جعبه‌ای داده‌های جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی چهار مدل استوکاستیک برتر در دو ایستگاه میرآباد و چهریق به ترتیب با حداکثر و حداقل مقادیر آماره‌های R و NSE یا رتبه عملکرد در منطقه مطالعاتی (جدول ۲) را نشان می‌دهد. نتایج مقایسه توزیع مقادیر تاریخی و برآوردی در شکل ۴، بیانگر عملکرد مطلوب مدل‌های استوکاستیک منتخب در حفظ یا دوباره تولید میانگین، حداکثر (سیلاب) و حداقل (کم‌آبی) جریان رودخانه‌ای در منطقه مطالعاتی بوده و همچنین اثر خودهمبستگی با تأخیر ۲ در بهبود عملکرد مدل استوکاستیک را نشان می‌دهد.

درصد داده‌های ابتدای سری زمانی جریان ماهیانه به‌عنوان داده ورودی برای آموزش یا واسنجی مدل و ۳۰ درصد دیگر داده‌های انتهایی سری زمانی برای آزمون یا اعتبارسنجی مدل‌های توسعه داده‌شده در نظر گرفته شد. نتایج پژوهش در این مقاله، به‌دلیل اهمیت عملکرد مدل‌ها مورد استفاده در دوره آزمون یا اعتبارسنجی، صرفاً متمرکز بر این دوره بوده است. مدل‌سازی و پیش‌بینی داده‌های جریان در منطقه مطالعاتی در ۷ ایستگاه آب‌سنجی رودخانه‌های منتخب منطقه یعنی چهریق-زولاچای، تپیک-نازلوچای، کلهور-روضة‌چای، میرآباد-شهرچای، هاشم آباد-باراندوزچای، پی‌قلعه-گادارچای و کوثر-مهابادچای انجام پذیرفت که نتایج آن در بخش‌های زیر ارائه شده است.

مدل استوکاستیک

برای ارزیابی عملکرد الگوهای ۸ گانه مدل استوکاستیک ARIMA(p,d,q)، از سه آماره یا معیار R^2 ، RMSE و NSE استفاده شده و نتایج آن در جدول ۲ آمده است. نتایج مذکور نشان می‌دهد که از میان ۸ الگوی مختلف مدل‌سازی جهت برازش با سری زمانی ماهیانه جریان در رودخانه‌های مورد مطالعه، چهار الگوی ARMA(1,0,0) و ARIMA(1,0,1)، ARMA(2,0,0) و ARIMA(2,0,1) بر اساس مقادیر معیارهای آماری مذکور دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوها بوده و هر چهار الگو فوق پیش‌بینی مطلوب از مقادیر

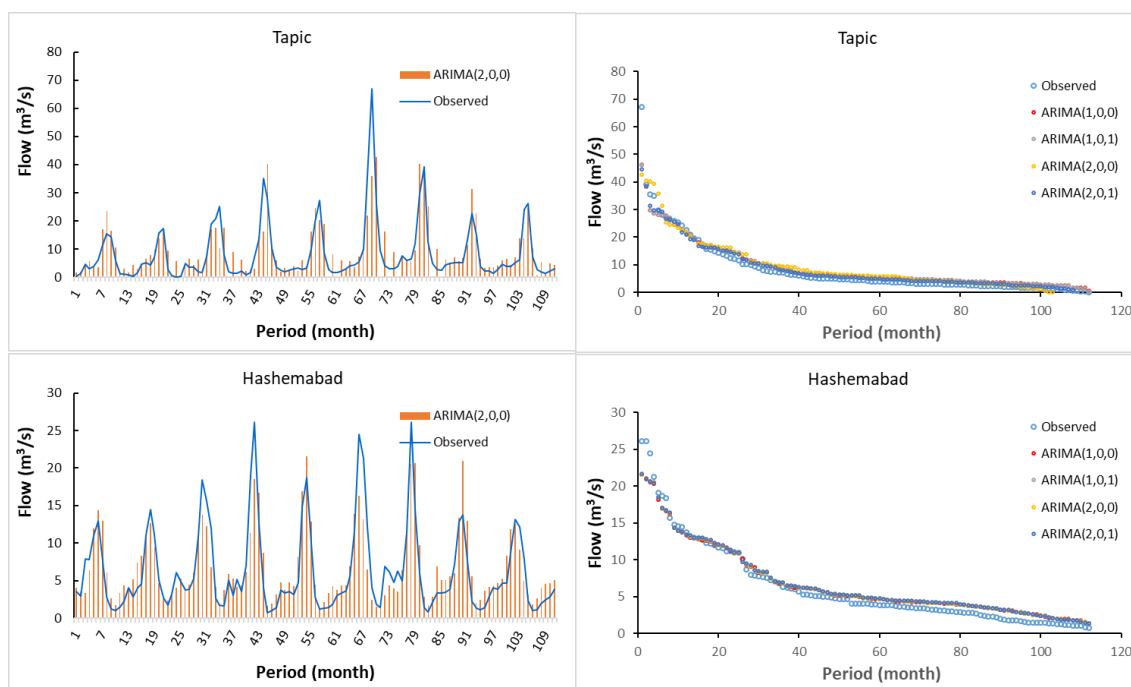
جدول ۲- مقادیر سه آماره یا معیار ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-

ساتکلیف (NSE) سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی برای ۸ الگوی منتخب مدل استوکاستیک ARIMA.

Table 2- Values of three statistical evaluation metrics—Pearson correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE)—for the historical and estimated monthly streamflow time series of eight selected ARIMA stochastic model patterns.

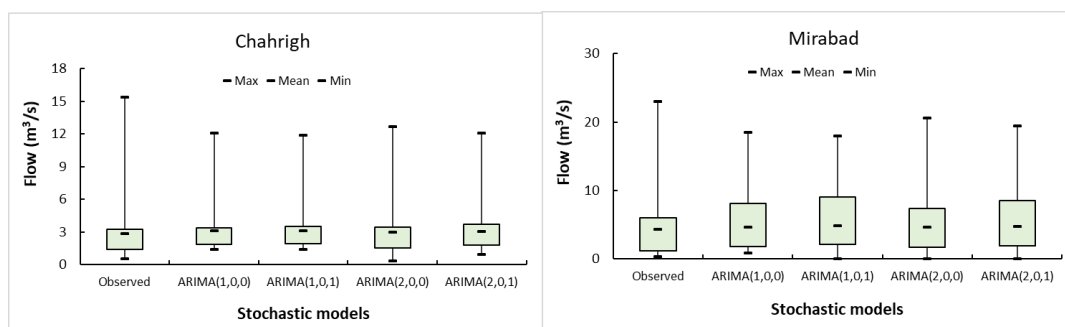
ARIMA (2,1,1)	ARIMA (2,0,1)	ARIMA (2,1,0)	ARIMA (2,0,0)	ARIMA (1,1,1)	ARIMA (1,0,1)	ARIMA (1,1,0)	ARIMA (1,0,0)	
R								
0.141	0.775	0.141	0.825	0.173	0.592	0.141	0.678	Chahrigh
0.265	0.825	0.300	0.800	0.300	0.812	0.316	0.812	Tapik
0.000	0.860	0.000	0.866	0.000	0.854	0.100	0.831	Kalhor
4.123	0.883	0.500	0.860	0.806	0.889	0.762	0.894	MirAbabd
0.837	0.872	0.678	0.872	0.837	0.872	0.566	0.866	HashemAb
0.141	0.787	0.141	0.781	0.775	0.775	0.141	0.787	ad
0.566	0.877	0.574	0.877	0.686	0.872	0.574	0.877	Pei-Ghaleh Kotar
RMSE								
7.20	1.71	6.88	1.59	8.23	2.23	7.30	2.01	Chahrigh
17.45	5.80	15.82	6.37	15.75	6.00	14.87	6.01	Tapik
2.09	0.52	1.94	0.51	2.91	0.53	1.98	0.60	Kalhor
9.44	2.43	7.72	2.67	3.30	2.44	3.83	2.33	MirAbabd
3.22	2.81	5.02	2.80	3.21	2.81	6.40	2.84	HashemAb
19.74	5.51	19.70	5.54	5.84	5.57	20.59	5.49	ad

5.82	2.38	5.71	2.40	4.51	2.50	5.72	2.38	Pei-Ghaleh Kotar
NSE								
0.141	0.775	0.141	0.825	0.173	0.592	0.141	0.678	Chahrigh
0.265	0.825	0.300	0.800	0.300	0.812	0.316	0.812	Tapik
0.000	0.860	0.000	0.866	0.000	0.854	0.100	0.831	Kalhor
4.123	0.883	0.500	0.860	0.806	0.889	0.762	0.894	MirAbabd
0.837	0.872	0.678	0.872	0.837	0.872	0.566	0.866	HashemAb
0.141	0.787	0.141	0.781	0.775	0.775	0.141	0.787	ad
0.566	0.877	0.574	0.877	0.686	0.872	0.574	0.877	Pei-Ghaleh Kotar



شکل ۳- مقایسه سری نزولی و سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی از مدل‌های استوکاستیک برتر در دو ایستگاه آب‌سنجی.

Figure 3- Comparison of the declining series and the historical and estimated monthly streamflow time series from the best stochastic models at two hydrometric stations.



شکل ۴- مقایسه نمودار جعبه داده‌های جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی از مدل‌های استوکاستیک برتر در ایستگاه میرآباد رودخانه شهرچای و ایستگاه چهریق رودخانه زولا.

Figure 4- Comparison of box plots of historical and estimated monthly streamflow data from the best stochastic models at Mirabad station on the Shahrchai River and Cherigh station on the Zola River.

سه مدل مذکور، از سه آماره R^2 ، RMSE و NSE استفاده شده

و نتایج آن در جدول ۳ آمده است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که اولاً از میان ۳ مدل هوش مصنوعی مذکور جهت برازش با سری زمانی ماهیانه جریان در رودخانه‌های منطقه،

مدل هوش مصنوعی

در این پژوهش سه مدل هوش مصنوعی، ANN، ELM و SVM جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی داده‌های جریان رودخانه‌های مورد مطالعه بکار گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد

معیارهای R و NSE در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. نمودارهای فوق نشان از عملکرد ضعیف‌تر مدل برتر SVM و ANN هوش مصنوعی نسبت به مدل‌های استوکاستیک در پیش‌بینی جریان ماهیانه رودخانه‌های منطقه بوده، به‌طوری‌که تطبیق سری نزولی جریان برآوردی از سه مدل هوش مصنوعی با سری نزولی جریان تاریخی دارای انحراف بسیار قابل‌توجهی خصوصاً در ایستگاه پی‌قلعه بوده است. همچنین جهت درک بهتر و ارزیابی کامل‌تری از عملکرد مدل‌ها، نمودار جعبه‌ای داده‌های جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی سه مدل هوش مصنوعی در چهار رودخانه زولا (چهریق)، نازلو (تپیک)، گدار (پی‌قلعه) و مهاباد (کوتر) با مقادیر مختلف از آماره یا معیارهای R و NSE در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج فوق (شکل ۶) نشان از عملکرد نامطلوب یا ضعیف مدل‌های سه‌گانه هوش مصنوعی در حفظ یا دوباره تولید توزیع احتمال، میانگین، حداکثر (سیلاب) جریان رودخانه‌ای در منطقه مطالعاتی بوده است. همچنین نمودارهای شکل ۶، تأکیدی بر صحت تفسیر و تشریح نتایج در بالا است.

عملکرد مدل ELM کاملاً نامطلوب بوده و مدل‌های SVM و ANN به‌طور موردی دارای عملکرد بهتری نسبت به هم داشته است. به‌طوری‌که مثلاً عملکرد مدل SVM در دو ایستگاه چهریق رودخانه زولا و تپیک رودخانه نازلو و مدل ANN در دو ایستگاه میرآباد رودخانه شهرچای و هاشم‌آباد رودخانه باراندوز دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل دیگر بوده و از طرف دیگر هر دو مدل در سایر رودخانه‌ها دارای عملکرد قابل قبولی نبوده است (جدول ۳ و شکل ۶). دوماً مقایسه نتایج مدل‌های هوش مصنوعی و استوکاستیک بیانگر عملکرد بهتر مدل‌های استوکاستیک برتر نسبت به مدل‌های برتر هوش مصنوعی است. به‌طوری‌که متوسط مقادیر ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف مدل‌های برتر هوش مصنوعی برای ۷ رودخانه به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۳۲ بوده که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقادیر آن‌ها برای مدل‌های استوکاستیک (۰/۸۳ و ۰/۶۸) است.

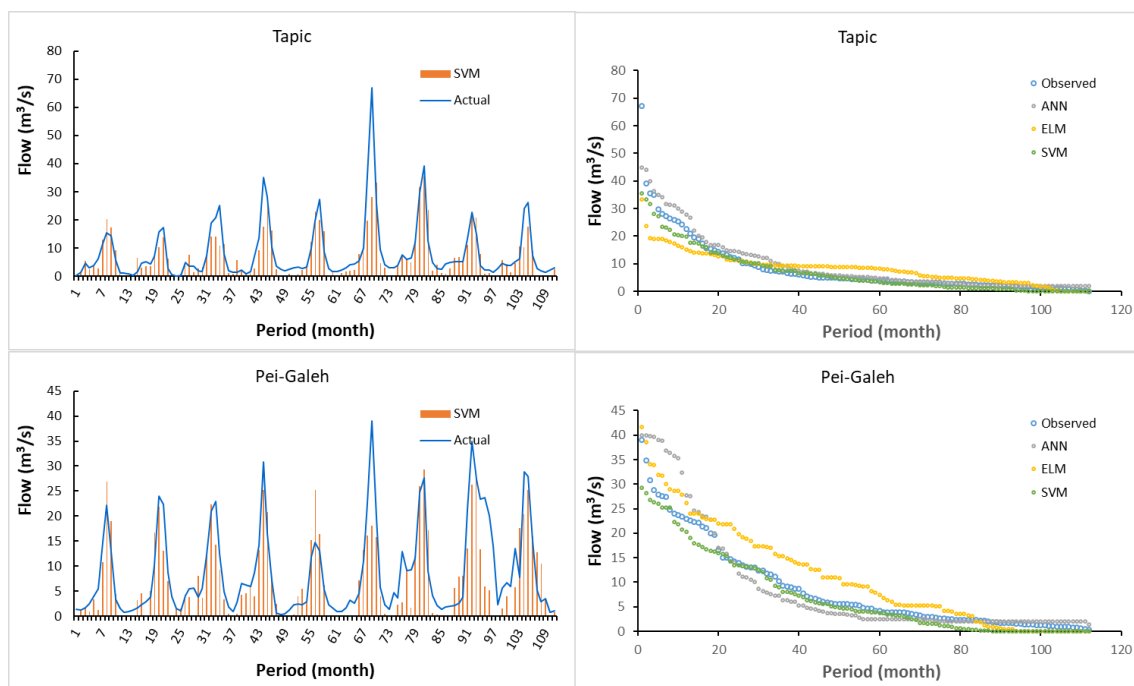
شکل ۵ مقایسه سری نزولی و زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی از مدل SVM در ایستگاه تپیک رودخانه نازلو و ایستگاه پی‌قلعه رودخانه گدار را با حداکثر مقادیر آماره یا

جدول ۳- مقادیر سه آماره یا معیار ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-

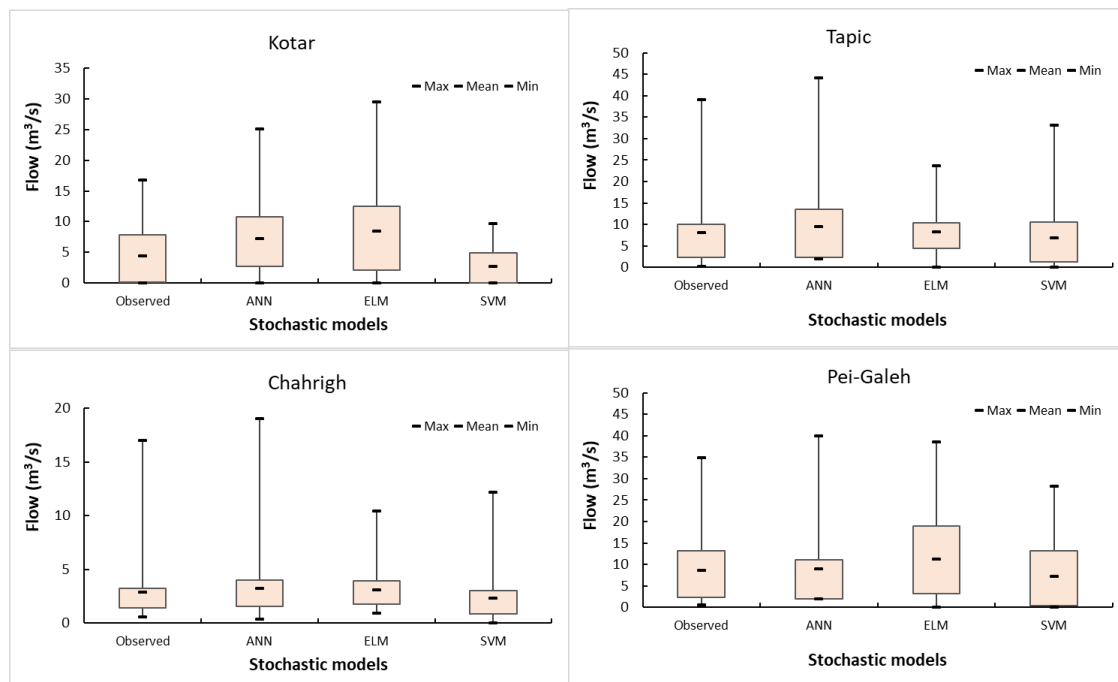
ساتکلیف (NSE) سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی برای ۸ الگوی منتخب مدل استوکاستیک ARIMA.

Table 3- Values of three statistical evaluation metrics—Pearson correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE)—for the historical and estimated monthly streamflow time series of eight selected ARIMA stochastic model patterns.

	ANN			ELM			SVM		
	R	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE
Chahriq	0.55	2.00	0.453	0.23	2.52	0.132	0.56	1.90	0.506
Tapik	0.64	6.62	0.569	0.26	8.67	0.260	0.72	5.56	0.698
Kalhor	0.48	0.85	0.287	0.03	1.23	-0.493	0.64	0.61	0.633
MirAbad	0.69	3.74	0.456	0.23	5.13	-0.035	0.68	5.05	0.010
HashemAbad	0.59	4.43	0.375	0.09	7.21	-0.669	0.62	6.98	-0.55
Pei-Ghaleh	0.29	6.71	0.419	0.39	8.76	0.050	0.70	5.12	0.662
Kotar	0.20	6.97	-0.792	0.07	9.27	-2.170	0.38	4.47	0.263



شکل ۵- مقایسه سری نزولی و سری زمانی جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی از مدل هوش مصنوعی SVM در دو رودخانه منطقه.
Figure 5- Comparison of the declining series and the historical and estimated monthly streamflow time series from the SVM artificial intelligence model in two rivers of the region.



شکل ۶- مقایسه نمودار جعبه‌ای جریان ماهیانه تاریخی و برآوردی مدل‌های هوش مصنوعی در ۴ رودخانه منطقه (مهاباد، نازلو، زولا و گادار).
Figure 6- Comparison of box plots of historical and estimated monthly streamflow from artificial intelligence models in four rivers of the region (Mahabad, Nazlou, Zola, and Gadar).

چهار الگو $ARIMA(1,0,0)$ ، $ARIMA(1,0,1)$ ، $ARIMA(2,0,0)$ و $ARIMA(2,0,1)$ پیش‌بینی مطلوب از مقادیر جریان در دوره آزمون را همه رودخانه‌ها نشان داد، به‌طوری‌که متوسط مقادیر ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف برای ۷ رودخانه منطقه به‌ترتیب برابر 0.83 و 0.68 بود. مقایسه نتایج مدل‌های استوکاستیک و سه مدل هوش بیانگر عملکرد بهتر معنی‌دار چهار الگوی برتر مدل استوکاستیک نسبت به مدل‌های برتر هوش مصنوعی بوده که کاملاً مشابه نتایج مطالعات پیشین از جمله فتح‌آبادی (۲۰۰۹)، حجابی و همکاران (۱۳۹۲)، پایچرالامپوس و همکاران (۲۰۱۹)، زین‌الدین و همکاران (۲۰۲۰) و شاهین و همکاران (۲۰۲۴) می‌باشد.

نتایج مدل‌های هوش مصنوعی ضرورت تأکید و نیاز بیشتر برای تنظیمات و بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های هوش مصنوعی برای هر شرایط خاص و حاکم بر مقادیر جریان در رودخانه مورد مطالعه را نشان داد.

با توجه به ساختمان مدل‌های استوکاستیک و عملکرد قابل‌اعتماد آن‌ها در مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان در این پژوهش، به‌کارگیری آن‌ها در پیش‌بینی جریان‌های آینده رودخانه مطمئن‌تر از مدل‌های هوش مصنوعی به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه بوده و بدین‌وسیله از حامیان طرح خصوصاً شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی در به اشتراک‌گذاری داده‌های طرح قدردانی می‌گردد.

منابع

احمدپور، ع.، میرهاشمی، س. ح.، حقیقت‌جو، پ.، ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های کلاسیک و مدل مفهومی IHACRES و مدل هیبریدی ARMA-ANN در شبیه‌سازی جریان روزانه بارون، فصلنامه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۳): ۷۲۷-۷۳۶. حجابی، س.، بذرافشان، ج.، قهرمان، ن.، ۱۳۹۲. مقایسه مهارت مدل‌های استوکاستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر و طبقات شاخص بارندگی استاندارد شده، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۵(۲)، ۲۲-۱.

براساس نتایج حاصل از مدل‌های هوش مصنوعی، توضیحات - تکمیلی زیر در توجیه و درک بهتر نتایج مفید به‌نظر می‌رسد:
الف: مدل ELM، یک مدل شبکه عصبی با یادگیری بسیار سریع و با یک‌لایه پنهان بوده و نیازی به تنظیم دقیق وزن‌ها در لایه‌های مخفی ندارد. همچنین وزن‌های لایه ورودی به‌صورت تصادفی و بدون تنظیم مقداردهی می‌شوند. در این مطالعه برای پیاده‌سازی مدل ELM از بسته نرم‌افزاری hpelm با جستجوی شبکه‌ای برای تعیین بهترین تنظیمات استفاده شد. با این‌وجود عملکرد مدل ELM در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه در منطقه مطالعاتی نسبت دو مدل دیگر ANN و SVM کاملاً ضعیف و نامطمئن است.

ب: مدل SVM دارای حساسیت بالا نسبت به داده‌ها و - پارامترهای ورودی مدل بوده و این امر می‌تواند دلیل اصلی نوسانات و رفتار متفاوت مدل مذکور در مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان در رودخانه‌های مختلف منطقه باشد.

ج: نتایج مدل‌های هوش مصنوعی نشان از تأکید و نیاز بیشتر - برای تنظیمات و بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های هوش مصنوعی برای هر شرایط خاص و حاکم بر مقادیر جریان در رودخانه مورد مطالعه است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد ۸ الگوی مختلف مدل استوکاستیک $ARIMA$ و سه مدل هوش مصنوعی ANN، ELM و SVM در مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان ۷ رودخانه در غرب و جنوب-غربی دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌منظور سری زمانی ماهیانه جریان رودخانه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۷۱ (۲۰۲۰-۱۹۹۱) مورد استفاده قرار گرفت و ۷۰ درصد آن (۱۳۷۱-۱۳۹۰) برای آموزش مدل‌ها و ۳۰ درصد باقیمانده آن (۱۳۹۱-۱۴۰۰) برای آزمون یا صحت‌سنجی مدل‌ها در نظر گرفته شد. به‌دلیل اهمیت ویژه عملکرد مدل‌ها جهت پیش‌بینی جریان رودخانه در دوره آزمون و محدودیت صفحات مقاله، نتایج مطالعه صرفاً محدود به ارائه نتایج دوره آزمون شد. نتایج حاصل و تفسیر آن‌ها در بندهای زیر قابل خلاصه است:

بر اساس نمودار ACF تنها خودهمبستگی یک‌ماهه و فصلی (۱۱-۱۳) در سری زمانی جریان ماهیانه در تمام رودخانه‌های منطقه مطالعاتی معنی‌دار بوده، لذا بر مبنای آن ۸ الگوی مناسب مدل استوکاستیک $ARIMA(p,d,q)$ مشخص شد.

uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 26: 523-37.

Anandan, P., Sabeenian, R.S., 2018. Fabric defect detection using discrete curvelet transform. *Procedia computer science*, 133: 1056-1065.

Chu, H., Wei, J., Wu, W., Jiang, Y., Chu, Q., Meng, X., 2021. A classification-based deep belief networks model framework for daily streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, 595: 125967.

Delnaz, A., Rakhshandehroo, G., Neko, M. R., 2017. Application of GRNN model compared to ANN and RBF models in estimating confined aquifer parameters. *Journal of Geohydrology*, 2(1): 102-117. [In Persian]

Farfán, J.F., Andino, P., Ortiz-Rodríguez, D., Vivanco-Gutiérrez, G., 2020. A hybrid neural network-based technique to improve the flow forecasting of physical and data-driven models: Methodology and case studies in Andean watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100652.

Fathabadi, A., Gholami, H., Salajeghe, A., Azaivand, H., Khosravi, H., 2009. Drought forecasting using neural network and stochastic models. *American Eurasian Network for Scientific Information*, 3(2): 137-146.

Feng, B.F., Xu, Y.S., Zhang, T., Zhang, X., 2022. Hydrological time series prediction by extreme learning machine and sparrow search algorithm. *Water Supply*, 22(3): 3143-3157.

Feng, D., Fang, K. and Shen, C., 2020. Enhancing streamflow forecast and extracting insights using long-short term memory networks with data integration at continental scales. *Water Resources Research*, 56(9), 2019WR026793.

Ghazanfari Moghaddam, M. S., Farahmandrad, M., Barani, G., Pourreza Bilandi, M., 2018. Multi-objective calibration of a conceptual hydrological model based on the geomorphologic instantaneous unit hydrograph (Case study: Qarasu sub-basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3): 161-175. [In Persian]

Hamel, L.H., 2011. Knowledge discovery with support vector machines, John Wiley & sons Publication, (3), 257.

Hejabi, S., Bazrafshan, J., Gherman, N., 2013. Comparison of the skill of stochastic models and artificial neural networks in modeling and forecasting the values and categories of the standardized precipitation index. *Physical Geography Research Quarterly*, 45(2): 1-22. [In Persian]

Kottegoda, N.T., 1980. Stochastic water resources technology. Springer: 384.

Liong, S.Y., Khu, S.T., Babovic, V., Havnoe, K., Chan, W.T. and Phoon, K.K., 2000. Construction of

دلتاز، ع.، رخشنده رو، غ.، نیکو، م. ر.، ۱۳۹۶. کاربرد مدل GRNN در قیاس با مدل‌های ANN و RBF در تخمین پارامترهای آبخوان محبوس، فصلنامه ژئوهیدرولوژی، ۲(۱): ۱۱۷-۱۰۲.

سراوانی، ز.، محمدرضایپور، ا.، سیاسر، ه.، ۱۴۰۲. پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استان گلستان با مدل‌های هوش مصنوعی، فصلنامه ژئوهیدرولوژی، ۸(۲): ۱۵-۲۸.

صالح‌آبادی، آ.، عمادی، س. ر.، ۱۴۰۲. توسعه شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی جزر و مد دریای خزر بر اساس الگوریتم لونبرگ مارکوارت، مجله هیدروژئولوژی، ۸(۱)، ۶۱-۷۷.

غضنفری مقدم، م. ص.، فرهنگ‌نادر، م.، بارانی، غ.، پوررضایی‌لندی، م.، ۱۳۹۷. واسنجی چند هدفه مدل هیدرولوژیکی مفهومی مبتنی بر هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیکی (مطالعه موردی: زیر حوضه قره سو)، فصلنامه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، دوره ۲۵، شماره ۳، صص ۱۶۱-۱۷۵.

مجددی‌ریزه‌ئی، ح.، حبیب‌نژادروشن، م.، شاهی، ک.، پردهان، ب.، ۱۳۹۹. کارایی مدل ترکیبی نسبت فراوانی- ماشین بردار پشتیبان در شناسایی مناطق مستعد سیل آبخیز کلات. اکو هیدرولوژی، ۷(۱)، ۷۷-۹۵.

نوشیار، م.، قاسمی مرزبالی، ع.، ۱۳۹۸. پیش‌بینی روزانه قیمت برق با روش مبتنی بر ماشین یادگیری شدید، سیستم پیش‌پردازش‌کننده و الگوریتم بهبودیافته کلونی جستجوی ویروس، مجله هوش محاسباتی در مهندسی برق، ۱۰(۲)، ۶۷-۱۰۱.

Reference

Abrahart, R., Kneale, P.E., See, L.M., 2004. Neural networks for hydrological modeling. CRC Press.

Adnan, R.M., Liang, Z., Heddiam, S., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Li, B., 2019. Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro-meteorological data as inputs. *Journal of Hydrology*, 124371.

Ahmadpour, A., Mirhashemi, S. H., Haghighatjoo, P., 2019. Evaluation of classic models, the conceptual IHACRES model, and the hybrid ARMA-ANN model in daily rainfall-runoff simulation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3): 727-736. [In Persian]

Alvisi, S., Franchini, M., 2011. Fuzzy neural networks for water level and discharge forecasting with

Conference on Hydro-Science and Engineering, Seoul, Korea. 1: 872-892.

Tayyab, M., Zhou, J., Dong, X., Ahmad, I., Sun, N., 2019. Rainfall-runoff modeling at Jinsha River basin by integrated neural network with discrete wavelet transform. *Meteorology Atmospheric Physics*, 131(1): 115–125.

Wagena, M.B., Goering, D., Collick, A.S., Bock, E., Fuka, D.R., Buda, A., Easton, Z.M., 2020. Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models. *Environmental Modelling & Software*, 126: 104669.

Wagener, T., Van Werkhoven, K., Reed, P., Tang, Y., 2009. Multiobjective sensitivity analysis to understand the information content in streamflow observations for distributed watershed modeling. *Water resources research*, 45(2): 1-5

Xiao, Z., Liang, Z., Li, B., Hou, B., Hu, Y., Wang, J., 2019. New flood early warning and forecasting method based on similarity theory. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24: 04019023.

Zeynoddin, M., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Azari, A., Gharabaghi, B., 2020. A generalized linear stochastic model for lake level prediction. *Science of The Total Environment*, 723: 138015.

non-linear models in water resources with evolutionary computation.

Mojaddadi Rizeei, H., Habibnezhad Roshan, M., Shahedi, K., Pordanjani, B., 2020. Efficiency of the hybrid frequency ratio-support vector machine model in identifying flood-prone areas in the Kalat watershed. *Ecologyhydrology*, 7(1): 77-95. [In Persian]

Ni, L., Wang, D., Singh, V.P., Wu, J., Wang, Y., Tao, Y. and Zhang, J., 2020. Streamflow and rainfall forecasting by two long short-term memory-based models. *Journal of Hydrology*, 583: 124296.

Nirumand H.A., Bozorgnia A.Gh., 2010. Introduction to time series analysis. Ferdousi University Publications, Mashhad.

Niu, W.J., Feng, Z.K., 2021. Evaluating the performances of several artificial intelligence methods in forecasting daily streamflow time series for sustainable water resources management. *Sustainable Cities and Society*, 64: 102562.

Noori, N., Kalin, L., 2016. Coupling swat and ann models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533: 141–151.

Noshiyar, M., Ghasemi Marzbali, A., 2019. Daily electricity price forecasting using an extreme learning machine-based method, a pre-processing system, and an improved virus colony search algorithm. *Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 10(2): 67-101. [In Persian]

Papacharalampous, G., Tyralis, H., Koutsoyiannis, D., 2019. Comparison of stochastic and machine learning methods for multi-step ahead forecasting of hydrological processes. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 33(2): 481-514.

Salas J.D, Delleur W, Yevjevich V, Lane W.L., 1988. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications, Littleton. 458.

Salehabadi, A., Emadi, S. R., 2023. Development of neural networks for predicting Caspian Sea tides based on the Levenberg-Marquardt algorithm. *Journal of Hydrogeology*, 8(1): 61-77. [In Persian]

Saravani, Z., Mohammadreza pour, A., Siasar, H., 2023. Prediction of groundwater quality parameters in Golestan province using artificial intelligence models. *Journal of Geohydrology*, 8(2): 15-28. [In Persian]

Shahin, M., Chen, F.F., Maghanaki, M., Firouzanjbar, S., Hosseinzadeh, A., 2024. Evaluating the fidelity of statistical forecasting and predictive intelligence by utilizing a stochastic dataset. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-31.

Stelling, G.S., 2000. A numerical method for inundation simulations. In *Proc. 4th International*

پیش بینی آبدهی چشمه های کارستی در مواقع خشکسالی با هندسه فرکتالی (مطالعه موردی استان کرمانشاه)

توران کولانی^{۱*}، محمد نخعی^۲، مهران آراین^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبشناسی، دانشگاه علوم تحقیقات تهران، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه خوارزمی کرج، کرج، ایران.

۳- استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه علوم تحقیقات تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: tourankulani@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

استان کرمانشاه با مساحتی در حدود ۲۴۹۵۳ کیلومتر مربع در میانه ضلع غربی کشور واقع شده است که قسمت عمده آن در داخل زون های زاگرس رورانده و چین خورده قرار دارد و اغلب ارتفاعات آن، از سازندهای سخت (کربناته) تشکیل شده است. پهنه های کارستی استان کرمانشاه نقش مهمی در تأمین و تغذیه آبخوان ها دارند. روش نوین برای مطالعه چشمه های کارستی هندسه فرکتالی است. مشخصه اصلی فرکتال ها ابعاد فرکتالی است که می توانند اعداد غیر صحیح را به خود اختصاص دهند. در آنالیزهای فرکتالی مهم ترین کاری که انجام می شود، تعیین موضوع تحلیل شده است. در این تحقیق سعی شده است ۵۹ چشمه از چشمه های کارستی استان انتخاب و وضعیت زمین شناسی، تکتونیک، وضعیت بارش، میزان هماهنگی آبدهی با تغییرات بارش، رفتار هیدرولیکی چشمه ها، گنجایش مخزن و زمان خشکسالی چشمه ها و در نهایت پیش بینی وضعیت کلی چشمه های کارستی و عکس العمل آن ها نسبت به تغییرات بارش به وسیله هندسه فرکتال بررسی گردد. نتایج این تحقیق پیش بینی دوره های خشکی چشمه های کارستی استان با هندسه فرکتال، تعیین نوع سیستم چشمه های کارستی استان، شدت دوره خشک یا آبدار چشمه ها و مقایسه مناطق مختلف استان از نظر پیشرفتگی کارست و تاثیر آن بر روی چشمه های کارستی استان می باشد.

کلمات کلیدی: بعد فرکتال، چشمه های کارستی، خشکسالی، هندسه فرکتال.

مقدمه

عدد نیستند. آنچه فراکتال ها را جذاب تر می کند، این است که بهترین توصیف های ریاضیاتی موجود برای بسیاری از پدیده های طبیعی، مانند سواحل، کوه ها یا بخش هایی از موجودات زنده هستند. دو مورد از مهم ترین خصوصیات فراکتال ها، خودتشابهی Self-similarity و بُعد غیر صحیح Non-integer Dimension آن ها است.

الطافی دادگر و نخعی (۱۳۸۹) در مقاله ای تحت عنوان تخمین نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل فرکتالی با روش مونت کارلو نفوذپذیری محیط متخلخل فرکتالی را با استفاده از شبیه سازی و تخمین زده اند. به این منظور با استفاده از نتایج و اندازه گیری های مطالعات قبلی بر روی چند نمونه ماسه سنگ

فراکتال یا برخال شاخه جدیدی از ریاضیات و هنر است. اغلب سیستم های فیزیکی در طبیعت و بسیاری از مصنوعات بشر مطابق هندسه استاندارد اقلیدسی اشکال هندسی منظمی ندارند. هندسه فراکتالی روش های تقریباً نامحدودی برای توصیف، سنجش و پیش بینی این پدیده های طبیعی ارائه می کند. بسیاری از افراد مجذوب تصاویری هستند که به آن ها فراکتال می گویند. فراتر از تصور معمول مردم، هندسه فراکتالی درباره ریاضیات است که آن را فرمول های پیچیده و کسل کننده می بینند. این هندسه، ریاضیات را با هنر در می آمیزد و نشان می دهد که معادله ها چیزی جز یک مجموعه

نیست و صاعقه در خط راست حرکت نمی‌کند. قبل از Mandelbrot ریاضیدانان معتقد بودند که بیشتر الگوهای طبیعت بسیار پیچیده، نامنظم، ذره ذره و بی‌شکل هستند تا بتوان به‌صورت ریاضی آن‌ها را توصیف کرد. اما Mandelbrot ژئومتری فرکتال جدیدی از طبیعت بر اساس بُعد چهارم و اعداد پیچیده ارائه کرد که مستعد شرح ریاضی نامنظم‌ترین و بدون شکل‌ترین اشکال دنیای واقعی است. آن‌طور که Mandelbrot می‌گوید، ژئومتری فرکتال فصلی از ریاضی نیست، بلکه چیزی است که به هر کسی کمک می‌کند تا دنیا را به‌صورت متفاوتی ببیند.

یازده درصد مساحت ایران را سازندهای کربناته کارستی پوشانده است (افراسیابیان، ۱۳۷۲؛ رئیسی و کوثر، ۱۹۹۷) حجم آب ذخیره شده در این مناطق می‌تواند نیاز آبی بسیاری از شهرها و روستاها را تامین کند. شهرهای بزرگی همچون شیراز، کرمانشاه و مناطق وسیعی از استان ایلام، لرستان و کردستان از منابع آب کارست تغذیه می‌کنند. صدها چشمه کارستی از سازندهای کارستی با آبدی قابل ملاحظه و کیفیت بسیار خوب خارج می‌گردند. آب این چشمه‌ها مورد استفاده شرب، کشاورزی و آب‌معدنی قرار می‌گیرد. اکثر این چشمه‌ها گردشگران بسیاری را پذیرایی می‌کنند. سنگ‌های کارستی به میزان وسیعی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق سعی می‌شود چشمه‌های هر زون یا بخشی انتخاب و وضعیت زمین‌شناسی، تکتونیک، وضعیت بارش، میزان هماهنگی آبدی با تغییرات بارش، رفتار هیدرولیکی چشمه‌ها، گنجایش مخزن و زمان خشکسالی چشمه‌ها، ضریب تغییرات دبی و خصوصیات هیدروشیمیایی، نوع سیستم کارستی چشمه و در نهایت پیش‌بینی وضعیت کلی چشمه‌های کارستی و عکس‌العمل آن‌ها نسبت به تغییرات بارش بررسی گردد. برای پیش‌بینی وضعیت چشمه‌ها در زمان خشکسالی از هندسه فرکتالی استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه با مساحتی در حدود ۲۴۹۵۳/۲۸۶ کیلومترمربع در میانه ضلع غربی کشور واقع شده است که قسمت عمده آن در داخل زون‌های زاگرس روراند و چین‌خورده قرارداد و اغلب ارتفاعات آن، از سازندهای سخت (کربنات) تشکیل شده است. پهنه‌های کارستی استان کرمانشاه نقش مهمی در تأمین و تغذیه آبخوان‌ها دارند. قسمت عمده‌ای

مانند تخلخل، بعد فرکتالی، حد بالایی خاصیت فرکتالی و نفوذپذیری ذاتی، با استفاده از مدل احتمالاتی مونته کارلو یک سری اعداد تصادفی و رندوم بین ۰ تا ۱ تولید و اندازه قطر منافذ تعیین گردیده است. نهایتاً مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌های ماسه‌سنگ شبیه‌سازی و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتایج این محققان نشان داد که مدل شبیه‌سازی مونته کارلو بدون نیاز به ضرایب تجربی، گسسته‌سازی مکانی و تنها با تعیین چند پارامتر موردنیاز در آزمایشگاه، به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی نفوذپذیری محیط متخلخل فرکتالی است. مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذپذیری و محاسبه شده با همبستگی ۸۳ درصد برهم منطبق می‌باشند. فاطمه فخری، ۱۳۹۳ در پایان‌نامه خود با عنوان "پیش‌بینی دبی و زمان مرگ چشمه‌های کارستی ساسان و سیدحسین و روند تغییرات تراز آب در چاه‌های پیژومتری در دشت کازرون با هندسه فرکتالی" بعد فرکتالی چشمه ساسان و سید حسین و همچنین چاه‌های پیژومتری واقع در منطقه کازرون را با روش هندسه فرکتالی به دست آورده تا پتانسیل منطقه را از نظر تشکیل چشمه ارزیابی کرده و آبدی نیز پیش‌بینی گردد.

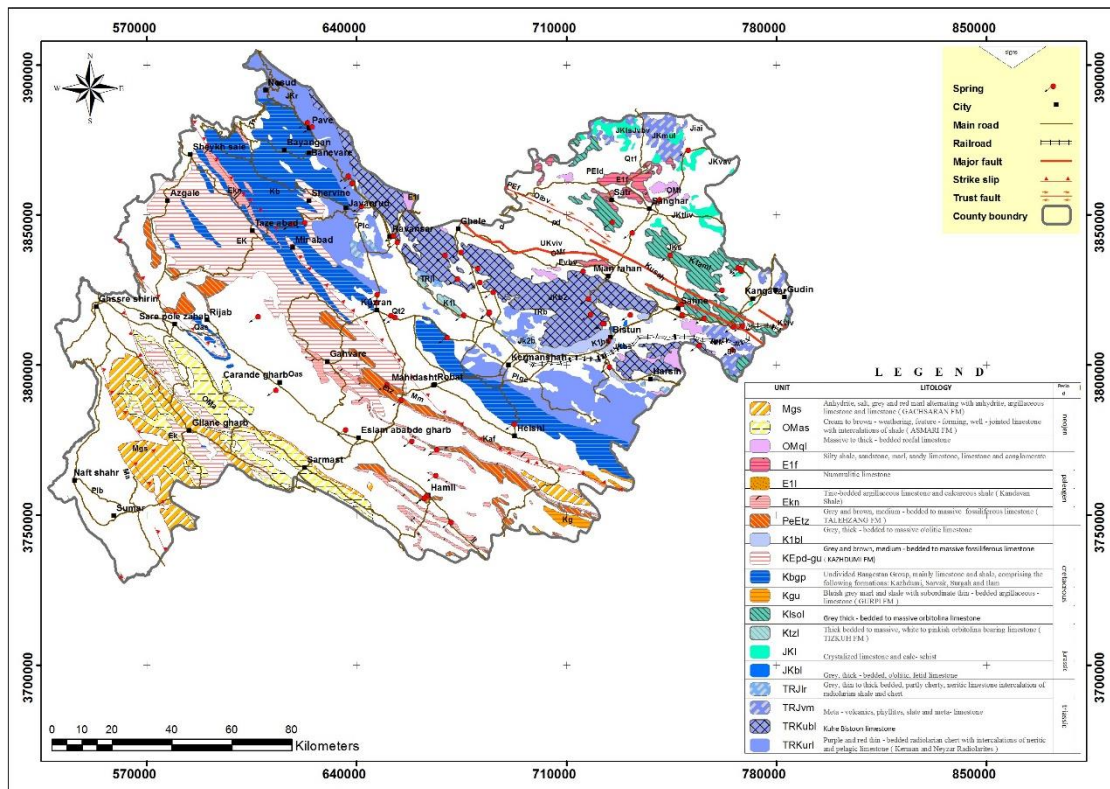
Pachepsky, (2004) در مقاله‌ای تحت عنوان کاربردهای ژئومتریک فرکتال در هیدرولوژی خاک، ویژگی‌های ژئومتریک ذرات اولیه، توده‌ها، سوراخ‌ها و سطوح خاک را واجد اهمیت فوق‌العاده‌ای برای فهم و مدیریت خاک‌ها می‌داند. Sagar and Chokalingam, (2004) در مقاله‌ای با عنوان بُعد فرکتال فضای غیر شبکه‌ای حوضه آبریز به نتایج زیر رسیده‌اند:

تولید فضای غیر شبکه‌ای M از حوضه X بازسازی شده از شبکه کانال، طوری که شبکه کانال در X شامل می‌شود و دوم اینکه تجزیه M به NOD برای محاسبه بعد به شکل وابسته هست. Mandelbrot. (1982). The Fractal Geometry of Nature. W.H. Freeman. Freeman and Company.

فرمول بسیاری از دیدگاه‌های او را درباره ژئومتری فرکتال طبیعت، دنیای واقعی بُعد چهارم خلاصه می‌کند. این با اشکال ایده‌آل اقلیدسی ابعاد اول، دوم و سوم در تضاد است که تقریباً همه ریاضیدانان قبل از Mandelbrot با آن سرو کار داشته‌اند. ژئومتری اقلیدسی درباره کمال است که در طبیعت وجود ندارد. این شکل ابر، کوه یا درخت یا خط ساحلی را شرح نمی‌دهد. آن‌طور که Mandelbrot, (1982) در کتابش ژئومتری فرکتال طبیعت شرح می‌دهد، ابرها کره نیستند. کوه‌ها مخروط نیستند، خطوط ساحل دوایر نیستند و کشتی بادبانی تخت

است. پهنه‌های کارستی نقش مهمی در تأمین و تغذیه آبخوان‌های منطقه پیدا کرده‌اند. به‌طوری‌که منطقه مورد مطالعه با بیش از ۵۵۰ سراب و چشمه کارستی یکی از استان‌هایی است که عمده منابع تأمین آب سکونتگاه‌های آن را همین سراب‌ها و چشمه‌ها و آبخوان‌های کارستی تشکیل می‌دهد.

از محدوده سیاسی استان کرمانشاه در بخش روراند و چین‌خورده زاگرس قرار دارد (شکل ۱). پیکربندی بخش قابل‌توجهی از این ارتفاعات از سازندهای سخت (کربنات) تشکیل شده است که تحت فازهای زمین‌ساختی مختلف شکل گرفته‌اند. لذا شرایط مناسبی از نظر زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی جهت توسعه و تکامل فرآیند کارست فراهم شده



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کارست استان با جانمایی چشمه‌های کارستی.

Figure 1. Karst geological map of the province with the location of karst springs.

از مقیاس و استخراج روابط موجود بین اشکال هندسی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف می‌پردازد. در این بررسی برای شرح و تعیین ابعاد فرکتالی آبدی چشمه‌های کارستی مورد مطالعه در دوران مرطوب و غیر مرطوب فرض نماییم n تا دوره خشک (d_1 و d_2 و ... و d_n) در سرتاسر یک تراز خاص وجود دارد. برای استخراج بعد فرکتالی دوره خشک و مرطوب واحد دوره خشک (d)، را به‌صورت یک دوره یک‌روزه، یک‌ماهه و یا یک‌ساله بر اساس داده‌های دسترس انتخاب می‌کنیم (برای مثال، همراه نماینده ۱ cm روی منحنی باشد). یک طول معیار برابر واحد اولیه برای مرحله ۱ انتخاب می‌نماییم، معیار اندازه‌گیری را در امتداد دوره خشک می‌لغزانیم و تعداد آن‌ها، n_1 را برای واحد اولیه می‌شماریم. مرحله ۳ را تکرار کرده و زمان استمرار متفاوت دوره خشک را برداشت می‌کنیم تا نتیجه حاصل که یک

روش‌شناسی

به‌منظور بررسی و پیش‌بینی دبی چشمه‌های کارستی در زمان خشکسالی با هندسه فرکتالی، مراحل تهیه نقشه‌های هم‌معیار انجام شد. تهیه این نقشه‌ها با استفاده از بسته نرم‌افزاری ۹.۲ ARC GIS صورت گرفت. داده‌های موردنیاز جهت تهیه این نقشه‌ها از منابع مختلفی جمع‌آوری شده‌اند. بعضی از پدیده‌های اطراف ما در چهارچوب هندسه اقلیدسی قابل توجیه نمی‌باشند. در هندسه اقلیدسی بُعد صحیح مانند یک، دو و سه می‌باشند و هندسه اقلیدسی تنها می‌تواند پدیده‌ای یک‌بعدی، دو و سه‌بعدی و یا بیشتر را توضیح دهد. در بُعد فرکتالی این نگرش جدید به وجود آمده است که بُعد پدیده‌ها و رخدادها را عدد صحیح فرض نکنیم و لذا بُدهای $1/7$ و $1/5$ و امثال آن مطرح می‌شود. یعنی بُعد فرکتالی به بررسی پدیده‌های مستقل

داده‌های مربوط به دبی ۵۹ چشمه‌های استان از اطلاعات و آمار جمع‌آوری شده توسط شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه و آمار مربوط به میزان دما، بارش، رطوبت و تبخیر از سایت اطلاعات و آماری سازمان هواشناسی استان کرمانشاه به صورت نقطه‌ای در محیط نرم‌افزار اکسل وارد شده سپس به محیط ۹/۲ GIS ARC فراخوانده شده‌اند. این داده‌های نقطه‌ای شامل موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها (جدول ۱)، میزان دما، بارش و تبخیر می‌باشد. تمام داده‌ها به یک سیستم تصویری utm و یک سیستم مرجع WGS84 درآمده‌اند. سپس به شمارش ماهه‌ای خشک و مرطوب هر چشمه پرداخته که نتایج آن به شرح جدول ۲ است. دبی متوسط سالانه دوره آماری چشمه‌ها را به دست آورده چشمه‌ها را بر اساس آن از بیشینه به کمینه ردیف می‌کنیم (جدول ۳). در ادامه نسبت به رسم منحنی‌های لگاریتمی-لگاریتمی از زمان استمرار خشک (مرطوب) انجام گردید (شکل ۲). در ادامه چشمه‌ها را بر اساس بعد فرکتالی خشک و مرطوب از بیشترین به کمترین ردیف کرده جدول ۴ و جدول ۵ و نتیجه را با دبی چشمه‌ها مقایسه می‌کنیم. در ادامه نقشه هم بعد فرکتال را رسم کرده و با درجه کارستی شدن استان مقایسه می‌کنیم (شکل ۳ و ۴). برای یافتن ارتباط بین میزان بارندگی و دبی چشمه‌ها اقدام به رسم منحنی‌های بارندگی-دبی برای تمامی چشمه‌ها می‌کنیم (شکل ۵). پس از بررسی منحنی‌های لگاریتمی-لگاریتمی از زمان استمرار خشک چشمه‌های مورد مطالعه استان کرمانشاه نتایج زیر حاصل گردید که هر چشمه پس از قطع بارندگی چه زمانی را در دوره خشکی به سر می‌برد (جدول ۶).

سکناس از اعداد صحیح است به دست آید ($n_1, n_2, \dots, n_n$). کار را ادامه داده و اعداد مراحل را به همان صورت برای پیدا نمودن حداکثر مراحل ($n_1, n_2, \dots, n_n$ و $N(1)$) مقدار $d(1)$ که تخمینی از حداکثر زمان استمرار خشکی $D(1)$ با واحد $d(1)$ هست را به دست می‌آوریم. طول زمانی دوره را یک واحد افزایش می‌دهیم و سپس مراحل ۳ تا ۵ را تکرار کنید. نتیجه حاصل عدد مرحله $N(2)$ با طول دوره $d(2)$ و زمان استمرار خشکی $d(2)$ $N(2)$ هست. مراحل را تا انجام دستورالعمل مشابه ادامه دهید تا اینکه طول دوره زمانی برابر با طول حداکثر طول زمان استمرار خشکی در داده‌های ثبت شده گردد. اکنون چندین تخمین و برآورد مختلف از مجموع زمان استمرار خشکی، $d(j)$ و اعداد $N(j)$ وجود دارد. در صورتی که m و 2 و $1=j$ که m تعداد حلقه‌های ممکن هستند که وجود دارد. واضح است که افزایش در $d(j)$ به سبب کاهش در $D(j)$ خواهد بود. برای نشان دادن روش کار در پیدا کردن زمان استمرار دوره‌های بارانی و غیر بارانی و تعداد آن‌ها مقدار دبی ماهیانه در چشمه‌های مختلف استان در (جدول ۳) ارائه شده است. جهت به دست آوردن بعد فرکتال در چشمه‌های مورد نظر برای تمام چشمه‌ها منحنی لگاریتمی-لگاریتمی زمان استمرار ماهه‌ای خشک (تر) را رسم نموده بهابازارم خطی با بیشترین برازش بر روی نقاط رسم شده استمرار ماهه‌ای خشک (تر) چشمه‌ها به دست می‌آید. بعد فرکتال از شیب این خط به دست می‌آید.

نتایج و بحث

جدول ۱- موقعیت چشمه‌های کارستی مورد مطالعه استان کرمانشاه.

Table 1. Location of studied karst springs in Kermanshah province.

y	x	Name of the spring	row	y	x	Name of the spring	row
3816704	748484	Deh moradkhan	31	3809116	670141	nilufer	1
3862946	637199	Ghori ghaleh	32	3816840	718110	bernaj	2
3793390	650099	kashineh	33	3813753	722437	berkeh	3
3815486	755863	Bid sorkh	34	3808071	724028	biston	4
3763087	666430	Mileh sar	35	3813782	722167	najibaran	5
3778296	636295	arkavazi	36	3817519	684326	Khezre zendeh	6
3836559	669471	Bi abr	37	3823474	646821	Gharah daneh	7
3815814	652750	Bor bor	38	3842920	652248	ravansar	8
3860531	638374	kavat	39	3828578	673623	hashilan	9
3847498	725253	galvig	40	3816431	651332	Mir azizi	10
3788262	654802	Chahar zabar	41	3820719	646634	tiran	11
3847385	622707	bes	42	3799291	724248	chehr	12
3804941	765354	khiromandan	43	3824219	685506	sarableh	13
3836524	744590	sirijan	44	3840861	653575	gaberri	14
3831263	768169	garmkhani	45	3780294	692467	sarveno	15
3806370	754296	garos	46	3827507	681118	sorkal	16
3855042	741048	Gareh darband	47	3816630	731216	Baba rasol	17
3831138	715577	Armani jan	48	3774540	658353	shian	18
3820129	748413	darband	49	3832277	767152	fesh	19

3871523	750503	charmaleh	50	3824884	761865	Kabotar laneh	20
3791550	613078	rashmineh	51	3812679	765717	marab	21
3816006	607097	Ghochi bashi	52	3747543	671440	harasam	22
3817121	683967	Khezer elyas	53	3832110	680360	varmenjeh	23
3756337	663343	Gave ravani	54	3832094	767975	bayjan	24
3837541	674734	berenjan	55	3812996	768772	soltan	25
3846970	618314	Bard zangir	56	3771723	666812	shahini	26
3755605	662563	Metrovan gave ravani	57	3822005	717303	gaznahleh	27
3844006	731836	navron	58	3852824	641662	Sararod olia	28
3880636	623632	Mir abad	59	3816620	675724	yavari	29
-	-	-	-	3879332	625135	holly	31

جدول ۲- شمارش ماه‌های خشک (تر) چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه.

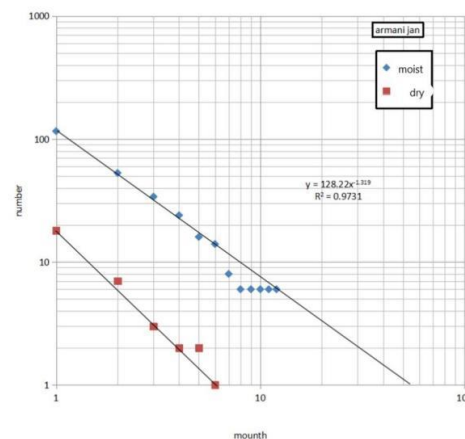
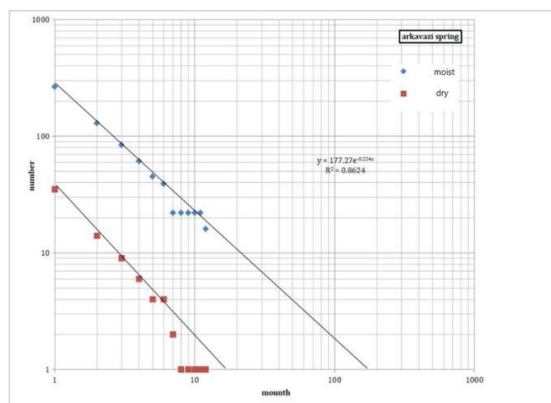
Table 2. Counting dry (wetter) months of karst springs in Kermanshah province.

Armani jan												
Period(month)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Number of wet months	116	53	34	24	16	14	8	6	6	6	6	6
Number of dry months	18	7	3	2	2	1	-	-	-	-	-	-
Baba rasol												
Period(month)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Number of wet months	264	128	83	60	41	40	20	18	18	18	18	18
Number of dry months	61	28	13	10	7	5	4	4	3	3	1	-

جدول ۳- آبدهی متوسط سالانه چشمه‌ها از ماکزیمم به مینیمم.

Table 3. The average annual flow of springs from maximum to minimum.

Medium flood	Name of the spring	row	Medium flood	Name of the spring	row	Medium flood	Name of the spring	row
1051	Bor bor	41	2622.739	kashineh	21	28224.06	ravansar	1
1007.308	Mileh sar	42	2494.904	Ghori ghaleh	22	22727	bernaj	2
956.888	Ghochi bashi	43	2420.865	jaberi	23	17922.89	Kabotar laneh	3
809.129	sarableh	44	2309.3	Bi aber	24	13141.35	nijibaran	4
805.769	shahini	45	2210.824	Gharah daneh	25	10344	nilufar	5
619.703	soltan	46	2175.69	Khezre zendeh	26	9020.111	marab	6
591.7142	Chahar zebar	47	1992.845	Sararod olia	27	8846.462	bistoun	7
575	rashmineh	48	1983.296	harasam	28	7605.937	gaznahleh	8
525.8621	sarveno	49	1940.218	berkeh	29	7291.167	khiromandan	9
456.4	charmaleh	50	1551.583	bes	30	6848.6	kavat	10
314.33	Khezer elyas	51	1507	Gaveh ravani	31	6077.407	shian	11
300.129	chehr	52	1494.091	Garm khani	32	5429.407	fesh	12
275.562	berenjan	53	14166.283	holi	33	4933.724	varmenjeh	13
260.965	sorkal	54	1432.444	baijan	34	4884.708	sirijan	14
183.9	Mir abad	55	1422	arkavazi	35	4504.156	tiran	15
96.766	Ghareh darband	56	1376.852	Baba rasoul	36	4346.4	Armani jan	16
92.7	Metrovan gave ravani	57	1347.818	garos	37	4163.8	Bard zanjir	17
86.32	Deh morad khan	58	1322.5	Mir azizi	38	4057.92	yavari	18
2057	navron	59	1164.885	bid sorkh	39	3768	darband	19
			1091.867	gelvij	40	3236.667	hashilan	20



شکل ۲- منحنی‌های لگاریتمی-لگاریتمی از زمان استمرار خشک (تر) چشمه‌ها.

Figure 2. Logarithmic - logarithmic curves of the duration of drier (drier) sprin.

جدول ۴- بعد فرکتال خشک چشمه ها از ماکزیمم به مینیمم.

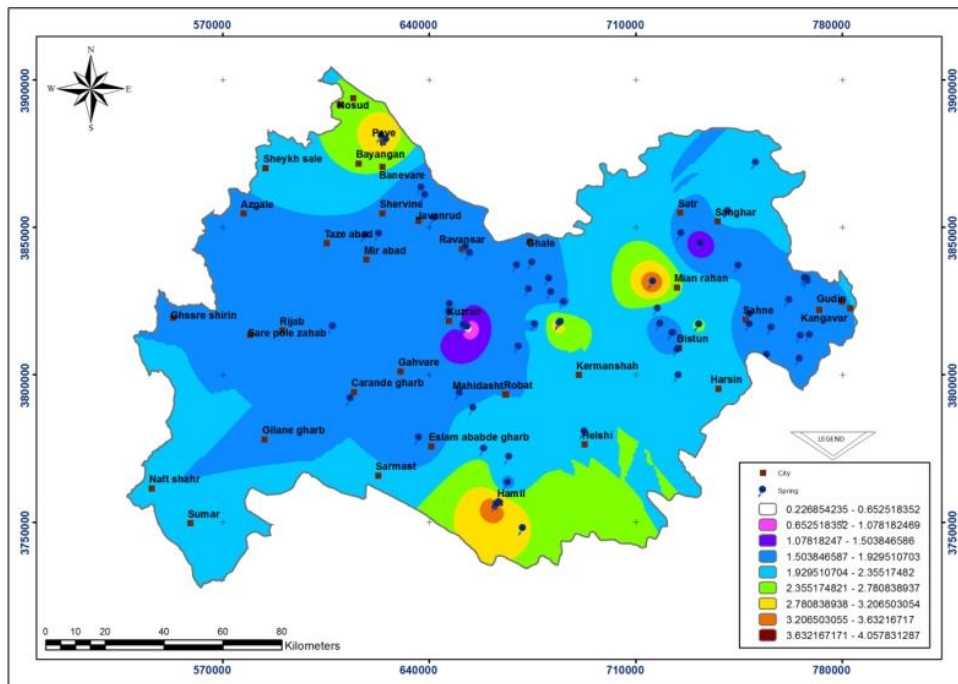
Table 4. The dry fractal dimension of springs from maximum to minimum.

Dry fractal dimension	Name of the spring	row	Dry fractal dimension	Name of the spring	row
1.71	navron	15	8	barnaj	1
1.68	Gaveh ravani	16	5.75	berenjan	2
1.5	jaberi	17	4.11	babarasoul	3
1.5	sarableh	18	3.42	nujibaran	4
1.48	Ghareh darband	19	3.14	Metrovan gaveh ravani	5
1.42	tiran	20	2.81	Khezre elyas	6
1.42	kavat	21	2.71	armanigan	7
1.28	Mileh sar	22	2.61	Mir azizi	8
1.18	Sour kal	23	2.45	Bor bor	9
1.18	yavari	24	2.23	arkovazi	10
1.16	Bide sorkh	25	2.16	Mir abad	11
1	hashilan	26	1.89	Dehmorad khan	12
1	nilufer	27	1.87	Bi abr	13
			1.87	Khezh زنده	14

جدول ۵- بعد فرکتال تر (آبدار) چشمه ها از ماکزیمم به مینیمم.

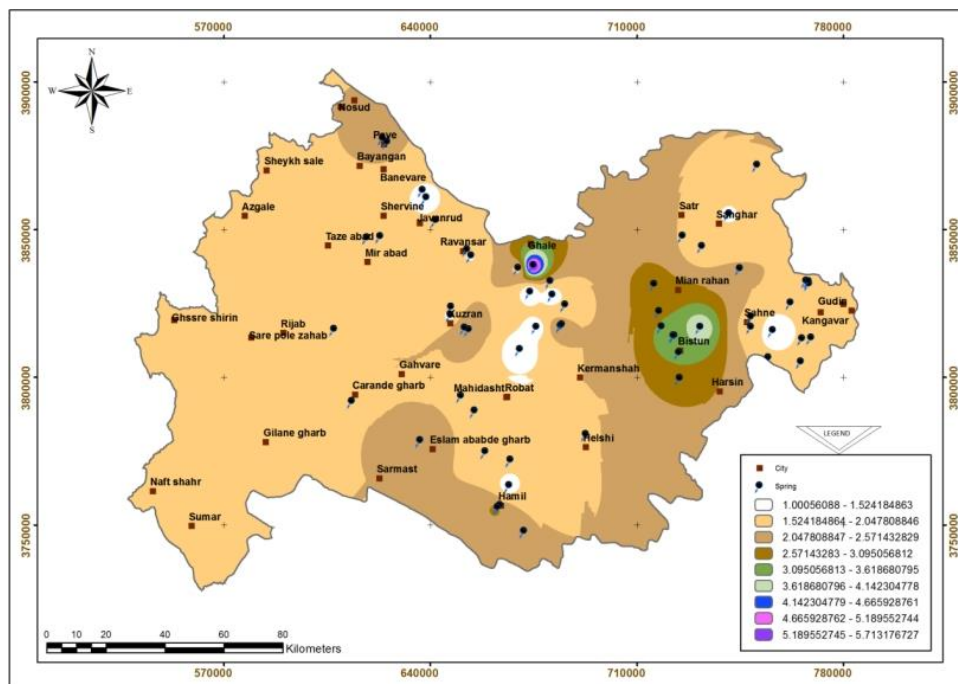
Table 5. The more fractal dimension (juicy) of springs from maximum to minimum.

Wet fractal dimension	Name of the spring	row	Wet fractal dimension	Name of the spring	row
1.7	Ghahar zabar	31	6.76	berenjan	1
1.68	Bid sorkh	32	4.07	Metrovan gave ravani	2
1.68	arkavazi	33	3.57	Khezh elyas	3
1.66	holi	34	3.5	Armani jan	4
1.66	Ghori ghaleh	35	3.3	Gaz nahleh	5
1.66	soltan	36	3	Mir abad	6
1.66	darband	37	2.56	Gave ravani	7
1.65	sorkal	38	2.41	Baba rasoul	8
1.64	garos	39	2.25	Khezh زنده	9
1.64	kashinch	40	2	Mir azizi	10
1.63	Kabitar laneh	41	2	Ghareh darband	11
1.63	shahini	42	1.87	yavari	12
1.63	baijan	43	1.85	nilifar	13
1.62	berkeh	44	1.85	sarableh	14
1.61	Bi abr	45	1.85	ravansar	15
1.6	Gharah daneh	46	1.85	jaberi	16
1.58	kavat	47	1.85	tiran	17
1.57	Ghochi bashi	48	1.81	Dehmorad khan	18
1.55	harasam	49	1.8	barnaj	19
1.55	fesh	50	1.77	bes	20
1.55	sirijan	51	1.76	ghehr	21
1.51	marab	52	1.75	varmenje	22
1.5	rashmineh	53	1.75	Mileh sar	23
1.49	garmkhani	54	1.74	biston	24
1.49	charmeh	55	1.73	kojibaran	25
1.47	Baba ali khiromandan	56	1.73	shian	26
1.42	Bard zanjir	57	1.72	gelvij	27
1.28	navron	58	1.72	Sabz ali hashilan	28
0.22	Bor bor	59	1.7	Sarve no	29
			1.7	Sararod olia	30



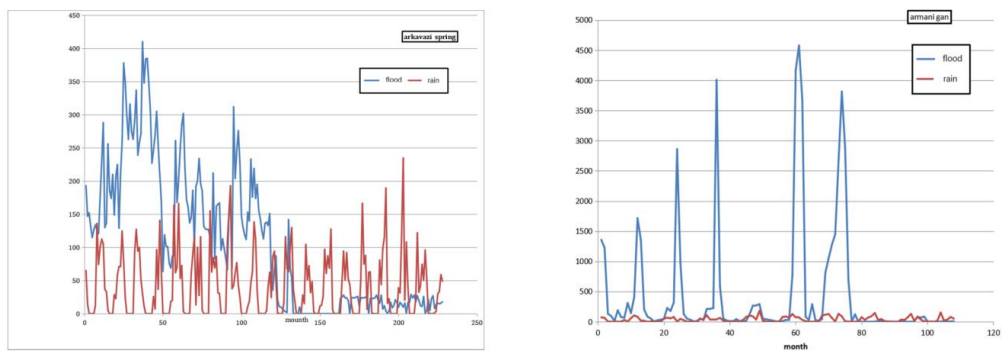
شکل ۳- نقشه هم بعد فرکتال تر.

Figure 3. The map is also more fractal.



شکل ۴- نقشه هم بعد فرکتال خشک.

Figure 4. The map is also a dry fractal dimension.



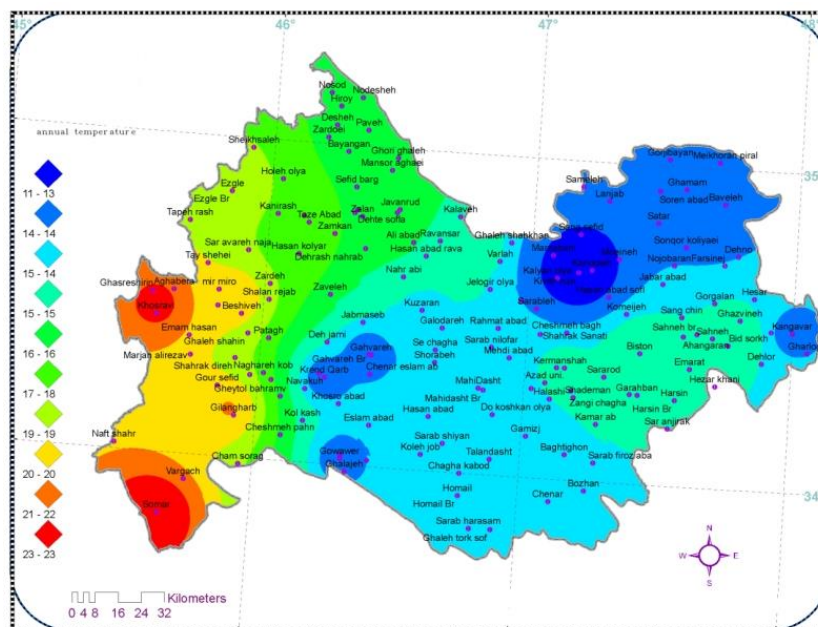
شکل ۵- مقایسه منحنی های بارندگی - دبی چشمه.

Figure 5. Comparison of rainfall curves - spring discharge.

جدول ۶- مدت زمان خشکی چشمه ها پس از قطع بارندگی.

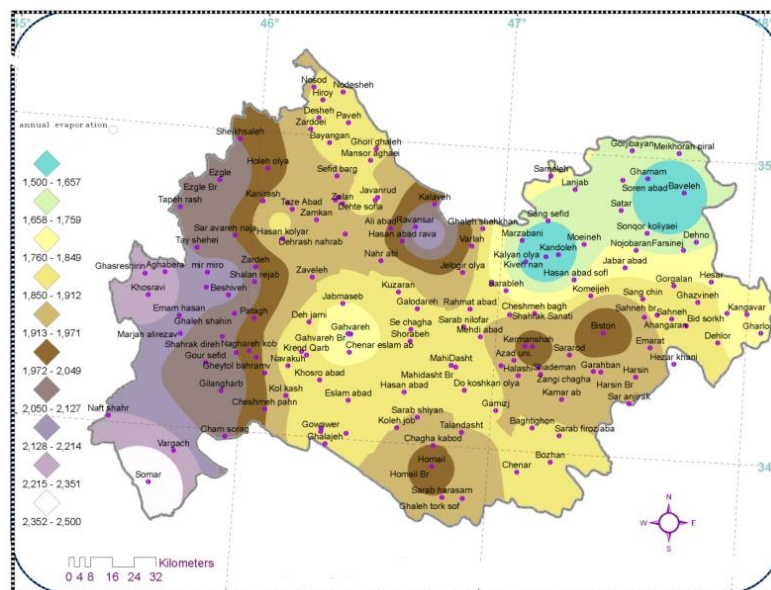
Table 6. The duration of dry springs after the cessation of rain.

Dry time(month)	Name of the spring	row	Dry time(month)	Name of the spring	row
12	Mir abad	14	70	Mileh sar	1
11	Khezre elyas	15	37	Ghareh dar band	2
8	berenjan	16	35	navron	3
8	Bi abr	17	28	Metrovan gaveh ravani	4
8	Sabz ali hashilan	18	24	Bor bor	5
8	yavari	19	24	Bid sourkh	6
7	Armani jan	20	21	Mir azizi	7
7	tiran	21	19	Dehmorad khan	8
7	kavat	22	19	Gave ravani	9
7	njibaran	23	17	arkovazi	10
4	nilofar	24	17	Baba rasol	11
2	jaberi	25	16	Khezh zende	12
2	sarableh	26	16	sorkal	13
1	barnaj	27			



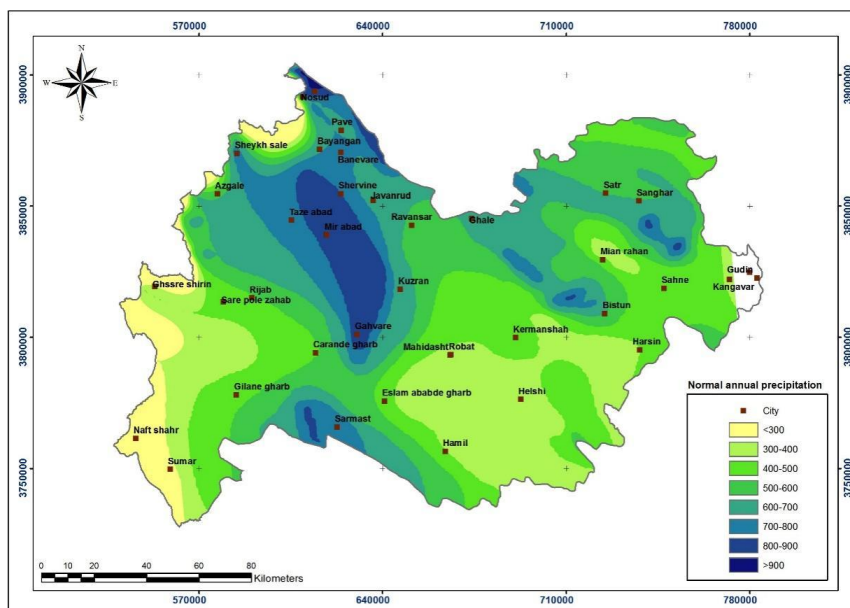
شکل ۶- نقشه هم دمای سالانه استان کرمانشاه (برگرفته از سایت وزرات راه و شهرسازی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه).

Figure 6. (Annual temperature map of Kermanshah province (taken from the website of Ministry of Roads and Urban Development, National Meteorological Organization, General Directorate of Meteorology of Kermanshah Province).



شکل ۷- نقشه تبخیر سالانه استان کرمانشاه (برگرفته از سایت وزرات راه و شهرسازی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه).

Figure 7. Annual evaporation map of Kermanshah province (taken from the website of Ministry of Road and Urban Development, National Meteorological Organization, General Directorate of Meteorology of Kermanshah Province).



شکل ۸- نقشه بارش سالانه استان کرمانشاه (برگرفته از سایت وزرات راه و شهرسازی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه).

Figure 8. Annual precipitation map of Kermanshah province (taken from the website of the Ministry of Roads and Urban Development, National Meteorological Organization, General Directorate of Meteorology of Kermanshah Province).

و تأثیر در توسعه و انحلال در منطقه نسبت به سایر واحدها هست که از تراکم کمتری از گسل و درز و شکاف برخوردارند. بر اساس آمار جمع آوری شده از ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه بیشترین میزان بارندگی در زون‌های زاگرس رو رانده و مرتفع می‌باشد. همچنین پایین‌ترین دمای سالانه و کمترین میزان تبخیر مربوط به زون سندج - سیرجان و قسمت‌های

نتیجه گیری

بیشترین تحول کارست در قسمت‌های زون‌های زاگرس رو رانده و مرتفع هست که به ترتیب دارای تحول کارست زیاد و متوسط است و هرچه به سمت زاگرس چین خورده پیش برویم تحول کارست ضعیف تر می‌شود. مهم‌ترین عامل کارست شدگی در مناطق یادشده به دلیل وجود درز و شکاف و گسل

منابع

- الطافی، د.، نخعی، م. ۱۳۸۹. تخمین نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل فرکتالی با روش مونت کارلو. مجله هیدرو ژئولوژی، دوره ۱، شماره ۲، صفحه ۱-۱۰.
- امور مطالعات منابع آب غرب. ۱۳۷۲. شناسنامه مشخصات فنی چاه‌های اکتشافی و پیژومتر محفوره در نهشته های آبرفتی و سازند سخت، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب، استان کرمانشاه.
- پیترلی، میلانویچ، ترجمه‌ای از رهنمایی، م. ۱۳۸۸. مهندسی زمین شناسی در کارست (جلد اول)، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.
- سازمان تحقیقات منابع آب (تماب). ۱۳۷۲. محاسبه حجم ذخایر تجدید شونده سازند سخت با استفاده از تغییرات آبدهی چشمه ها، کمیته پروژه های تحقیقاتی، دستور العمل شماره (۵)، وزارت نیرو.
- سازمان تحقیقات منابع آب (تماب). ۱۳۶۶. آبنمود چشمه‌های کارستی و سازند های سخت، وزارت نیرو.
- اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه، سازمان هواشناسی کشور، وزرات راه و شهرسازی.
- شوهانی، د.، ۱۳۸۸. بررسی تحول کارست در استان کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، دانشکده علوم.
- فتوت، م.، مهرابی، ع.، ۱۳۸۶. بررسی واکنش چشمه کارستی نیلوفر نسبت به خشکسالی‌های اخیر استان کرمانشاه، کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، شرکت آب منطقه‌ای غرب.
- گزارش و وضعیت آبدهی چشمه‌های کارستی استان، ۱۳۸۹. وزارت نیرو، سازمان آب منطقه‌ای استان کرمانشاه، مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی.
- گزارش وضعیت اقلیمی استان، ۱۳۸۹. اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه، بخش آمار و اطلاعات.
- مهندسین مشاور گاماسیاب، ۱۳۷۷. مطالعات شناسایی سازندهای سخت حوزه گاماسیاب (جلد اول)، گزارش هواشناسی و هیدروژئولوژی شماره ۲ (کرمانشاه)، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب.
- مرکزی و جنوبی استان کرمانشاه که جزء زون مرتفع زاگرس است می‌باشد. بیشترین مقدار بعد فرکتال ترسالی مربوط به قسمت‌های مرکزی و جنوبی استان کرمانشاه در چشمه‌های برنجان ۶/۷۶، متروان گاو روانی ۴/۰۸، خضر الیاس ۳/۵۷ و ارمنی جان ۳/۵ می‌باشد. کمترین مقدار بعد فرکتال خشکسالی در قسمت‌های مرکزی و مربوط به زون رو رانده و مرتفع در چشمه‌های بید سرخ ۱/۱۶، هشیلان ۱، نیلوفر ۱ می‌باشد. موقعیت چشمه‌ها با توجه به تعیین بعد فرکتالی از نظر میزان آبدار بودن و یا خشکی آن‌ها با توجه به منحنی لگاریتمی - لگاریتمی تعیین گردیده است: الف- چشمه‌هایی آبدار هستند که خط ماه‌های مرطوب بالای خط ماه‌های خشک باشد. (چشمه‌های ارمنی جان- برناج- بی ابر- تیران- خضر زنده و ...). ب- چشمه‌های نیمه آبدار در نظر گرفته می‌شوند که خط ماه‌های مرطوب بالای خط ماه‌های خشک قرارگیرد و فاصله خطوط کم باشد. (چشمه های خضر الیاس - بوربور- برنجان- بابا رسول- قره‌در بند و...). ج- چشمه‌هایی خشک در نظر گرفته می‌شوند که خط ماه‌های خشک بالای خط ماه‌های مرطوب قرارگیرد (چشمه های متروان گاوروانی- ناورون). بعد فرکتال چشمه‌ها بر دبی تخلیه آن‌ها مؤثر است. به‌طوری که هر چه بعد فرکتال ترسالی چشمه‌ها بیشتر باشد چشمه با دبی بیشتری تخلیه می‌گردد و بالعکس. به‌طور مثال در چشمه نیلوفر با بعد فرکتال ترسالی ۱ میزان میانگین دبی سالانه تخلیه‌شده ۱۰۳۴۴ مترمکعب و برناج با بعد فرکتال ۱/۸ میزان میانگین دبی سالانه تخلیه‌شده ۲۲۷۲۷ مترمکعب می‌باشد در حالی که چشمه بوربور با بعدفرکتال ۰/۲۲ تنها ۱/۰۵۱ مترمکعب تخلیه دبی سالانه دارد. براساس اطلاعات آماری مربوط به دبی روزانه چشمه‌ها، باران‌سنج‌ها، شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و با توجه به اطلاعات موجود نتیجه می‌گیریم که در زون زاگرس چین‌خورده عمدتاً سیستم کارستی افشان و در زون خردشده سیستم کارستی مجرایبی موجود است، در ضمن پایداری و دوام چشمه ها در مقابل خشکسالی‌ها و نبود بارش در چشمه‌های ظاهرشده در زون چین‌خورده بیشتر از سایر زون‌های و واحدهای زمین شناسی موجود است.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت شرکت آب منطقه ای استان کرمانشاه و اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه و همکار گرانقدر آقای کمال طاهری انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

Review of Water Resources of Kermanshah Province, Western Regional Water Company. [In Persian]

Mandelbrot, B.B., 1982. The Fractal Geometry of Nature. W.H. Freeman and Company.

Michael Frame and Benoit, 2004, A Panorama of Fractals and Their Uses by Fractal Geometry in soil Hydrology. International workshop pedofrac. Barcode Avila, Spain.

Nakhaee, M., Ahadi, A., 2009. Predicting the Duration and Intensity of Wet and Dry Periods in Iran Using the Fractal Dimension Method, Master's Degree, Tarbiat Moallem University of Tehran, Faculty of Science, 10 p. [In Persian]

Nelson, Bryn., 2009. Sophisticated Mathematics Behind African Village Designs Fractal patterns use repetition on large, small scale, San Francisco Chronicle (February 23, 2009).

Petrić, M., translated by Rahnamaee, M., 2009, Engineering Geology in Karst (Volume 1), Islamic Azad University of Shiraz. [In Persian]

Report and Status of Karst Springs Discharge in the Province., 2010. Ministry of Energy, Kermanshah Regional Water Company, Surface and Groundwater Resources Management. [In Persian]

Report on the Climatic Status of the Province., 2010. Kermanshah Province Meteorological Administration, Statistics and Information Section. [In Persian]

Shohani, D., 2009. Investigation of Karst Evolution in Kermanshah Province, Master's Thesis, Razi University of Kermanshah, Faculty of Science. [In Persian]

Water Resources Research Organization (Tamab)., 1987. Hydrograph of Karst Springs and Hard Formations, Ministry of Energy. [In Persian]

Water Resources Research Organization (Tamab)., 1993. Calculation of Renewable Storage Volume in Hard Formations Using Spring Discharge Variations, Research Projects Committee, Directive No. (5), Ministry of Energy. [In Persian]

West Water Resources Studies Office., 1993. Technical Specifications Log of Exploratory and Piezometric Wells Drilled in Alluvial Deposits and Hard Formations, Western Regional Water Company, Kermanshah Province. [In Persian]

ملکی، ا.، ۱۳۸۰. تحول اشکال کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی (رساله دکتری)، دانشگاه تربیت مدرس.

ملکی، ا.، ۱۳۸۶. نقش ریخت زمین‌شناسی کارست در بررسی هیدروژئولوژی ناهمواری‌های بیستون و پراو، کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، شرکت آب منطقه‌ای غرب.

مهندسین مشاور گاماسیاب، ۱۳۷۷. مطالعات شناسایی سازندهای سخت حوزه گاماسیاب (جلد دوم)، گزارش هیدروژئولوژی (شماره ۲) کرمانشاه، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب.

نخعی، م.، احدی، ا.، ۱۳۸۸. پیش‌بینی زمان استمرار و شدت دوره‌های ترسالی و خشکسالی در ایران با استفاده از روش بعد فرکتالی، کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران، دانشکده علوم، ۱۰ ص.

Reference

Altafi, D., Nakhaee, M., 2010. Estimation of Intrinsic Permeability of Fractal Porous Media Using Monte Carlo Method. Journal of Hydrogeology, Volume 1, Number 2, Pages 1-10. [In Persian]

Falconer, Kenneth., 2003. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. Hunting the Hidden Dimension. Nova.PBS.WPMB-Maryland. (28 october 2008).

Fotovat, M., Mehrabi, A., 2007. Investigation of the Response of the Niloufar Karst Spring to Recent Droughts in Kermanshah Province, Conference on Review of Water Resources of Kermanshah Province, Western Regional Water Company. [In Persian]

Gamasiab Consulting Engineers., 1998. Studies for Identification of Hard Formations in the Gamasiab Basin (Volume 1), Meteorology and Hydrology Report No. 2 (Kermanshah), Western Regional Water Company. [In Persian]

Gamasiab Consulting Engineers., 1998. Studies for Identification of Hard Formations in the Gamasiab Basin (Volume 2), Hydrology Report (No. 2) Kermanshah, Western Regional Water Company. [In Persian]

Kermanshah Province Meteorological Administration, Iran Meteorological Organization, Ministry of Roads and Urban Development. [In Persian]

Maleki, A., 2001. Evolution of Karst Forms and Its Role in Groundwater Resources (PhD Dissertation), Tarbiat Modares University. [In Persian]

Maleki, A., 2007. The Role of Karst Geomorphology in the Hydrogeological Investigation of the Bisotun and Paraw Highlands, Conference on

تأثیر جنس سنگ بستر و مواد محلول بر شکل‌گیری اسکالوپ‌ها در غار نمکی نمکسار و غار آهکی سراب

محمد نخعی^۱، سارا عدالتیان^{۲*}، اصغر دولتی^۳

۱- استاد، گروه آموزشی زمین‌شناسی کاربردی، مرکز پژوهشی آب، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۲- دانشجوی دکتری آب زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۳- استاد گروه آموزشی زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول: K2_infinite@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴

چکیده

اسکالوپ‌ها اشکال صدفی شکلی هستند که در اثر عبور جریان آب یا باد در دیواره‌ها و سقف غار شکل می‌گیرد و می‌تواند نشان‌دهنده مشخصات هیدرولیکی جریان در غار باشند. اسکالوپ‌ها نامتقارن هستند. شیب آن‌ها در پایین جریان ملایم و کم شیب و در بالای جریان پرشیب و تند است. شکل‌گیری اسکالوپ‌ها بر پایه جریان آشفته حلال بر روی سطح قابل حل است. در طبیعت، اغلب این پدیده در اثر انحلال کربناته با آب یا یخ توسط هوا ممکن است رخ دهد. در برخی موارد، انحلال و تشکیل اسکالوپ در غارهایی که در سنگ‌های کلرایده و ژپسوم شکل می‌گیرد، ممکن است روی دهد. در تشکیل اسکالوپ‌هایی که توسط جریان آب شکل می‌گیرند، مشخصات هیدرولیکی و شیمیایی جریان آبی و نیز نوع سنگ بستر، در مورفولوژی اسکالوپ‌ها موثر است. جهت بررسی تأثیر جنس سنگ بستر و مواد محلول در آب بر شکل‌گیری اسکالوپ‌ها، دو غار نمکی و آهکی که دارای اسکالوپ بودند باهم مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپ‌های غار سراب نسبت به غار نمکسار، سرعت جریان در غار سراب کمتر بود. عدد رینولدز در هر دو غار تقریباً یکسان است و سرعت جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار اما دبی تخلیه در هر دو غار تقریباً یکسان بود. همچنین سرعت رسوبگذاری در غار نمکسار ۱/۸ برابر بیشتر از غار سراب بود. اهمیت این مقاله در این است که تاکنون هیچ گونه مقایسه‌ای بین اسکالوپ‌های نمکی و آهکی انجام نشده است.

کلیدواژه: اسکالوپ، غار سراب، غار نمکی، نقشه برداری غار، هیدروژئولوژی.

مقدمه

غار شکل می‌گیرد و می‌تواند نشان‌دهنده مشخصات هیدرولیکی جریان در غار باشند. این اشکال می‌تواند در غارهای نمکی، گچی و آهکی شکل گیرد. جهت بررسی تأثیر جنس سنگ بستر غار در شکل‌گیری اسکالوپ‌ها، غار سراب در استان همدان نیز که دارای این اشکال بودند، انتخاب گردید. غار سراب در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری از شمال غرب شهرستان همدان، استان همدان، و در سنگ‌های آهک ژوراسیک دگرگون شده شکل گرفته است. این غار در مسیر خروجی خود آثار جریان آب را نشان می‌دهد و پس از حدود بیست متر پیشروی به دریاچه‌های عمیقی منتهی می‌گردد.

غار نمکی نمکسار طبق نقشه‌برداری که از آن صورت گرفت حدود ۱۵۷ متر طول و ۱۹ متر عمق دارد. این غار شامل غارنهشته‌های گل کلمی، کریستال و گل غار می‌باشد. جهت تعیین جنس سنگ بستر غار، از غارنهشته گل غار نمونه‌برداری شد و با آنالیز پرتو X ساختار بلوری آن که کلراید سدیم می‌باشد، تعیین گردید. در سه بخش از این غار، اشکال حلزونی یا اسکالوپی مشاهده می‌گردد. اسکالوپ‌ها نامتقارن و صدفی شکلی هستند و شیب آن‌ها در یک جهت زیاد و در سمت مقابل پرشیب می‌باشد. این امر به دلیل تقسیم جریان عبوری و ایجاد هیدرولیک ادی در جهت جریان صورت گرفته است. این اشکال در اثر عبور جریان آب یا باد در دیواره‌ها و سقف

کربنات کلسیم و یا کلراید سدیم باشد، سرعت متوسط سیال تحت شرایطی که اسکالوپ گسترش یافته، محاسبه شد. عدد رینولدز و سرعت آب، شرایط حرکت آب در هر دو غار را در گذشته نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپ‌های غار سراب نسبت به غار نمکسار، انتظار داشتیم سرعت جریان در غار سراب کمتر باشد. محاسبات نشان می‌دهد توان جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار است.

است. در ادامه مسیر می‌توان فلواستون، استالاکتیت، استالگمیت و ستون‌هایی را دید که از سقف غار تا کف امتداد یافته‌اند. این مسیر بشکل تراورس پوشیده شده از کلسیت و فلواستون امتداد می‌یابد و سمت چپ آن به دریاچه ختم می‌گردد. در سمت راست سقف و دیواره از اسکالوپ پوشیده شده است. ادامه کار تنها با ورود به آب امکان‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در شمال آبادی بازخور واحد سنگی که از شیل‌های خاکستری روشن پلیتی، شیل‌های توقی، توف‌های آهکی و ماسه سنگ‌های کریوکی خاکستری مایل به سبز روشن میکادار دانه متوسط تا درشت (۶۰ تا ۲۰ سانتیمتر) لایه با درون لایه‌هایی از افق‌های کنگلومرای دانه‌ریز آهکی نومولیت‌دار تشکیل شده توسط یک واحد کنگلومرای پایه به صورت ناپیوسته و هم‌شیب بر روی واحد قرمز جگری رنگ قرار می‌گیرد.

واحد کنگلومرای پایه که ضخامت لایه (۱۰۰-۷۰ سانتیمتر) و رنگ خاکستری روشن دارد، از نظر سخت‌شدگی و جورشدگی متوسط و قطعات آن بیشتر از تشکیل دهنده‌های افیولیتی است. این واحد کنگلومرا تنها در محل دماغه ناودیس در زیر واحد سنگی ظاهر می‌شود و به علت گسله بودن مرز بین واحدهای سنگی در بیشتر طول همبری این واحد کنگلومرای پایه حذف و مشاهده نمی‌شود.

سن ائوسن زیرین-میانی را به این واحد سنگی نسبت می‌دهد. این واحد سنگی با رنگ سفید و ریخت چهره ساز و ستیغ ساز خود به صورت پیوسته و هم‌شیب بر تارک واحد سنگی دیگر به عنوان یک افق کلیدی و شاخص در گستره برکه قرار دارد که از مارن گچ‌دار و افق گچ به نسبت ضخیم تشکیل شده است. وجه تسمیه آبادی رباط سفید به دلیل گسترش همین واحد سنگی در طول رشته کوه‌های جنوب این آبادی می‌باشد.

جهت مقایسه اسکالوپ‌ها در هر دو غار نمکسار و سراب، تعدادی اسکالوپ انتخاب گردید و قطر کانال و یا عرض بین دو دیواره موازی که اسکالوپ در آن توسعه یافته، اندازه گرفته شد. با اندازه‌گیری طول اسکالوپ‌ها در غارها و استفاده از رابطه میانگین ساتر، اندازه اسکالوپ میانگین به‌دست آمد و عدد رینولدز محاسبه گردید. سپس با داشتن مقادیر چگالی و ویسکوزیته سیال، با توجه به ترکیبات سیال که می‌تواند

غار نمکی نمکسار در محدوده روستای گلبقرائی در مسیر جاده مشهد - تربت حیدریه و در ۶۰ کیلومتری مشهد واقع شده است. غار در کوه‌های منفرد و در ارتفاع حدود ۲۰ متری از زمین‌های اطراف و با پوشش گیاهی بسیار اندکی قرار گرفته است (نجفی، ۱۳۹۶). اطراف غار نمکی حفره‌های بسیار زیاد دولین مشاهده می‌شود. روی سطح حفرات توسط لایه بسیار نازکی از نمک پوشیده شده است. اطراف دهانه غار کارن‌هایی وجود دارد که در سازندهای نمکی و ژئوپس شکل گرفته است. کف غار مملو از کانی‌های خورد شده نمک، گچ، و ژئوپس است که در اثر ریزش از سقف و حمل مواد از خارج غار بر اثر سیلاب می‌باشد. در انتهای غار روی سقف اشکال اسکالوپ به‌چشم می‌خورد که در اثر انحلال ایجاد گردیده است. همچنین سنگ‌های ریزشی مشاهده شده که داخل آن‌ها خار و خاشاک دیده می‌شود همچون خوشه‌های خشکیده جو یا گندم که احتمالاً باید توسط سیلاب به این مکان آورده شده باشد.

تزیینات داخل غار شامل گل غار، گل کلمی نمکی و کریستال‌های نمک می‌باشد. غار آهکی سراب در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری از شمال غرب شهرستان همدان، استان همدان، و در سنگ‌های ژوراسیک دگرگون شده شکل گرفته است. ورودی غار سراب از بلوک‌های سنگی تشکیل شده که در گذشته دهانه غار را مسدود کرده بودند اما جهت پیمایش مورد پاکسازی قرار گرفته‌اند. غار پس از ۱۰ متر راهروی ریفت مانند به سمت راست می‌چرخد و به سمت پایین که تالار کوچکی قرار دارد هدایت می‌شود. در این تالار اشکال اسکالوپ در سقف و دیواره‌های غار قابل تشخیص می‌باشد. از سمت چپ با یک گذرگاه کوچک مسیر ادامه می‌یابد. یک سوراخ کوچک در کف با یک جریان هوای سنگین دسترسی به اولین دریاچه غار را میسر می‌سازد (با شش متر طول و حداقل ۴ متر عمق). سپس با فرود دست به سنگ وارد دریاچه‌ای به عمق یک متر می‌شویم. در این قسمت دریاچه تزیینات Folia به‌چشم می‌خورد و کف دریاچه با رسوبات رسی و ماسه‌ای پوشیده شده

خوبی را برای این منطقه از نظر منبع اصلی تامین گچ استان و ایران داده است.

زمین شناسی غار آهکی سراب

ناحیه گل تپه-زرین آباد که غار سراب و علیصدر (با فاصله ۷ کیلومتر از غار سراب) در آن واقع است، از لحاظ موقعیت زمین شناسی بین دو منطقه واقع شده، قسمت های شمال آن در بخش ایران مرکزی و ناحیه جنوبی آن در زون سندج-سیرجان واقع است. بنابراین در محدوده مورد مطالعه، سنگ ها و اثرات تکتونیکی هر دو ناحیه را می توان مشاهده نمود. شیل ها و شیست های دگرگون شده ژوراسیک، قدیمی ترین سنگ هایی هستند که در منطقه مورد مطالعه شناخته شده اند. این سنگ ها بیشتر در حاشیه غربی و گاهی به صورت پراکنده در جنوب و شرق منطقه وجود دارد. در قسمت زیرین از نوع شیست های خاکستری رنگ و آهک کریستالیزه همراه با آهک دولومیتی که به صورت تداخل بین لایه ای قرار گرفته وجود دارد.

رسوبات کرتاسه فقط در محدوده کوچکی از جنوب و مرکز دشت شناخته شده اند. این تشکیلات به دو واحد آهکی و شیلی تقسیم می گردند. واحد آهکی در حد جنوبی دشت گسترش داشته و ارتفاعات جنوب روستای قرخلر را تشکیل می دهند. گسترش این آهک ها در شرق دره خورونده نسبت به سایر جنوب روستای قرخلر را تشکیل می دهند. گسترش این آهک ها در شرق دره خورونده نسبت به سایر نقاط بیشتر بوده است. واحد شیلی در ۱۵ کیلومتری شرق کبودرآهنگ ارتفاعات کوه قره لار را تشکیل می دهد.

سازندالیگومیوسن در اطراف منطقه نسبت به سایر تشکیلات زیاده تر بوده و چین خوردگی هایی به صورت تاقدیس و ناودیس به وجود آورده اند. این سازند شامل تناوبی از لایه های آهکی و مارنی بوده و در قسمت های فوقانی بیشتر از مارن سبز رنگ و ماسه سنگ تشکیل شده است. آهک ها در نواحی شمالی و مارن ها در قسمت شرقی دشت گسترش بیشتری دارند. رسوبات دوران چهارم، شامل رسوبات مخروط افکنه ای، واریزه های دامنه ای ارتفاعات و آبرفت های میان دشتی می باشد؛ این بیشتر می باشد.

شرایط آب و هوایی منطقه

آب های زیرزمینی منطقه غار سراب

ضخامت این واحد سنگی کم و بیش شاید از صد متر تجاوز نکند. ضخامت افق گچ خالص در حدود ۲۰ تا ۳۰ متر است که به صورت خیلی فعال از آن بهره برداری می شود.

زمین شناسی ساختمانی

به دنبال حرکات کوهزایی بعد از کرتاسه پسین و قبل از ائوسن که منجر به جای گرفتن مجموعه سنگ های افیولیتی و تشکیل حوضه های رسوبی ائوسن و جوان تر گردید، کامه های دیگر حرکات کوهزایی آلپ به ویژه حرکات کوهزایی مربوط به کامه بعد از پلیوسن نقش بسیار مهمی در شکل گیری چهره کنونی منطقه و تشکیل عناصر ساختمانی مانند چین خوردگی ها و گسل خوردگی و فعالیت ماگماتیسم در منطقه گردیده است. برخی از چین ها در اثر نیروهای وارده برگشته و سطح محوری آن ها یا گرایش آن ها به سمت نیروهای وارده است (Lundberg et al., 2017).

شدت چین خوردگی ها در اثر نیروهای وارده در خیلی از نقاط در حدی بوده که گسلش و راندگی پایان پذیرفته است. گسل های معکوس بیشتر از نوع گسل های کم زاویه هستند.

فعالیت حرکات کوهزایی بعد از ائوسن سبب فعالیت و تزریق توده ماگمایی دیوریتی در سنگ های کهن تر گردیده که احتمال دارد که زمان این فعالیت آذرین در اولیگوسن صورت گرفته باشد. آن دسته از کامه های کوهزایی آلپ که بعد از ائوسن اتفاق افتاده است سبب تغییر شکل در تشکیل دهنده های مجموعه افیولیتی شده به طوری که سبب شده این مجموعه در شمال آبادی رباط سفید بر روی واحدهای سنگی مربوط به ائوسن رانده شود و یا در داخل خود مجموعه افیولیتی بخش هایی از آن به صورت فلس مانند بر روی همدیگر رانده شود. شکل این تراشه ها و چگونگی قرار گرفتن آن ها بر روی هم نشان می دهد که به احتمال زیاد این تغییر شکل ها در یک زون فشاری و برشی با مؤلفه افقی امتداد لغز راست بر صورت گرفته است. وجود رخساره های سنگی مربوط به حوضه های رسوبی کم عمق و کولابی و گسترش وسیع این رخساره های سنگی سبب شده که گستره رباط سفید برای موادمعدنی تبخیری همچون گچ و نمک قابلیت خوبی داشته باشد، علی رغم اینکه تمامی واحدهای مارنی به گچ آغشته هستند و یا دارای درون لایه های نازکی از گچ هستند. ولی واحد سنگی E2gm، به دلیل داشتن افق گچ با سبزی زیاد در حد ۲۰ متر و خالص بودن آن و گستردگی واحد، قابلیت خیلی

میزان ۲۰۱/۵ میلی‌متر بوده است (مهندسين مشاور كنكاش عمران، ۱۳۹۴).

بحث و نتایج

هر دو غار سراب با گرید UISV2-6-4-E و غار نمکی نمکسار با گرید UISV2-4-3-BC نقشه‌برداری گردید و مکان اسکالوپ‌ها در نقشه مشخص شد. نقشه‌برداری توسط متر لیزری دیستو X310 مجهز به کیت قطب‌نما و شیب‌سنج صورت گرفت که اطلاعات از طریق بلوتوث به نرم‌افزار توپودرود منتقل گردید. با تعیین ایستگاه‌های نقشه‌برداری در نقاطی از غار که به یکدیگر دید مستقیم دارند و اندازه‌گیری طول، آزیموت (زاویه نسبت به شمال) و شیب بین دو ایستگاه به‌عنوان مقادیر اصلی، خطوط اصلی نقشه را ترسیم می‌نماییم. همچنین با اندازه‌گیری فاصله خطوط اصلی نقشه‌برداری از دیواره‌ها و سقف و کف غار، می‌توان فضای غار را در سه مقطع ترسیم نمود.

این دو غار به دلیل آن‌که اغلب آن به شکل افقی گسترش یافته بودند، صرفاً در نمای پلن ترسیم شدند و سایر اطلاعات نمای پروفایل مانند ارتفاع سقف و جهت شیب غار، به نمای پلن اضافه گردید.

مشخصات غار سراب

طول این غار ۱۷۰۰ متر و تغییرات عمق آن بیست متر می‌باشد. پس از صد متر اول اغلب مسیرها و معابر غار آبی است (Laumanns et al., 2000). عمق آب بین پنج تا بیست متر می‌باشد و دمای آب ۸ درجه سانتی‌گراد است. تیپ آب Ca-HCO_3 می‌باشد. آنالیز شیمیایی از آب صورت پذیرفت و نتایج به شرح زیر است:

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب غار سراب.

Table 1. The results of the chemical analysis of water samples from Sarab cave.

Name	Unit	R1-Cave Sarab
Sample ID		11/13/2019
Calcium	mg/L	90
Magnesium	mg/L	50
Sodium	mg/L	5.2
Potassium	mg/L	0.23
Bicarbonate	mg/L	120
Chloride	mg/L	5.7
Dissolved Solids	mg/L	220
Conductivity	µmho/cm	300
pH		7.84
Alkalinity	mg CaCO_3/L	120
Carbonate	mg/L	0
Hardness	mg CaCO_3/L	140

وسعت محدوده مطالعاتی گل‌تپه-زرین‌آباد (محدوده غار سراب) برابر با ۶۴۸/۵۱ کیلومترمربع است که وسعت دشت و ارتفاعات مشرف بر آن به ترتیب برابر با ۱۰۹۴/۵ و ۴۰۷۰/۳ کیلومترمربع می‌باشد. وسعت دشت گل‌تپه برابر با ۳۹۹ کیلومترمربع و وسعت دشت زرین‌آباد برابر با ۶۹۵/۵ کیلومترمربع می‌باشد. در دشت‌های گل‌تپه و زرین‌آباد آبخوان آبرفتی آزاد به ترتیب دارای وسعت ۱۱۲ و ۴/۴۹۵ کیلومترمربع می‌باشند (مهندسين مشاور كنكاش عمران، ۱۳۹۴).

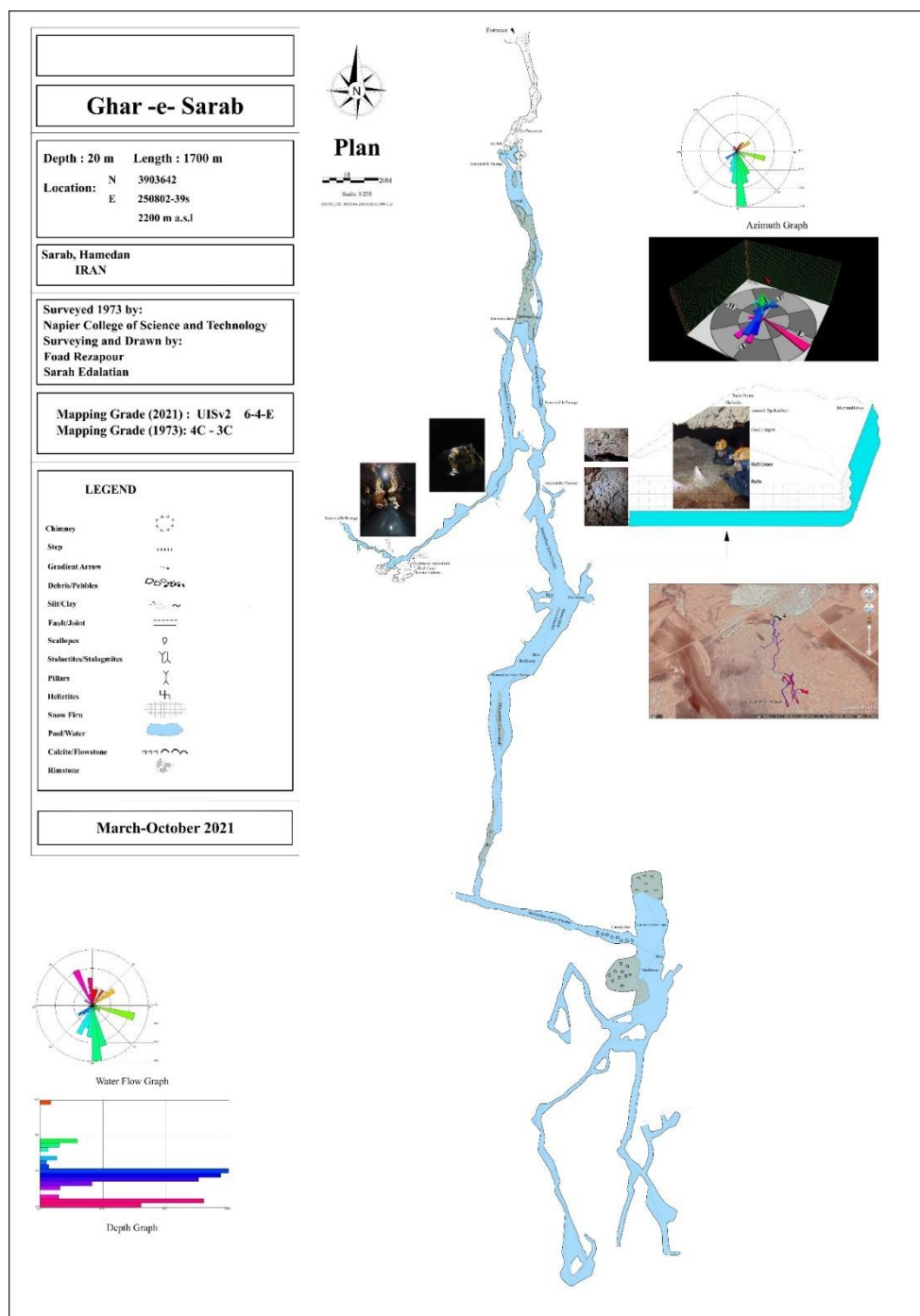
در دشت گل‌تپه رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی بین ۱۹۳۵ تا ۱۹۸۵ متر متغیر می‌باشد. منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در این دشت به حالت کروی بوده و رقوم آن‌ها از جنوب شرق به شمال شرق کاهش می‌یابد. بیشینه تراز آب زیرزمینی با رقم ۱۹۸۵ متر مربوط به اراضی مخروط‌افکنه‌های واقع در جنوب شرقی دشت و کمینه آن در پایاب دشت ۱۹۳۵ متر می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از جنوب شرق به شمال غرب می‌باشد. شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی در اراضی مخروط‌افکنه‌ای دشت کمتر از ۱۰ در هزار، در اراضی میاندشتی ۴ در هزار و در اراضی پایاب دشتی کمتر از ۳ در هزار می‌باشد.

بارندگی

این محدوده دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا خشک و سرد است. منشأ عمده ریزش‌های جوی این منطقه مدیترانه‌ای بوده و منبع اصلی رطوبت هوا و بارندگی توسط جبهه‌های غربی تأمین می‌گردند. متوسط بارندگی دشت بر اساس آمار درازمدت (۳۶ ساله) ایستگاه پایگاه نوژه ۳۳۲/۷ میلی‌متر می‌باشد، ایستگاه قلعه‌جوق با دوره آماری ۱۷ ساله، با متوسط بارندگی ۳۱۹/۲ میلی‌متر در سال و میزان بارندگی ایستگاه فوق در سال آبی ۸۶-۸۷ در ایستگاه قلعه‌جوق به

Ammonia	mg/L	0.01
Nitrite	mg/L	0.028
Nitrate	mg/L	20
Phosphate	mg/L	0.01
Silica	mg/L	---
Turbidity	NTU	0.21
Temperature	°C	18.6

- مقدار بسیار کم فسفات نشان می‌دهد که ممکن است در اثر فاضلاب یا کود کشاورزی ساده باشد چون بیشتر کودهای کشاورزی تجاری شامل فسفات هستند.
- غلظت موادمعدنی کربناته نسبتاً پایین است. این نشان می‌دهد که آب یا خیلی طولانی در زمین نبوده و یا وقتی وارد زمین می‌شود خیلی اسیدی نبوده است. اگر آب برای مدت طولانی در آبخوان باشد و به‌خصوص اگر بیشتر اسیدی باشد، سنگ آهک بیشتری حل می‌شود. اسیدیته پایین برای یک محیط خشک به‌دلیل مقدار کم پوشش گیاهی برای تولید کربونیک اسید رایج است.
- درصد نسبتاً بالای منیزیم در مقایسه با کلسیم نشان می‌دهد که سنگ دولومیتی است.
- فسفات کم است که می‌گوید تنها مقدار کمی گچ در سنگ وجود دارد.
- مقدار سدیم و کلرید کمی بیشتر از مقدار نرمال است. این نشان می‌دهد که غار احتمالاً از دریا و یا مناطق نمک سنگ طبیعی فاصله دارند اما به اندازه کافی نزدیک است که با مقدار کمی نمک را حمل کند.
- نیترات بالاتر از حد قابل قبول برای استانداردهای بهداشتی است، بنابراین احتمالاً مقدار کمی کشاورزی یا فاضلاب در منطقه وجود دارد.



شکل ۱- نقشه غار سراب.

Figure 1. Sarab Cave map.

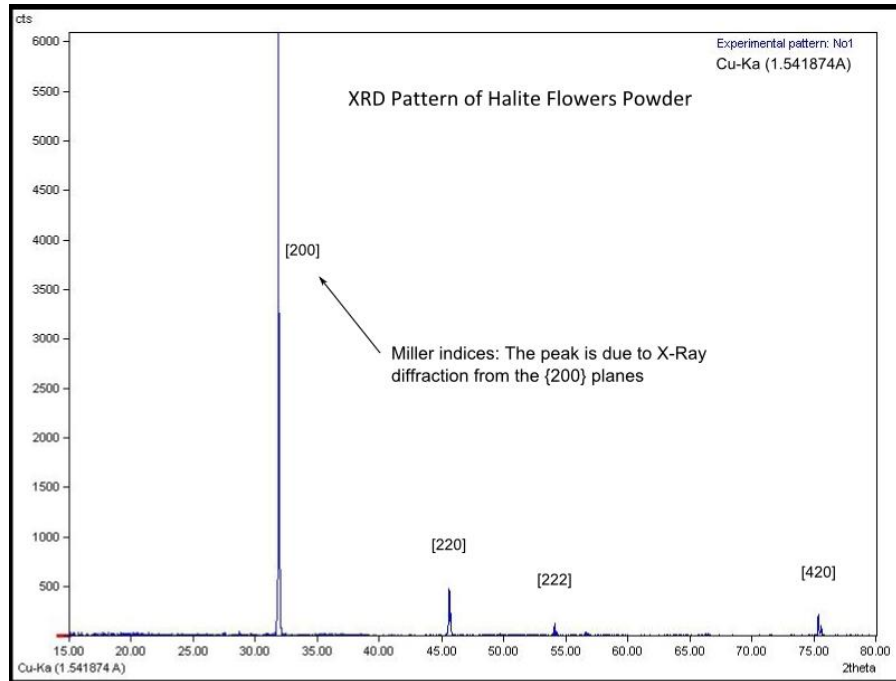
مشخصات غار نمکی نمکسار

غار حکمفرماست و از آب‌چکه در این غار اثری به چشم نمی‌خورد.

از گل‌های غار نمونه‌برداری شد و نتایج پراش پرتو X (XRD) گرفته‌شده از آن نشان‌دهنده ترکیب شیمیایی کلراید سدیم با ساختار بلوری مکعبی می‌باشد.

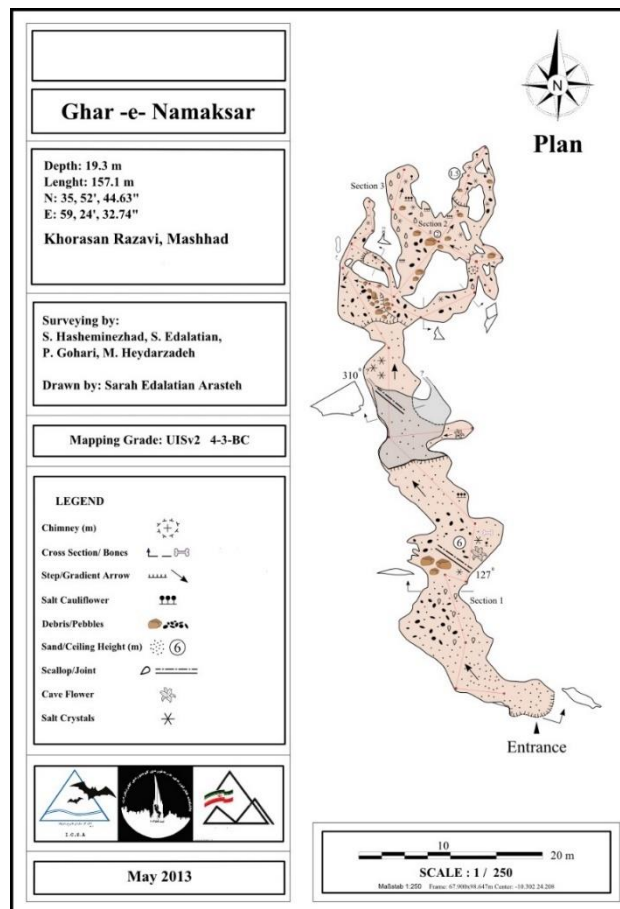
طول این غار ۱۵۷ متر و تغییرات عمق آن بیست متر می‌باشد. در سه قسمت این غار اسکالوپ‌ها شکل گرفته‌اند که اسکالوپ‌های انتهایی غار به دلیل تعداد و وضوح بیشتر جهت اندازه‌گیری انتخاب گردید.

در این غار هیچ‌گونه جریان آبی به چشم نمی‌خورد. وجود گل‌های غار حاکی از این است که شرایط نسبتاً خشکی در این



شکل ۲- تصویر پراش پرتو X (XRD) گرفته شده از نمونه پودری گل غار हालیت موجود در غار نمکسار که نشاندهنده ساختار بلوری مکعبی است.

Figure 2. X-ray diffraction (XRD) image taken from the powder sample of halite cave flower found in Namaksar cave, which shows the cubic crystal structure.



شکل ۳- نقشه غار نمکسار.

Figure 3. Namaksar cave map.

مطالعات اسکالوپ



شکل ۴- حرکت سیال در مجاورت اسکالوپ. نقطه ۱. جدایی جریان در تاج. نقطه ۲. گذار جریان برشی لومینار به آشفته. نقطه ۳. چرخش مجدد جریان در ادی نقطه ۴. ناحیه پیوند مجدد جریان جت (Murphy et al., 2017).

Figure 4. Fluid motion in the vicinity of a scallop. Point1: flow separation at crest. Point 2: transition of laminar shear layer to turbulence. Point 3: recirculating flow in lee eddy. Point 4: jet reattachment region (Murphy et al., 2017).

در غار نمکسار برخی از اسکالوپ‌های دهلیزهای منتهی به انتهای غار تخریب شده‌اند. برخی از این تخریب‌ها در اثر بارندگی، سیلاب و ریزش ناشی از آن رخ داده‌اند و برخی از آن‌ها در اثر زمین‌لرزه‌ای که در نزدیک این غار رخ داد، ایجاد شده‌اند و باعث تخریب برخی اسکالوپ‌ها گردیده‌اند. در آوریل سال ۲۰۱۷ زلزله‌ای به بزرگی ۶/۱ در مقیاس ریشتر رخ داد.

این زمین‌لرزه در منطقه ای نزدیک به گسل کشف‌رود روی داد. مرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. پس از آن بیش از ۷۷۰ پس‌لرزه که ۷۸ تایی آن‌ها بزرگی بیش از ۳ ریشتر داشتند، در این منطقه ثبت گردید.

$$u^* = \frac{R_e \mu}{L \rho} \quad (2)$$

کرل ثابت کرد که سرعت جریان در زمان ایجاد اسکالوپ در کانال‌های دایره‌ای (غیر موازی) از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\bar{u} = \bar{u}^* \left[2.5 \left\{ \ln \left(\frac{D}{2L_{32}} \right) - 1.5 \right\} + B_L \right] \quad (3)$$

که در آن B_L بشکل تجربی برای اسکالوپ‌ها ۹/۴ به‌دست آمد. D عرض کانال است که در دو غار اندازه‌گیری شد و L_{32} نیز مقدار میانگین طول اسکالوپ‌ها می‌باشد.

همچنین با محاسبه مساحت مقطعی که اسکالوپ‌ها در آن قرار دارند در هر دو غار می‌توان دبی تخلیه جریان را محاسبه نمود. به‌علاوه سایر پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند عدد

در غار نمکسار برخی از اسکالوپ‌های دهلیزهای منتهی به انتهای غار تخریب شده‌اند. برخی از این تخریب‌ها در اثر بارندگی، سیلاب و ریزش ناشی از آن رخ داده‌اند و برخی از آن‌ها در اثر زمین‌لرزه‌ای که در نزدیک این غار رخ داد، ایجاد شده‌اند و باعث تخریب برخی اسکالوپ‌ها گردیده‌اند. در آوریل سال ۲۰۱۷ زلزله‌ای به بزرگی ۶/۱ در مقیاس ریشتر رخ داد.

در انتهای غار نمکی نمکسار ۲۲ عدد اسکالوپ انتخاب و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت جریان آب در اسکالوپ‌ها از روی قسمت پرعمق و کم‌عمق آن‌ها قابل تشخیص است. قسمت‌های عمیق در بالا و قسمت‌های کم‌عمق در پایین، جایی که جریان ادی خارج می‌شود قرار دارد. بنابراین جهت جریان آب به سمت انتهای غار است. از رابطه ساتر (رابطه ۱) میانگین طولی اسکالوپ‌ها به‌دست می‌آید (Curl, 1974):

$$\overline{L_{32}} = \frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i^2} \quad (1)$$

$$F = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gD}} \quad (۶) \quad \text{رینولدز، فاکتور اصطکاک داری، عدد فرود، تنش برشی، توان}$$

$$\tau = (u^*)^2 \rho \quad (۷) \quad \text{جریان و سرعت رسوب گذاری از این مقادیر اولیه، برای هر دو}$$

$$\omega_{max} = 0.96 \bar{u}^* \quad (۸) \quad \text{غار از روابط ۴ تا ۹ محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند (Lundberg et al., 2017)}$$

$$Q = \bar{u}A \quad (۹) \quad R_e = \frac{\bar{u}D\rho}{\mu} \quad (۴)$$

$$f = \frac{8}{\left(\frac{\bar{u}}{u^*}\right)^2} \quad (۵)$$

جدول ۲- معادلات هیدرولیک جریان در دو غار سراب و نمکسار.

Table 2. Hydraulic equations of flow in two caves, Sarab and Namaksar.

	Limestone	Salt
L_{32} (cm)	39.85	23.07
D (cm)	275	234.5
$\bar{u}^*$ (cm/s)	0.73	1.33
Velocity – $\bar{u}$ (cm/s)	6.37	12.93
Reynolds number (Re)	1.33×10^5	2.21×10^5
Cross sectional area (m ²)	2.53	1.38
Darcy – Weisbach friction factor – f	0.105	0.085
Froude number – F	0.12	0.27
Shear stress $\bar{\tau}$ (N/m ²)	0.05	0.18
Power of flow P (N/m.s)	0.34	0.02
Settling velocity ω_{max} (cm/s)	0.7	1.28
Discharge – Q m ³ /s	0.16	0.18

نتیجه گیری

جریان پایین دست بسیار کند است، آن امواج سطحی می‌توانند در جهت بالادست و جهت پایین دست حرکت کنند. نتایج نشان می‌دهند که با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپ‌های غار سراب نسبت به غار نمکسار، سرعت جریان در غار سراب کمتر می‌باشد. عدد رینولد در هر دو غار تقریباً یکسان است. محاسبات نشان می‌دهد توان جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار است. سرعت رسوب گذاری در غار نمکسار ۱/۸ برابر بیشتر از غار سراب بوده در صورتیکه دبی تخلیه در هر دو غار تقریباً یکسان است.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت و همکاری غارنوردان و غارشناسانی از استان خراسان رضوی، آقای سعید هاشمی نژاد و استان همدان آقای فواد رضاپور و دکتر جورج ونی، رئیس موسسه ملی تحقیقات غار و کارست آمریکا، صورت پذیرفت که بدین وسیله از همکاری آنها قدردانی می‌گردد.

در این تحقیق خصوصیات جریان در دو غار نمکی نمکسار و آهکی سراب با استفاده از خصوصیات فیزیکی و هندسی اسکالوپ‌ها بررسی شده است. از اسکالوپ‌های موجود در انتهای غار نمکسار و در قسمت دوم غار سراب برای اندازه گیری استفاده شده است. در مقایسه با غار نمکسار، سرعت آب با افزایش اندازه اسکالوپ‌ها کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با کاهش سرعت جریان، اندازه اسکالوپ‌ها افزایش می‌یابد. عدد رینولدز به دست آمده (بر اساس قطر مجرا) در دو غار جریان آشفته در هر دو مجرا را نشان می‌دهد. با استفاده از عدد فرود بر اساس رابطه بین سرعت جریان و عمق جریان نیز برای طبقه بندی شرایط جریان استفاده گردید. در این تحقیق با توجه به عدد فرود کمتر از یک ($F < 1$) جریان زیر بحرانی را نشان می‌دهد که جریانی عمیق و آهسته با حالت انرژی کم است. هنگامی که شرایط جریان زیر بحرانی است، اختلالات در جریان می‌تواند امواج سطحی ایجاد کند، و چون

منابع

نجفی زرمهری، ف.، ۱۳۹۶. بررسی ژئومورفولوژی فروچاله‌های کارستی مشرف به غار نمکسار در روستای گلبقرایی، دومین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست شهر مشهد، مشهد.

مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴. مطالعات بهنگام‌سازی بیلان منابع آب حوزه آبریز سفیدرود بزرگ، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان.

Reference

Curl, R.L., 1974. Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. Natl. Speleological Soc. Bull. 36, 1-5.

Laumanns, M., Brooks, S., Dorsten, I., Kaufmann, G., Lopez Correa, M., Koppen, B., 2000. Speleological Project Ghar Alisadr (Hamadan/Iran).

Lundberg, J., Carroll, W., Roberts, W., McFarlane, D.A., Buchroithner, M., Rentergem, G., 2017. Analysis of scallops in gomantong caves, by GIS processing of 3D terrestrial laser scanner data.

Mohandisin-e Moshaver-e Kankash Omran., 2015. Studies on Updating the Water Resource Balance of the Great Safidrud Basin, Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Company, Guilan Regional Water Company. [In Persian]

Murphy, P.J., 2017. Solutional sculpturing. Encyclopedia of caves. 536-539.

Najafi-Zarmehri, F., 2016. Investigation of the Geomorphology of Karst Sinkholes Overlooking the Namaksar Cave in Gholghoraee Village, The Second Conference on Engineering Geology and Environment of Mashhad City, Mashhad. [In Persian]

شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی با استفاده از سیستم هوش مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کمه استان اصفهان)

روح اله سمیعی دستجردی^۱، مهدی حیات زاده^{۲*}، علی فتح زاده^۳، فرزانه فتوحی فیروزآباد^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

*نویسنده مسئول: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

محدودیت منابع آب سطحی، تقاضای مصرف آب را به سمت استفاده از منابع آب زیرزمینی سوق داده است و برداشت از این منابع و عدم تغذیه آبخوان‌ها باعث افت سطح تراز آب‌های زیرزمینی گردیده است. از طرفی برای ارزیابی و مدیریت منابع آب در شرایط مخاطرات امروز و آینده نیاز به پیش‌بینی تراز آب‌های زیرزمینی می‌باشد. هدف از این پژوهش پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی حوزه آبخیز کمه شهرستان سمیرم استان اصفهان با استفاده از سیستم هوش مصنوعی می‌باشد. در این راستا داده‌های مشاهداتی تراز آب زیرزمینی، بارش و دبی در مقیاس ماهانه با سری زمانی ۲۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۷۹) مورد استفاده قرار گرفت. در الگوریتم شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) جهت بررسی قدرت پیش‌بینی و تأثیر ورودی‌ها از آرایش مختلف، تغییر وزن‌های ورودی، تغییر لایه‌ها و تعداد نرون‌ها استفاده شد. به منظور بررسی عملکرد مدل‌ها، از دو معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید. به این منظور از ۷۵ درصد داده‌ها (۱۸۰ سری داده) برای آموزش شبکه و از ۲۵ درصد مابقی (۶۰ سری داده) به منظور ارزیابی و تست شبکه استفاده شد. براساس مقایسه جداول RMSE و R آرایش‌های مختلف، در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی حوضه مورد مطالعه، تأثیر بارش بیشتر از دبی می‌باشد و الگوریتم آموزش لونبرگ مارکوارت با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۹ و جذر میانگین مربع خطا ۰/۰۴۷ عملکرد بهتری نسبت به سایرین دارد. نتایج ضمن تایید کارایی مناسب مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی نشان داد که استفاده از پارامترهای اقلیمی نسبت به پارامترهای هیدرولوژیکی جهت مدل‌سازی مقادیر کمی آب زیرزمینی در مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای عملکرد بهتری می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، با توجه به وجود عدم قطعیت‌های متعدد در داده‌های ورودی به شبکه، انتخاب نوع و ساختار مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، الگوریتم لونبرگ مارکوارت، شبکه MLP، هوش مصنوعی.

مقدمه

می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش به‌سزایی داشته باشد (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۳). کاهش سطح آب زیرزمینی و تخلیه‌ی سفره‌های آب موجب کاهش آبدی‌ی چاه‌ها، شور شدن آب چاه‌ها در اثر افزایش عمق و تجمع املاح، خشک شدن چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و

آب به‌عنوان اصلی‌ترین ماده حیاتی برای بشر از اهمیت بالایی برخوردار است و محدودیت منابع آب سطحی مناسب، تقاضای مصرف آب به‌دلیل افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی، انسان‌ها را به سمت بهره‌برداری از ذخائر آب زیرزمینی سوق داده است (نیک منش و همکاران، ۱۳۹۰). از طرفی منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار

نشست زمین می‌شود (زاهدی و همکاران، ۱۳۹۳). در دو دهه اخیر و به‌ویژه در سال‌های پایانی قرن بیستم، آب و مدیریت آن به یک دغدغه بزرگ بین‌المللی تبدیل شده است. تشکیل نشست‌های متعدد در سطوح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی در رده‌های مختلف کارشناسی، مدیریتی و سیاستی همه حاکمی از تشدید این نگرانی‌هاست (دلور و همکاران، ۱۳۸۷). استان اصفهان نیز از این امر مستثنی نبوده و شاهد مشکلات زیادی در این زمینه می‌باشد. بدیهی است برای مدیریت منابع آب، داشتن اطلاعات صحیح و پیش‌بینی سطح تراز آب‌های زیرزمینی امری حیاتی است. در صورتی که هر چه سریع‌تر نسبت به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی اقدامی صورت نگیرد، شاهد تخریب بیشتر آبخوان‌ها، عدم تجدید و از دست دادن منابع آب زیرزمینی خواهیم بود (مختاری و همکاران، ۱۳۹۱).

امروزه استفاده از مدل‌های ریاضی نرم‌افزاری برای پیش و مدیریت آب‌های زیرزمینی توسعه چشم‌گیری یافته است و ابزاری برای مدیریت منابع آب فراهم نموده‌اند (چیت‌سازان و کشکویی، ۱۳۸۱)، از جمله این مدل‌ها که برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی استفاده می‌شود، می‌توان به سری زمانی تجربی، مدل‌های فیزیکی، روش عکس مجذور فاصله و روش‌های زمین‌آماري اشاره کرد (Galavi et al., 2012). از مدل سری زمانی تجربی، به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی استفاده شده است، ولی هنگامی که رفتار دینامیکی یک سیستم هیدرولوژیکی با گذشت زمان تغییر می‌کند مدل‌های یاد شده برای پیش‌بینی پارامترهای منابع آب توانایی کافی ندارند و مدل‌های مناسبی نیستند. از طرف دیگر، مدل‌های فیزیکی نیز در عمل به اطلاعات زیادی درباره روابط بین متغیرهای مؤثر بر تغییرات سطح آب زیرزمینی نیاز دارند و از آن‌جاکه روابط بین این متغیرها اغلب پیچیده و غیرخطی است و با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در مدل‌های فیزیکی، این مدل‌ها در این گونه موارد نمی‌توانند به خوبی عمل کنند (ملکی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲). روش زمین‌آمار نیز اگرچه قادر به بیان توزیع مکانی خطای استاندارد تخمین در کل سطح منطقه است، در این روش، پردازش یک مدل ریاضی بر روی کل داده‌ها بسیار مشکل است (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۹۲). روش‌های عکس فاصله وزن‌دار هم علاوه بر این که

تاکنون ضریب همبستگی بالاتری نسبت به روش‌های هوشمند به دست نداده‌اند، مقدار خطا در کل منطقه را به‌صورت یک مقدار واحد ارائه می‌دهند. از این‌رو، امروزه استفاده از روش‌های نوین و هوشمند مانند روش شبکه عصبی مصنوعی، مورد نظر قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی-عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن ابزاری قدرتمند جهت شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده و غیرخطی به‌شمار می‌روند که از جمله کارآمدترین ابزارهای پیش‌بینی پارامترها هستند (سراوانی و همکاران، ۱۴۰۲). شبکه‌های عصبی مصنوعی که از سال ۱۹۴۳ مطرح شده‌اند، از جمله روش‌های بهینه‌سازی هستند که بر مبنای سیستم عصبی موجودات زنده ابداع شده‌اند (Chen et al., 2009). همچنین، مدل شبکه عصبی مصنوعی قادر به درک روابط ضعیف هیدرولوژیک بوده، یک روش قدرتمند در تحلیل داده‌های واقعی است و می‌تواند الگو و رابطه مخفی بین داده‌ها را تشخیص داده، خود را آموزش دهد و با بالا بردن اطلاعات خود پیش‌بینی‌های مناسبی انجام دهد (Bunchingiv et al., 2003)، همچنین به دلیل قابلیت پیش‌بینی دقیق می‌تواند، در استراتژی‌های مدیریت آب زیرزمینی به‌کار رود (Chang et al., 2015). محققان به این نتیجه رسیده‌اند که شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های دیگر باشند (Emamgholizadeh et al., 2014). در پژوهشی جهت شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت نی‌ریز از ترکیب مدل‌های موجک و فازی عصبی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل تلفیقی Wavlet-ANFIS دقت بالایی در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت نی‌ریز دارد (مبارکی و همکاران، ۱۳۹۴).

در پژوهش دیگری با مقایسه مدل‌های شبکه عصبی موجک و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی نورآباد به نتیجه رسیدند که دو مدل مورد استفاده با دقت قابل قبولی توانسته به تخمین تراز سطح ایستابی بپردازد، در مجموع نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی موجک توانایی بالایی در تخمین مقادیر کمینه و بیشینه تراز سطح ایستابی دارد (باباعلی و همکاران، ۱۳۹۶). پژوهش‌های زیادی برای شبیه‌سازی آبخوان به کمک روش‌های هوش مصنوعی صورت گرفته است. حسینی صومعه و همکاران (۱۴۰۰) مدل‌سازی تغییرات سطح

علی‌رغم وابستگی بسیاری از کاربری‌های موجود در منطقه به منابع آب زیرزمینی تاکنون در منطقه مورد مطالعه، تحقیقات زیادی به‌منظور تحلیل آب زیرزمینی انجام نشده است. در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت کمه با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی به بررسی موضوع پرداخته شده است.

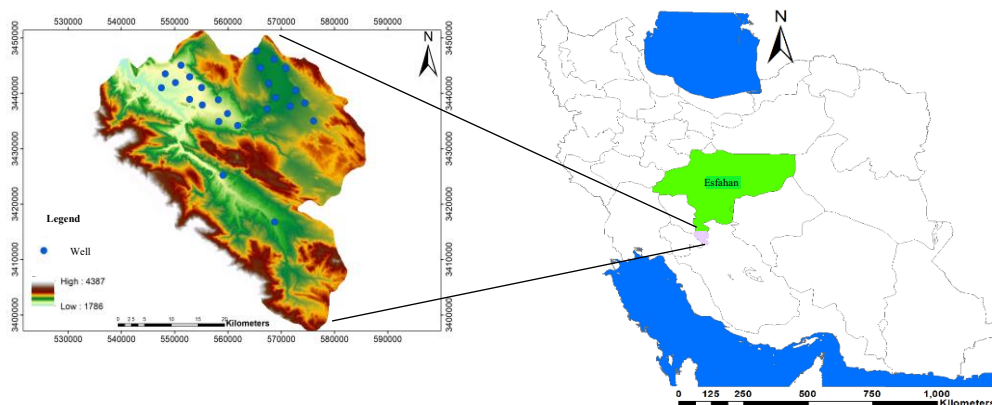
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کمه در جنوبی‌ترین نقطه استان اصفهان در ارتفاع ۲۵۰۰ متری از سطح دریا و در مختصات طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه ۲۰ دقیقه ۴۶ ثانیه تا ۵۱ درجه ۵۶ دقیقه ۴۱ ثانیه و عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه ۴۱ دقیقه ۵۳ ثانیه تا ۳۱ درجه ۱۱ دقیقه ۵۰ ثانیه واقع است. این حوضه در کوه پایه‌های خاوری قله دنا (واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد) قرار گرفته و منطقه‌ای سردسیر است. فاصله این حوضه از اصفهان ۲۰۰ کیلومتر و از مرکز شهرستان (شهر سمیرم) ۶۳ کیلومتر می‌باشد. منطقه با مساحتی بالغ بر ۱۶۸۰ کیلومتر مربع در مرکز کشور ایران و جنوب استان اصفهان قرار دارد (مطالعات پایه سازمان آب منطقه‌ای اصفهان). متوسط دمای سالانه ۹/۳ درجه سانتی‌گراد، حداکثر مطلق دما در مرداد ماه و معادل ۳۹/۳ درجه سانتی‌گراد و حداقل مطلق دما در بهمن ماه و معادل ۲۳- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه منطقه ۶۲۲ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت حوضه نشان داده شده است.

آب زیرزمینی براساس روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را برای دشت زاوه انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالایی ($R^2 = 0.99$) قادر به پیش‌بینی تراز سطح ایستابی می‌باشد. Adamowski et al., (2011) از شبکه عصبی موجک جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی حوضه چاتوگای واقع در کانادا در سال ۲۰۰۹-۲۰۰۲ استفاده نمودند و نشان دادند شبکه عصبی موجک پتانسیل بالایی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دارد و می‌تواند در مدیریت آب‌های زیرزمینی مفید باشد. همچنین روش‌های یادگیری ماشین به‌دلیل سرعت عمل بالا و نیاز به حجم داده‌های کم برای پیش‌بینی پارامترهای هیدروکلیماتولوژی، دبی رودخانه‌ها و نوسانات تراز آب زیرزمینی توسط محققین زیادی توصیه شده‌اند (نورمحمدی‌ده‌بالایی و همکاران، ۱۴۰۱. Paul et al., 2023، مرادی و همکاران، ۱۴۰۱. سامانی و همکاران، ۱۴۰۰ و پناهی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اکثریت مدل‌های ریاضی به‌کار گرفته شده در هر آبخیز نیازمند تعریف شرایط مرزی جدید و اطلاعات و نقشه‌های مربوط به آن منطقه است و عملاً کاربردی نمودن مدل مستلزم انطباق آن با شرایط خاص منطقه مورد مطالعه است.

Lie et al., (2019) پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی را در یک مجتمع گلخانه‌ای تحت تأثیر عوامل داخلی و انفعالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی حاکی از دقت مناسب ضرایب آماری در پیش‌بینی می‌باشد.



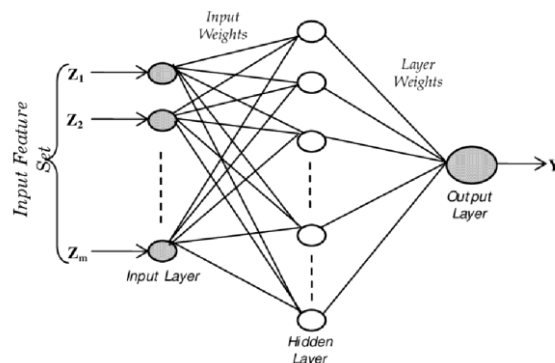
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Geographical location of the study area.

ساختار شبکه

لذا در این تحقیق از شبکه عصبی پایه شعاعی استفاده شده است. شبکه‌های با تابع مدار شعاعی تقریب‌سازهای بسیار قدرتمندی هستند به‌طوری‌که با داشتن تعداد نرون‌های کافی در لایه مخفی، قادر به تقریب‌سازی هر تابع پیوسته و با هر درجه دقت می‌باشند که از جمله آن‌ها شبکه‌های پیشرو همراه با سه لایه می‌باشد. نرون‌های خروجی ترکیبی خطی از تابع-های پایه‌ای را به وجود می‌آورد، که به وسیله نرون‌های لایه پنهان محاسبه شده‌اند (Fang et al., 2008). زمانی که ورودی در ناحیه تعیین شده کوچکی از فضای ورودی قرار می‌گیرد، توابع اساسی (غیرخطی) در لایه پنهان، پاسخ غیر صفری به محرک می‌دهند. معمول‌ترین تابع غیرخطی استفاده شده در این مدل تابع گوسی هستند.

شبکه به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق، یک شبکه پرسپترون چندلایه (MLP) است که به‌صورت پیش‌خور عمل می‌کند. تعداد نرون‌های لایه ورودی متغیر می‌باشد که متعاقب آن‌ها ورودی‌های متغیری به شبکه القا خواهد شد و خروجی شامل یک نرون است که همان جریان مصنوعی تولیدشده در روز می‌باشد، در لایه میانی نیز ۲۰ نرون وجود دارد (مهدوی زاده، ۱۳۸۳). نرون‌های لایه‌های میانی از توابع تبدیل تانژانت سیگموئید استفاده می‌کنند در لایه خروجی نیز از تابع تبدیل خطی استفاده شده است. روش به‌کار گرفته‌شده جهت آموزش شبکه، پس انتشار خطا می‌باشد. لازم به ذکر است که این روش آموزشی نیز در الگوریتم‌ها و فرم‌های متعددی ارائه شده است



شکل ۲- شبکه پرسپترون چند لایه (MLP).

Figure 2. Multilayer Perceptron Network (MLP).

داده‌ها در مرحله آموزش مد نظر قرار گرفت، آن است که توزیع متوازی از داده‌ها به مدل معرفی گردد و تا حد ممکن مقادیر ماکزیمم و مینیمم آن‌ها در این گروه قرار گیرند. در این تحقیق تعداد ۱۸۰ سری داده در مرحله آموزش به‌کار گرفته شد. گروه دوم جهت تست شبکه و در واقع ارزیابی مدل شامل ۶۰ سری داده در نظر گرفته شد. در مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌منظور شبیه‌سازی، از سه تابع محرکه استفاده شد. تابع محرکه خطی (همانی)، تابع محرکه لگاریتم سیگموئید، تابع محرکه تانژانت هیپربولیک.

آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها

در این تحقیق اطلاعات تراز آب زیرزمینی حوضه مورد مطالعه از ۲۳ چاه پیژومتر آب منطقه‌ای جمع‌آوری گردید. اطلاعات هیدروژئولوژیکی از ایستگاه‌های هیدرومتری سرباز رودخانه ماربر و بند قدیمی رودخانه تنگ سحری و اطلاعات اقلیمی از دو ایستگاه باران‌سنجی سرباز و تنگ سحری و

شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

به‌منظور شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت کمه سمیرم استان اصفهان با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی از ۴ سری نمونه داده‌های بارش و دبی استفاده گردید. طول داده-های آماری بین سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۸ می‌باشد، در مرحله آموزش توابع محرک و الگوریتم‌های یادگیری مختلف مورد بررسی قرار گرفته و سپس شبکه آموزش دیده شده، صحت سنجی و تست گردید. اطلاعات به‌کار گرفته شده در کلیه مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست شبکه‌های عصبی شامل اطلاعات بارش و دبی به عنوان ورودی مدل و تراز آب چاه‌های حوضه کمه به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. داده‌های موجود که شامل ۲۴۰ سری داده از اطلاعات بارندگی، دبی و سطح تراز آب چاه‌های دشت مورد مطالعه می‌باشند بدین صورت تفکیک گردیدند که دسته مربوط به آموزش شبکه که با آن وزن‌های شبکه تعیین می‌گردند. نکته‌ای که در انتخاب

خیلی طولانی باشد، ممکن است شبکه به سمت به حافظه سپردن برخی زوج‌های ورودی- خروجی برود. هنگامی که یک مجموعه از مقادیر ورودی جدید اعمال شود، شبکه زیاد آموزش دیده، متمایل به یادآوری یکی از بردارهای ذخیره شده می‌شود، در حالی که شبکه می‌بایستی قادر به تعمیم بردار خروجی و هر بردار ورودی داده شده را داشته باشد (Khaled et al., 2013). برای پرهیز از این حالت می‌توان قبل از اینکه شبکه شروع به بخاطر سپردن کند، آموزش را قطع کرد. فرایند تعمیم را می‌توان با اضافه کردن داده‌هایی با دقت کمتر به هر یک از بردارهای ورودی-خروجی در هر نوبت آموزش، ساده تر کرد. با استفاده از این روش، هیچگاه شبکه با زوج بردارهای دقیقاً مثل هم برای ورودی-خروجی آموزش نمی‌بیند و لذا شبکه نمی‌تواند الگوهای خاصی را به حافظه بسپارد.

ارزیابی مدل

در شروع فرآیندهای ساخت مدل، تعریف معیارهای که عملکرد مدل با آنها سنجیده می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار است، به‌طوری که این معیارها می‌توانند اثر معنی‌داری در معماری مدل و انتخاب تکنیک‌های وزن بهینه شبکه داشته باشند (نادری و همکاران، ۱۳۹۵). برای این منظور معیارهای ضریب کارایی و مجذور میانگین مربعات خطا برای صحت سنجی شبکه‌های طراحی شده مورد استفاده قرار گرفتند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q - \bar{Q}_p)^2} \quad (2)$$

که در آن Q مقادیر بر مشاهده‌ای و Q_p مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه و $\bar{Q}_p$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی می‌باشند. هر چه ضریب کارایی R² به یک نزدیک باشد؛ نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن مقادیر مشاهده و محاسبه شده به یکدیگر و دقیق‌تر بودن جواب‌ها در هر مرحله است. مجذور میانگین مربعات خطا یک شاخص کمی مناسب که می‌توان از آن در برآورد میزان دقت مدل استفاده کرد، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) می‌باشد. این معیار، دقت مدل را براساس تفاضل بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده، ارزیابی می‌کند و طبیعتاً هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، نمایانگر اختلاف کمتری بین آن‌ها خواهد بود. RMSE به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود.

ایستگاه تبخیرسنجی حنا استفاده شد. در ابتدا از سطح تراز چاه‌های پیژومتر، سطح تراز آب زیرزمینی حوضه به صورت ماهیانه استخراج گردید. سپس جهت رفع نقص داده‌های بارش با استفاده از داده‌های دو ایستگاه بارانسنجی خارج از حوضه از روش تفاضل‌ها و نسبت‌ها داده‌های مفقودی یا گم تکمیل شد. کلیه داده‌های آماری بین سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۸ به‌صورت ماهیانه مرتب شدند. این داده‌ها که شامل ۲۴۰ سری داده از اطلاعات بارندگی، دبی و سطح تراز آب چاه‌های دشت مورد مطالعه بود، نرمال شدند. ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۵ درصد برای صحت‌یابی و ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات آماری داده‌های ورودی مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های ورودی مدل.

Table 1- Statistical characteristics of model input data.

Parameter	Length of statistical period (years)	Maximum 24 hours	Annual average
(mm) Rain	20	96	352
Discharge (m ³ /s)	20	163	9.8

نرمال سازی داده‌ها

اصولاً وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای دوری از چنین شرایطی و همچنین به‌منظور یکسان کردن ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل نرمال‌سازی صورت می‌گیرد که این کار مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها و سبب جلوگیری از اشباع زود هنگام نرون‌ها می‌گردد (بروجردی و همکاران، ۱۳۹۴). در این تحقیق برای نرمال کردن از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$x_n \frac{x - x_{min}}{x_{man} - x_{min}} \quad (1)$$

که در آن:

X_n: معرف داده‌های نرمال شده

X: معرف داده‌های مشاهده‌ای خام

X_{man}: معرف حداکثر داده‌های مشاهده‌ای خام

X_{min}: معرف حداقل داده‌های مشاهده‌ای خام

تست شبکه

در مدل‌های شبکه تحقیقات نشان داده است که یک شبکه ممکن است دچار آموزش اضافه شود. اگر فرایند آموزش

نتایج آرایش‌ها

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q - Q_p)^2}{n}} \quad (3)$$

در این مطالعه به منظور دستیابی به الگوریتم و ساختار

مناسب شبکه سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده که در

جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

جدول ۲- سناریوهای مختلف مدل.

Table 2- Different model scenarios.

Model output	Model input structure	Scenario
Groundwater level	Precipitation and water level data with a one-month delay	Structure 1
Groundwater level	Water level data with a one-month delay	Structure 2
Groundwater level	Precipitation data with one- and two-month lags, balance data with one- and two-month lags	Structure 3
Groundwater level	Precipitation and streamflow data with a one-month delay	Structure 4

در آرایش ۳ داده های بارش (P) و تراز آب (W)، با تأخیر یک ماهه (P-1) (W-1) و تأخیر دو ماهه (P-2) (W-2) به عنوان ورودی (Input) و داده های تراز آب به عنوان Target در نظر گرفته شدند.

در آرایش ۴ نیز داده های بارش (P) و دبی (Q)، با تأخیر یک ماهه (P-1) (Q-1) به عنوان ورودی (Input) و داده های تراز آب به عنوان Target در نظر گرفته شدند.

آرایش ۱: (Input=W-1, P-1), (Target=W)

در آرایش ۱ داده های بارش (P) و داده های تراز آب (W)، با تأخیر یک ماهه (P-1) و (W-1) به عنوان ورودی (Input) و داده های تراز آب به عنوان Target در نظر گرفته شدند (جدول

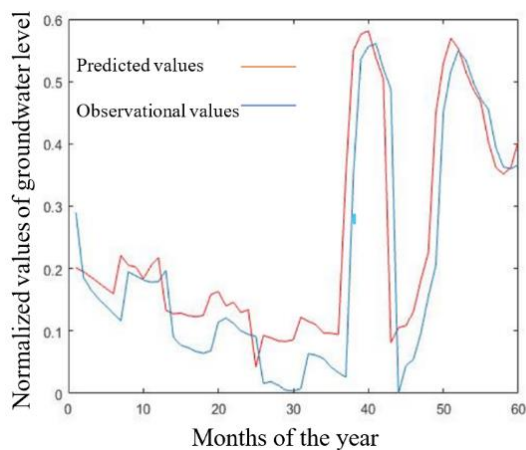
۳). شکل ۳ مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی موجود در مدت ۶۰ ماه (صحت سنجی) را نشان می دهد. شکل ۴ نیز خطوط برازشی مدل را در شرایط مختلف آموزش و آزمون شبکه را در اولین مدل از آرایش اول را نشان می دهد.

در آرایش ۲ داده های تراز آب (W)، با تأخیر یک ماهه (W-1) به عنوان ورودی (Input) و داده های تراز آب به عنوان Target در نظر گرفته شدند.

جدول ۳- نتایج آرایش ۱.

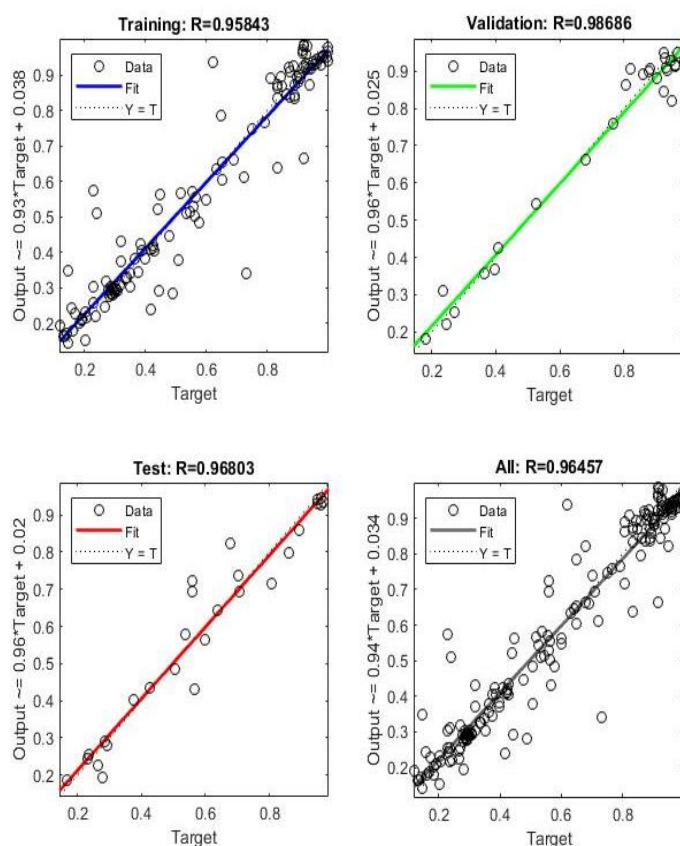
Table 3. Results of arrangement 1.

Test		Transfer function		Number of neurons	Number of layers	Training functions	Network type	Input model number
RMSE	R ²	Layer2	Layer1					
0.0089	0.8780	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINLM	MLP	1
0.0081	0.8725	PURLINE	LOGSIG	2	2	TRAINLM	MLP	2
0.0132	0.8760	PURLINE	LOGSIG	3	2	TRAINLM	MLP	3
0.0124	0.8712	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGD X	MLP	4
0.0158	0.8447	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGD A	MLP	5



شکل ۳- نمودار هم‌پوشانی آرایش ۱ از مدل ۱.

Figure 3. Overlap diagram of arrangement 1 of model 1.



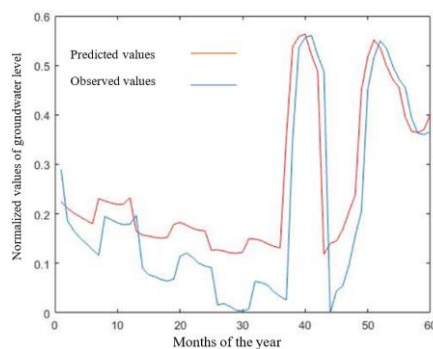
شکل ۴- نمودار رگرسیون آرایش ۱ از مدل ۱.

Figure 4. Regression diagram of arrangement 1 of model 1.

جدول ۴- نتایج آرایش ۲.

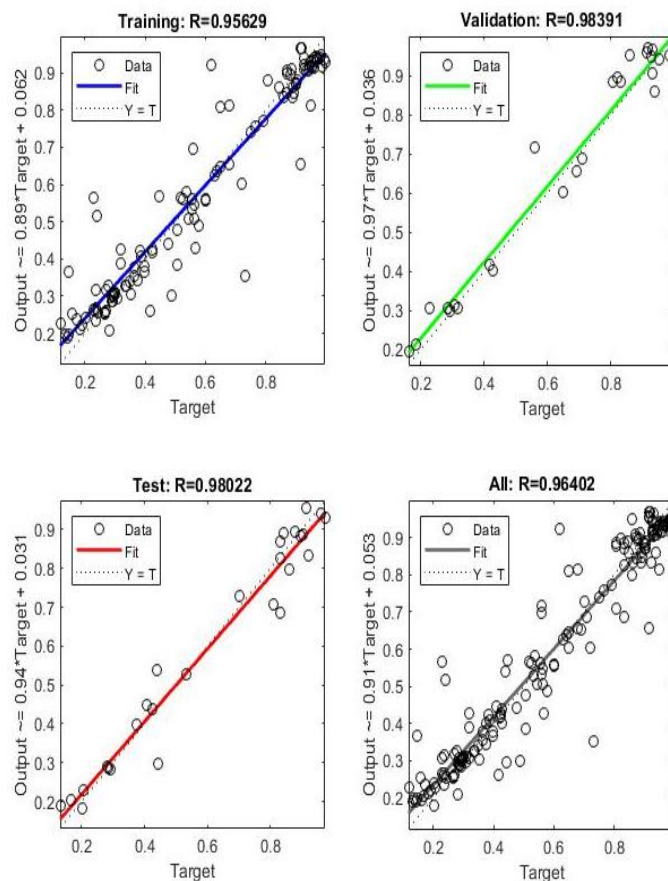
Table 4. Results of arrangement 2.

Test		Transfer function		Number of neurons	Number of layers	Training functions	Network type	Input model number
RMSE	R ²	Layer2	Layer1					
0.0107	0.8772	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINLM	MLP	1
0.0099	0.8686	PURLINE	LOGSIG	2	2	TRAINLM	MLP	2
0.0095	0.8749	PURLINE	LOGSIG	3	2	TRAINLM	MLP	3
0.0137	0.8674	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDx	MLP	4
0.0198	0.8661	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDA	MLP	5



شکل ۵- نمودار هم پوشانی آرایش ۲ مدل ۱.

Figure 5. Overlap diagram of arrangement 2 of model 1.



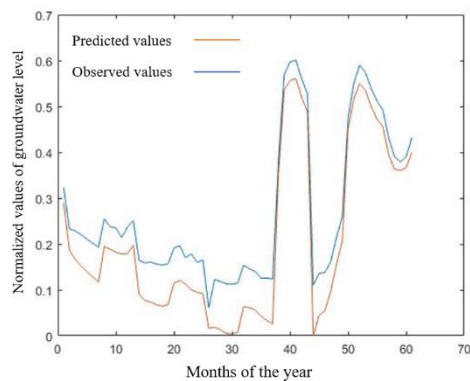
شکل ۶- نمودار رگرسیون آرایش ۲ مدل ۱.

Figure 6. Regression diagram of arrangement 2 of model 1.

جدول ۵- نتایج آرایش ۳.

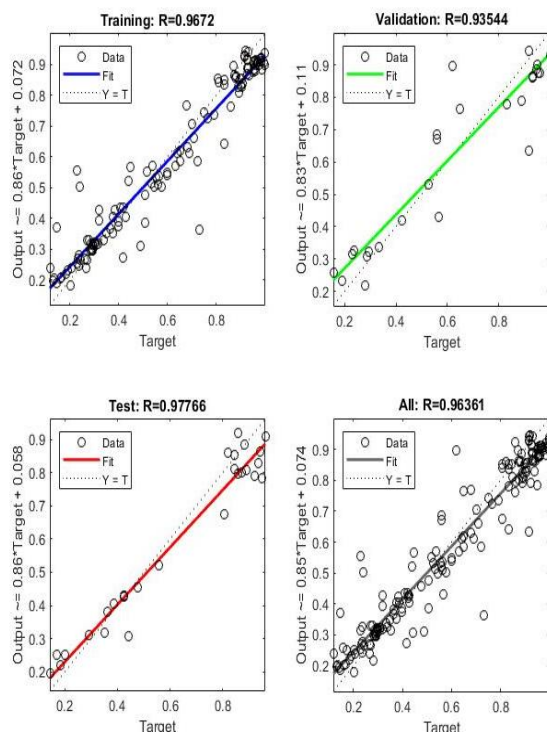
Table 5- Results of arrangement 3.

Test		Transfer function		Number of neurons	Number of layers	Training functions	Network type	Input model number
RMSE	R ²	Layer2	Layer1					
0.0047	0.9962	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINLM	MLP	1
0.0048	0.9853	PURLINE	LOGSIG	2	2	TRAINLM	MLP	2
0.0078	0.9634	PURLINE	LOGSIG	3	2	TRAINLM	MLP	3
0.0199	0.9544	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDX	MLP	4
0.0273	0.8518	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDA	MLP	5



شکل ۷- نمودار هم پوشانی آرایش ۳ مدل ۱.

Figure 7. Overlap diagram of arrangement 3 of model 1.



شکل ۸- نمودار رگرسیون آرایش ۳ مدل ۱.

Figure 8. Regression diagram of arrangement 3 of model 1.

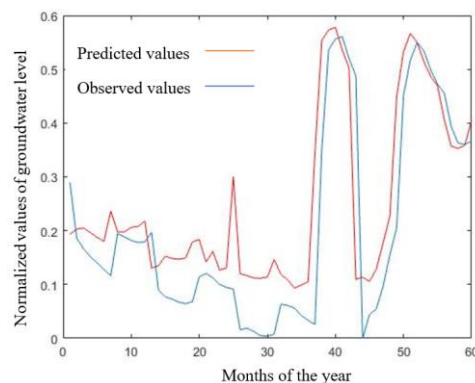
جدول ۶- نتایج آرایش ۴.

Figure 8. Regression diagram of arrangement 3 of model 1.

Test		Transfer function		Number of neurons	Number of layers	Training functions	Network type	Input model number
RMSE	R ²	Layer2	Layer1					
0.0104	0.8746	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINLM	MLP	1
0.0106	0.8846	PURLINE	LOGSIG	2	2	TRAINLM	MLP	2
0.0096	0.8802	PURLINE	LOGSIG	3	2	TRAINLM	MLP	3
0.0260	0.7666	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDX	MLP	4
0.0277	0.7992	PURLINE	LOGSIG	1	2	TRAINGDA	MLP	5

پیش‌بینی سطح تراز آب‌های زیرزمینی در بهینه‌سازی مدیریت منابع آب بسیار موثر می‌باشند. اما فاکتورها و عوامل مختلفی بر روی این پدیده تأثیر گذارند که تحلیل آن‌ها را مشکل می‌سازد. عواملی از قبیل میزان بهره‌برداری از چاه‌ها در مقیاس زمانی و مکانی، میزان آب برگشتی، میزان ضریب ذخیره و مواردی از این قبیل تأثیر به‌سزایی در تغییرات تراز آب زیرزمینی و به‌تبع آن در عدم‌قطبیت پیش‌بینی‌ها دارند. با این وجود مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی از جمله مدل‌هایی هستند که از نظر ساختاری به‌صورت جعبه سیاه هستند. یعنی این مدل‌ها با ساختارهای مختلف ورودی‌ها را طی یک سیستم پردازشی پیچیده به خروجی (تغییرات تراز آب زیرزمینی) متصل می‌کنند. به‌عبارتی مدل از طریق آموزش الگوهای مشاهداتی فرآیند شبیه‌سازی را انجام می‌دهد و به نوعی عوامل یاد شده در نتیجه شبیه‌سازی‌ها مستتر می‌باشد. مدل‌های آماری و رگرسیون از معمول‌ترین روش‌های تحلیلی می‌باشند که غالباً با توجه به حل خطی این پدیده نتایجی همراه با خطا ارائه داده و نمی‌توانند تغییرات زمانی پدیده موردنظر را با دقت قابل‌قبول مدل‌سازی کنند. امروزه سیستم‌های فازی و عصبی با توجه به توانایی در حل پدیده‌های غیر خطی و پیچیده کاربردهای فراوانی در مسائل مختلف مهندسی آب از جمله هیدرولوژی پیدا کرده‌اند.

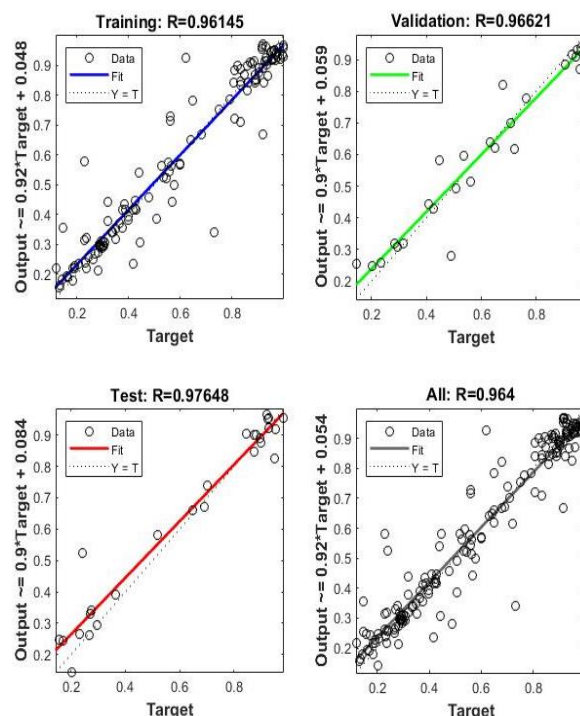
از آن‌جا که تغییرات سطح آب زیرزمینی به مؤلفه‌های زیادی بستگی دارد لذا پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی با ورودی‌های متعدد به مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با عدم‌قطعیت‌هایی روبرو خواهد بود. کما اینکه با اضافه شدن ورودی‌ها علاوه بر پیچیدگی بیشتر ساختار شبکه ممکن است پیش‌بینی‌ها را با عدم‌قطعیت بیشتری مواجه سازد. از این رو انتخاب بهترین شبکه و مؤثرترین عوامل در تغییرات متغیر مورد نظر گام مؤثری در کاهش عدم‌قطعیت‌ها در پیش‌بینی آن متغیر می‌باشد. در این تحقیق برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی حوزه آبخیز کمه شهرستان سمیرم از مدل شبکه عصبی مصنوعی با آرایش‌های مختلف استفاده شد. نتایج ضمن تایید کارایی مناسب مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی نشان داد که استفاده از پارامترهای اقلیمی با میزان ضریب تعیین 0.99 و مجذور میانگین مربعات خطای 0.0047 نسبت به پارامترهای



شکل ۹- نمودار هم‌پوشانی آرایش ۴ مدل ۳.

Figure 9. Overlap diagram of arrangement 4 of model 3.

براساس نتایج در آرایش سوم که داده‌های بارش (P) و تراز آب (W)، با تأخیر یک ماهه (P-1) (W-1) و تأخیر دو ماهه (P-2) (W-2) به‌عنوان ورودی (Input) و داده‌های تراز آب به‌عنوان Target در نظر گرفته شده بودند، با الگوریتم آموزش لونیبرگ مارکوات بهترین کارایی را دارا می‌باشند ($R^2=0.9962$ و $RMSE=0.0047$). با مقایسه جداول $RMSE$ و R^2 آرایش سوم (ورودی بارش و تراز آب زیرزمینی) و آرایش چهارم (ورودی دبی و بارش)، مشاهده می‌گردد که آرایش سوم نتایج بهتری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار رگرسیون آرایش ۴ مدل ۳.

Figure 10. Regression diagram of arrangement 4 of model 3.

مصنوعی (مطالعه موردی: دشت زاوه تربت حیدریه). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۱ (۲۱): ۲۳۵-۲۲۳.

دلاور، م.، مرید، س.، شفیعی فر، م.، ۱۳۸۷. شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه نسبت به مؤلفه های بیلان آبی آن. مجله هیدرولیک، ۳ (۱): ۴۵-۵۵.

زارع ابیانه، ح.، بیات ورکشی، م.، ۱۳۹۲. توسعه و کاربرد مدل های عصبی، فازی، الگوریتم ژنتیک و زمین‌آمار در برآورد توزیع مکانی سطح ایستابی دشت همدان. نشریه پژوهش های حفاظت و آب و خاک، ۲۰ (۴): ۲۵-۱.

زاهدی، ا.، فریدونی، م.، ۱۳۹۳. مقایسه شبکه عصبی مصنوعی با سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی توابع دشت ارسنجان. همایش ملی راهکارهای پیش‌روی بحران آب در ایران و خاور میانه، ۱-۶.

مبارکی، م.، فریدونی، م.، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با استفاده از ترکیب مدل های موجک، فازی عصبی و مقایسه آن با مدل فازی عصبی. کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران معماری شهرسازی، ۱-۱۰.

مختاری، ز.، ناظمی، ا.، ندیری، ع.، ۱۳۹۱. پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: دشت شبستر)، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، ۸ (۴): ۳۵۳-۳۴۵.

ملکی نژاد، ح.، پور شرعیاتی، ر.، ۱۳۹۲. کاربرد و مقایسه مدل سری زمانی تجمعی و مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مروست). علوم و مهندسی آبیاری، ۳۶ (۳): ۹۲-۸۱.

مهدوی‌زاده، م.، ۱۳۸۳. شبکه‌های عصبی مصنوعی و کاربردهای آن در مهندسی عمران. انتشارات عبادی. ۱۹۲ ص.

ندیری، ع.، صدقی، ز.، کاظمیان، ن.، ۱۳۹۶. بهینه‌سازی روش DRASTIC با استفاده از هوش مصنوعی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه دشت ورزقان. مجله اکوهیدرولوژی، ۴ (۴): ۱۰۸۹-۱۱۰۳.

نیک‌منش، م.، رخشنده‌رو، غ.، ۱۳۹۰. ارزیابی توانایی شبکه‌های مختلف عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب

هیدرولوژیکی با میزان ضریب تعیین ۰/۸۸ و مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۰۱ جهت مدل‌سازی مقادیر کمی آب- زیرزمینی در مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای عملکرد بهتری می‌باشد. مقایسه آرایش اول و چهارم نشان می‌دهد که با اضافه‌شدن دبی جریان سطحی به‌عنوان ورودی مدل‌های شبکه از کارایی آن کاسته می‌شود. همچنین با افزایش زمان تأخیر در داده‌های اقلیمی و آب زیرزمینی کارایی مدل‌سازی بهتر گردیده است و این نشان از اثرگذاری میزان بارش‌ها حتی در حوزه‌های کوهستانی، با بازه‌های یک ماهه و دو ماهه بر تغییرات سفره زیرزمینی می‌باشد. با مقایسه نتایج آزمون‌های آماری چهار آرایش مختلف در مدل شبکه‌عصبی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌هایی که با الگوریتم آموزش لونیبرگ مارکوارت آموزش داده شده‌اند، بهترین کارایی را داشته‌اند که با نتایج تحقیق حسینی در منطقه دشت زاوه خراسان مطابقت دارد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین مطابق نتایج این تحقیق و با توجه به پیچیدگی مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی در اثر عوامل مختلف اقلیمی، زمینی و مدیریتی پیشنهاد می‌گردد تا جهت پیش‌بینی کوتاه مدت تراز آب زیرزمینی با دقت قابل‌قبولی از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمود که نتایج تحقیق جندقی نیز در منطقه گرگانرود مؤید این موضوع می‌باشد (جندقی، ۱۴۰۰).

منابع

باباعلی، ح.، دهقانی، ر.، ۱۳۹۶. پیش‌بینی دبی سیلابی با استفاده از شبکه عصبی موجک. مجله هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۱)، ۱۴۹-۱۶۸.

بروجردی، آ.، فریدونی، م.، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت شیراز با استفاده از مدل‌های بردار پشتیبان و مقایسه آن با مدل‌های عصبی فازی و موجک عصبی (مطالعه موردی: دشت شیراز)، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب، ۱-۱۳.

جندقی، ن.، ۱۴۰۰. مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی ماهانه با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، چهلمین گردهمایی ملی علوم زمین، تهران.

حسینی، م.، روشنی، ع.، ذباح، ا.، ۱۳۹۹. مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی براساس روش‌های مبتنی بر هوش

Journal of Agronomy and Plant Production, 4(11), 2926-2936.

Moradi, A., Akhtari, A., Azari, A., 2023. Prediction of groundwater level fluctuation using methods based on machine learning and numerical model. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 10 (1), 20-28.

Nourmohammadi Dehbalaei, F., Azari, A., Akhtari, A.A., 2023. Development of a linear-nonlinear hybrid special model to predict monthly runoff in a catchment area and evaluate its performance with novel machine learning methods. Applied Water Science, 13 (5), 1-23.

Panahi, J., Mastouri, R., Shabanlou, S., 2022. Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. Journal of Hydro informatics, 24 (4), 875-897.

Paul, A., Afroosa, M., Baduru, B., Paul, B., 2023. Showcasing model performance across space and time using single diagrams. Ocean Modelling, 181, 102150.

Samani, S., Vadiati, M., Delkash, M., Bonakdari, H., 2022. A hybrid wavelet-machine learning model for qanat water flow prediction. Acta Geophysica, 1-19.

Babaali, H., Dehghani, R., 2017. Flood discharge prediction using wavelet neural network. Hydrogeomorphology Journal, 3(11), 149-168. [In Persian]

Boroujerdi, A., Fariduni, M., 2015. Simulation of Shiraz Plain groundwater level using support vector models and its comparison with neuro-fuzzy and wavelet neural models (Case study: Shiraz Plain). Water Engineering Conference and Exhibition, 1-13. [In Persian]

Jandaqi, N., 2021. Monthly groundwater level modeling using artificial neural network model. Fortieth National Gathering of Earth Sciences, Tehran. [In Persian]

Hosseini, M., Roshani, A., Zabbah, E., 2020. Modeling groundwater level changes based on artificial intelligence methods (Case study: Zaveh-Torbat Heydarieh Plain). Watershed Management Research Journal, 11 (21): 223-235. [In Persian]

Delavar, M., Morid, S., Shafeifar, M., 2008. Simulation and sensitivity and uncertainty analysis of Urmia Lake water level variations relative to its water balance components. Journal of Hydraulics, 3(1): 45-55. [In Persian]

Zare Abiane, H., Bayat Varkeshi, M., 2013. Development and application of neural, fuzzy, genetic algorithm and geostatistical models in estimating the spatial distribution of the water table in Hamedan Plain. Journal of Water and Soil Conservation Research, 20(4): 1-25. [In Persian]

زیرزمینی در آبخوان محدوده سعادت شهر فارس. تحقیقات منابع آب ایران، ۷(۱): ۸۶-۸۲.

سراوانی، ز.، محمدرضاپور، ا.، سیاسر، هادی.، ۱۴۰۲. پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استان گلستان با مدل‌های هوش مصنوعی. هیدروژئولوژی ۸(۲): ۱۵-۲۸.

یوسفی مبرهن، ا.، صابر چناری، ک.، زندی فر، س.، ۱۴۰۳. تحلیل تغییرات زمانی خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان با استفاده از شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و بارش استاندارد. هیدروژئولوژی، ۹(۲): ۱-۱۴.

Reference

Adamowski, J., Chan, H. F., 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. Journal of Hydrology, 407, 28-40.

Bunchingiv, B., Gerald, H., Holz, K.P., 2003. Short Term Water Level Prediction Using Neural Network and Neuro-Fuzzy Approach, ELSEVIER, page 439-450.

Chang, J., Wang, G., Mao, T., 2015. Simulation and prediction of supra permafrost groundwater level variation in response to climate change using a neural network model. Journal of Hydrology, 529, pp.1211-1220.

Chen, L.H., Chen, C.T., Pan, Y.G., 2009. Groundwater level prediction using SOM RBFN multisite model. Journal of Hydrologic Engineering, 15(8), 624-631.

Chitsazan, M., Rahmani, G., Neyamandpour, A., 2013. Ground Water Level Simulation Using Artificial Neural Network: A Case Study from Aghili Plain, Urban Area of Gotvand, Soth-West Iran, Jgeope, 3(1), P.35-46.

Emamgholizadeh, S., Moslemi, K. and Karami, G., 2014. Prediction the groundwater level of bastam plain (Iran) by artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Water resources management, 28(15), 5433-5446.

Feng, Sh., Kang, Sh., Hou, Z., Chen, S., Mao, X., 2008. Neural Networks to Simulate Regional Ground Water Levels Affected by Human Activities, Ground Water, 46, page 80-90.

Galavi, H., Lee Teang, Shui., 2012. Neuro-Fuzzy-Modeling and Fore Casting in Water Resources, Academic Journals, Scientific Research and Essays, 7(24), 2112-2121.

Khaled, A., Abdolmajid, A., hadad, B.O., Heydari, N., 2013. Estimation Of Virtual Water Using Support Vector Machine, K-nearest Neighbour and Radial Basis Function Neural Network Models, International

Zahedi, A., Fariduni, M., 2014. Comparison of artificial neural network with adaptive neuro-fuzzy inference system in predicting the groundwater level of Arsanjān Plain aquifers. National Conference on Strategies for Facing the Water Crisis in Iran and the Middle East, 1-6. [In Persian]

Mobarki, M., Fariduni, M., 2015. Simulation of groundwater level using a combination of wavelet and neuro-fuzzy models and its comparison with the neuro-fuzzy model. International Conference on Modern Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, 1-10. [In Persian]

Mokhtari, Z., Nazemi, A., Nadiri, A., 2012. Groundwater level prediction using artificial neural network model (Case study: Shabestar Plain). Applied Geology Quarterly, 8(4): 345-353. [In Persian]

Malekinejad, H., Pour Sharaeati, R., (2013). Application and comparison of cumulative time series model and artificial neural network model in predicting groundwater level changes (Case study: Marvast Plain). Irrigation Sciences and Engineering, 36 (3): 81-92. [In Persian]

Mahdavizadeh, M., 2004. Artificial Neural Networks and Their Applications in Civil Engineering. Abadi Publications. 192 p. [In Persian]

Nadiri, A., Sedghi, Z., Kazemian, N., 2017. Optimization of DRASTIC method using artificial intelligence for vulnerability assessment of the multi-aquifer system of Varzeqan Plain. Ecohydrology Journal, 4(4): 1089-1103. [In Persian]

Nikmanesh, M., Rakhshandehroo, G., 2011. Evaluation of the ability of different artificial neural networks in predicting groundwater level in the aquifer of the Saadat Shahr area, Fars. Iranian Water Resources Research, 7(1): 82-86. [In Persian]

Saravani, Z., MohammadrezaPour, A., Siasar, H., 2023. Prediction of qualitative parameters of groundwater in Golestan province using artificial intelligence models. Hydrogeology, 8(2): 15-28. [In Persian]

Yousefi Mobarhan, A., Saber Chenari, K., Zandifar, S., 2024. Analysis of the temporal variations of drought on the groundwater resources of Qorveh-Dehgolan Plain using groundwater drought indices and standardized precipitation index. Hydrogeology, 9(2): 1-14. [In Persian]

پیش‌بینی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی با شاخص GRI و استفاده از مدل‌های تصادفی خطی سری زمانی (منطقه مورد مطالعاتی: آبخوان دشت اردبیل)

سید مهدی حسینی^{۱*}، یعقوب دین‌پژوه^۲، امید بابامیری^۳

۱- دانش آموخته دوره‌ی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی پسادکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: mahdi.hoseini@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

چکیده

در این مطالعه، خشک‌سالی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت اردبیل مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، داده‌های ماهانه تراز آب زیرزمینی ۴۸ چاه مشاهداتی طی دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۴ مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تبدیل داده‌های نقطه‌ای به منطقه‌ای، از روش تیس‌بندی بهره گرفته شد. شاخص GRI در بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) براساس داده‌های منطقه‌ای تراز آب زیرزمینی محاسبه گردید. سپس مدل‌سازی سری‌های زمانی GRI انجام شد. کارایی مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری نش-ساتکلیف (NS) و آکائیک (AIC) ارزیابی شد تا مناسب‌ترین مدل شناسایی گردد. پارامترهای یکایک مدل‌ها براساس داده‌های مشاهده‌ای تخمین زده شدند. تحلیل خشک‌سالی برای هر بازه زمانی به صورت جداگانه صورت گرفت. به منظور پیش‌بینی خشک‌سالی، از مدل برازش یافته بر هر سری زمانی استفاده شد. نتایج نشان داد که طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی در بازه زمانی سه‌ماهه مربوط به سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ و در بازه زمانی شش‌ماهه مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ بوده است. بیشترین شدت ترسالی و خشک‌سالی به ترتیب ۱/۸۷ و ۳/۲۱- در مقیاس GRI1 و GRI9 مشاهده شد. مدل‌سازی سری‌های زمانی GRI نشان داد که کلیه سری‌های زمانی دارای الگوی فصلی هستند و بنابراین با مدل $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)$ برازش شدند. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین مدل برای سری GRI3 مدل $SARIMA(5,1,0)$ (0,2,2) است. مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد این مدل برای داده‌های مشاهده‌ای معادل با $NS=0.53$ و $AIC=-96.6$ بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های سری زمانی دقت نسبتاً خوبی در پیش‌بینی شاخص GRI برای پنجره‌های زمانی کوتاه‌مدت در دشت اردبیل دارند.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، پیش‌بینی، خشک‌سالی، شاخص، SARIMA-ARIMA، GRI.

مقدمه

خشک‌سالی اجتماعی-اقتصادی (Dikshit et al., 2021; Mishra & Singh, 2010; Li et al., 2024) برای بررسی و تحلیل شرایط خشک‌سالی، شاخص‌های متعددی توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند که می‌توان به شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، جریان استاندارد شده (SDI)، بارش و تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص اکتشاف خشک‌سالی (RDI)، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) اشاره کرد (Li et al.,

خشک‌سالی یک پدیده آب‌وهوایی طبیعی موقتی و پیچیده است که نسبت به سایر بلایای طبیعی، جمعیت بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Nguyen et al., 2017; Tsakiris et al., 2007; Wang et al., 2021). با توجه به متغیرهای آب‌وهوایی مرتبط با خشک‌سالی، چهار نوع مختلف از این پدیده تعریف شده است: خشک‌سالی هواشناسی، خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی، خشک‌سالی کشاورزی و

بهره‌گیری از مدل زنجیره مارکوف، داده‌های بیش از ۲۶ هزار چاه و ۶۰۰ ایستگاه هواشناسی طی یک بازه ۲۰ ساله ارزیابی شده و روند پایداری خشک‌سالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که احتمال وقوع خشک‌سالی از ۶۲ درصد در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۴ به ۷۵ درصد در دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۵ افزایش یافته است. در مجموع، میانگین احتمال وقوع خشک‌سالی در کل منطقه مطالعه تا حدود ۴۶ درصد برآورد شد. عزیزی و همکاران (۲۰۲۱) نیز اثر خشک‌سالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین را با استفاده از شاخص‌های GRI، SPI و NISTOR بررسی کردند و نتایج نشان داد که شاخص GRI در هنگام بروز خشک‌سالی از وضعیت نرمال به خشک‌سالی شدید تغییر می‌کند، که یافته‌های شاخص NISTOR نیز این روند را تأیید کرد.

به‌منظور مدیریت بهینه منابع آب و کاهش خسارات ناشی از خشک‌سالی، پیش‌بینی آن امری ضروری است (Buri et al., 2025). در این راستا، روش‌های متعددی ارائه شده که مدل‌های سری زمانی از رایج‌ترین آن‌ها محسوب می‌شوند (Araghinejad et al., 2017; Batool et al., 2025; Van et al., 2017; Loon et al., 2012; Yan et al., 2017). مدل‌های تصادفی خطی مانند ARIMA و مدل میانگین متحرک یکپارچه خودهمبسته فصلی (SARIMA) به‌طور گسترده در هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mishra & Desai, 2005). موساد و العربا (۲۰۱۵) نشان دادند که مدل ARIMA توانایی بالایی در پیش‌بینی خشک‌سالی بر اساس شاخص SPEI دارد. این مدل انعطاف‌پذیر بوده و از پرکاربردترین مدل‌های پیش‌بینی در مطالعات مربوط به خشک‌سالی است. خو و همکاران (۲۰۲۰) برای بهبود پیش‌بینی خشک‌سالی، مدل ترکیبی ARIMA-SVR را که ترکیبی از ویژگی‌های خطی و غیرخطی مدل‌های داده‌محور است، بررسی کردند. در این مطالعه، شاخص استاندارد بارش (SPI) در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای استان هنان چین تحلیل شد. مقایسه عملکرد مدل ترکیبی با مدل ARIMA نشان داد که دقت پیش‌بینی با افزایش مقیاس زمانی بهبود یافته اما با افزایش زمان پیش‌بینی کاهش می‌یابد. مدل ARIMA-SVR نسبت به ARIMA، خصوصاً در بازه‌های ۱ تا ۲ ماهه، دقت بالاتری داشت. همچنین، برای تحلیل فضایی دقت پیش‌بینی‌ها از

2024; McKee et al., 1993; Yuan et al., 2023; حسینی و همکاران، ۱۳۹۵).

در زمینه تحلیل خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی، ابزارهای مختلف تحت عنوان شاخص‌های خشک‌سالی پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، شاخص GRI است که با استفاده از داده‌های تراز آب زیرزمینی، وضعیت خشک‌سالی را به‌صورت کمی توصیف می‌کند (زندى فر و همکاران، ۱۳۹۸). این شاخص در بررسی خشک‌سالی‌های دشت‌های مختلف ایران مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، زندى فر و همکاران (۱۳۹۸) از این شاخص برای تحلیل خشک‌سالی‌های حوضه آبریز زهره-جراحی طی دوره آماری ۱۳۸۵-۱۳۹۵ استفاده کردند و نشان دادند که تأثیر کاهش بارش بر تراز آب زیرزمینی، حدود ۶ ماه تأخیر دارد. همچنین، خسروی دهکردی و همکاران (۱۳۹۸) با به‌کارگیری شاخص GRI، پایش خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد را در دوره آماری ۱۳۶۴-۱۳۹۴ انجام دادند و با استفاده از زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی خشک‌سالی، نتیجه گرفتند که در آبان ۱۳۷۲، شاخص GRI به بالاترین مقدار خود (معادل ۱/۸۳) رسید.

برای پیش‌بینی خشک‌سالی، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که بیشتر آن‌ها مبتنی بر مدل‌های تصادفی و احتمالاتی هستند. در مدل‌های سری زمانی، نویز یا خطای تصادفی که ناشی از عوامل غیرقابل پیش‌بینی است، در مدل‌سازی لحاظ می‌شود. برخی مدل‌ها، مانند زنجیره مارکوف، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که مقدار متغیر در زمان فعلی را براساس مقادیر قبلی پیش‌بینی می‌کنند (زندى و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی مشابه جانی (۱۳۹۸) از مدل‌سازی سری زمانی ARIMA برای تحلیل تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت تبریز در مقیاس ۴۸ ماهه استفاده کرده و با اعمال روش تجزیه خوشه‌ای، ایستگاه‌ها را به ۷ کلاس تفکیک کرده و برای هر کلاس مدل‌سازی جداگانه‌ای انجام داد. نتایج مطالعه نشان داد که افزایش نوسان در داده‌های سری زمانی موجب کاهش دقت مدل ARIMA می‌شود. عظیمی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی در ایران پرداخته و از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) به‌عنوان معیارهای اصلی برای تحلیل تغییرات خشک‌سالی استفاده کردند. در این پژوهش، با

تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل با شاخص GRI و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل‌های تصادفی سری زمانی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

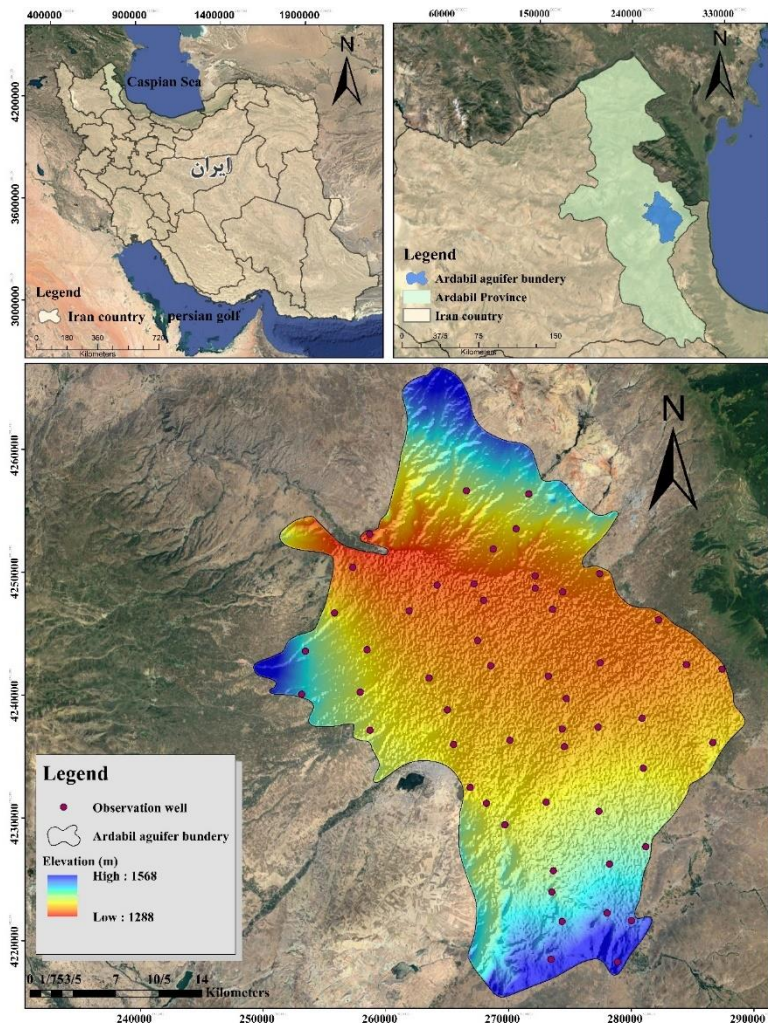
محدوده مطالعاتی دشت اردبیل با مساحتی بالغ بر ۴۸۰۴/۷ کیلومتر مربع در قسمت شمال غرب ایران، بین عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی واقع شده است. دشت اردبیل از شمال به مرز ایران و آذربایجان، از شرق به ارتفاعات تالش، از جنوب به رودخانه آراچای و از غرب به دامنه کوه سبلان منتهی می‌شود. تنها راه خروجی دشت اردبیل رودخانه قره‌سو بوده که از طریق دره‌رود به رودخانه ارس و دریای خزر منتهی می‌شود (حسینی و خوش‌سیما چنار، ۱۴۰۳؛ کرد و همکاران، ۱۳۹۸). این رودخانه ۲۸۵ کیلومتر طول داشته و در مسیر عبور خود از دشت اردبیل، آب رودخانه بالیخلی‌چای را نیز در خود جمع کرده و در محلی به نام اصلاندوز به ارس می‌ریزد. حجم آورد سالانه آن حدود ۵۵۴ میلیون مترمکعب است (اکبری‌نیزی و همکاران، ۱۴۰۲).

بر اساس شاخص دومارتن، اقلیم اردبیل از نوع نیمه‌خشک بوده (طاوسی و دل‌آرا، ۱۳۹۷) و براساس داده‌های هواشناسی، میانگین بارش سالانه دشت اردبیل حدود ۲۷۳ میلی‌متر است. پرباران‌ترین و کم‌باران‌ترین ماه در این دشت به ترتیب، اردیبهشت و مرداد با متوسط بارش ۴۴/۵ و ۴/۵ میلی‌متر هستند. میانگین دمای ایستگاه سینوپتیک اردبیل برابر با ۹/۹ درجه سلسیوس است. حداکثر دمای ثبت شده اردبیل در تابستان ۴۴ درجه سلسیوس و حداقل دمای ثبت شده در زمستان ۳۳/۸- درجه سلسیوس است. همچنین، متوسط تعداد رورهای بارانی، برفی و یخبندان در اردبیل به ترتیب، ۱۰۰، ۳۴ و ۱۲۷ روز در سال می‌باشد (دانشور و ثوقی و همکاران، ۱۳۹۸؛ طاوسی و دل‌آرا، ۱۳۹۷، بی‌نام، ۱۳۹۱). آبخوان دشت اردبیل دارای ۲۴۸۳ حلقه چاه بهره‌برداری، ۱۴ دهنه چشمه و ۲۶ رشته قنات است که نیاز آبی منطقه از قبیل کشاورزی، شرب و صنعت را برآورد می‌کند.

روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی برتری قابل‌توجهی در پیش‌بینی خشک‌سالی دارد. عاقل‌پور و همکاران (۲۰۲۱) نیز با محاسبه شاخص SDI در پنجره‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، اقدام به پیش‌بینی خشک‌سالی با استفاده از مدل سری زمانی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SARIMA برای پنجره‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه مناسب بوده، اما در پنجره زمانی ۱۲ ماهه مدل ARIMA عملکرد بهتری دارد. در زمینه پیش‌بینی شاخص GRI نیز مطالعاتی انجام شده است. فرزین و همکاران (۲۰۲۲) با معرفی یک رویکرد ترکیبی نوین، به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی (GWT) و تحلیل خشک‌سالی پرداخته‌اند. آن‌ها برای مدل‌سازی سری‌های زمانی GWT، از ترکیب مدل حافظه طولانی-کوتاه دوطرفه (BLSTM) و الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO) بهره گرفته و عملکرد این مدل را با روش‌های LSTM، ANN، SARIMA، ARIMA و BLSTM مقایسه کرده‌اند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل BLSTM-HHO از نظر دقت پیش‌بینی برتری قابل‌توجهی داشته و در مقایسه با سایر روش‌ها، عملکرد بهتری بر اساس معیارهای RMSE، NSE و dr ارائه می‌دهد. تحلیل داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ در سه آبخوان منتخب حاکی از کاهش سطح آب زیرزمینی بوده است. علاوه بر این، ارزیابی خشک‌سالی بر مبنای شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) نشان داد که روند خشک‌سالی در سال‌های آینده تداوم خواهد داشت و شدت آن افزایش خواهد یافت.

خشک‌سالی موجب کاهش دسترسی به منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، است که منجر به محدودیت‌های قانونی در اجرای طرح‌های توسعه پایدار منابع آب می‌شود. آبخوان دشت اردبیل به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی و شرب، در سال‌های اخیر با خشک‌سالی‌های پی‌درپی مواجه شده که کاهش منابع آب سطحی و برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی را در پی داشته است. این روند موجب افت شدید تراز آبخوان شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون خشک‌سالی‌های دشت اردبیل با شاخص GRI تحلیل‌نشده و مدل‌سازی سری‌های زمانی برای پیش‌بینی آن انجام نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه، پایش تغییرات

در مطالعه حاضر، آمار ۴۸ حلقه چاه مشاهداتی در مقیاس ماهانه در خلال سال‌های آبی ۸۴-۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت اردبیل و نیز چاه‌های مشاهداتی منتخب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- محدوده آبخوان دشت اردبیل و موقعیت چاه‌های مشاهداتی منتخب.

Figure 1- Ardabil Plain Aquifer Area and Location of Selected Observation Wells.

داده‌های مورد استفاده

حداقل مربعات و رگرسیون خطی تکمیل شدند. سپس نرمال-بودن و همگنی داده‌های اصلی به ترتیب از طریق آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و ران تست در نرم افزار Minitab مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصله، تراز آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش تیسن‌بندی در نرم افزار Arc GIS محاسبه گردید. سپس با در دست داشتن سری زمانی تراز آبخوان در مقیاس زمانی سالانه در دوره آماری مذکور شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، نه و ۱۲ ماهه محاسبه گردید. با استفاده از روش مدل‌های سری‌های زمانی تصادفی مناسب‌ترین مدل در هر پنجره زمانی مشخص شد و

داده‌های مورد نیاز پژوهش حاضر از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شده است که از بین آمار ۵۲ حلقه چاه مشاهداتی، ۴۸ حلقه چاه که دارای دوره آماری مشترک (۱۳۸۳-۱۴۰۰) بود، برای مطالعه حاضر انتخاب گردید. به منظور تحلیل داده‌های چاه‌های مشاهداتی با استفاده از روش‌های آماری نرمالیت، خلاء آماری و وجود داده پرت مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا پس از آماده‌سازی سری زمانی داده‌ها، مشخص شد که ۱۲ چاه مشاهداتی در سال‌های مختلف دارای کمبود داده بوده که با استفاده از روش‌های

خشک‌سالی استفاده شد (Box and Jenkins, 1976). به این منظور، ایستایی سری داده‌های مشاهداتی GRI مورد آزمون واقع شده و سپس مدل‌های باکس-جنکنز شامل مدل‌های خودهمبسته (AR)، میانگین متحرک (MR)، مدل خودهمبسته-میانگین متحرک (ARMA) و مدل غیرفصلی میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه (ARIMA) برای هر سری ارزیابی گردید. همچنین مدل فصلی SARIMA نیز برای هر کدام از سری‌ها آزمایش شد (Box and Jenkins, 1994).

مدل خود همبسته^۱ (AR)

مدل‌های خودهمبسته (AR) با استفاده از یک رابطه خطی مقدار کمیت مورد بررسی (در اینجا شاخص GRI) را در زمان t به مقادیر نظیر در زمان‌های پیشین شامل $t-1$ ، $t-2$ ، ... و $t-p$ ربط می‌دهد (Box et al., 1994). این مدل به شرح زیر در نظر گرفته شد (Salas, 1980):

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} \dots + \varphi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t \quad (2)$$

که در آن φ ضرایب مدل خود همبسته یا اتورگرسیو و ε_t مقدار خطای مدل در زمان t می‌باشد. در عمل برای اکثر سری‌های هیدروژئولوژیکی تعداد گام‌های پیشین محدود بوده و آن را با p نشان می‌دهند. در این مطالعه p با رسم نمودار تابع خودهمبستگی مشاهدات نمونه^۲ (ACF) و نیز نمودار خودهمبستگی جزئی^۳ (PACF) تخمین زده شدند.

مدل میانگین متحرک (MA)

در مدل میانگین متحرک^۴ (MA) مقدار متغیر مورد بررسی در زمان t با y_t و میانگین سری با $\bar{y}$ در نشان داده می‌شود. در عمل برای مدل‌بندی سری زمانی از متغیر جدید موسوم به Z_t استفاده می‌شود که در آن $Z_t = y_t - \bar{y}$ است. در مدل MA سری زمانی فاقد حافظه است، به عبارت دیگر مقدار متغیر نرمال شده در زمان t فقط به نویز (نوسان) در چند گام پیشین بستگی دارد. مقدار نویز در زمان t با ε_t نشان داده می‌شود. در عمل تعداد گام‌های پیشین محدود بوده و آن را با q نشان می‌دهند. بنابراین، مدل MA از مرتبه q بشرح زیر در نظر گرفته شد (Salas et al., 1997; Box et al., 1994):

در نهایت شاخص مذکور برای سال‌های آتی با توجه به مدل سری زمانی برازش یافته پیش‌بینی شد.

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

انواع شاخص‌های خشک‌سالی در متون مختلف وجود دارد. یکی از آن‌ها که با تراز آب زیرزمینی قابل محاسبه است، شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) است. این شاخص در ابتدا توسط مهندسینو و همکاران (۲۰۰۸) معرفی و به عنوان شاخصی با قابلیت اعتمادپذیری بالا برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی شناخته شده است (خسروی‌دهکردی و همکاران، ۱۳۹۸). معمولاً این شاخص به صورت نقطه‌ای محاسبه می‌شود و سپس برای کل دشت با میان‌یابی به روش‌های مختلف و رسم نقشه‌های مکانی بسط داده می‌شود (زندفر و همکاران، ۱۳۹۸) که این شاخص با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Mendicino et al., 2008):

$$GRI_{y,m} = \frac{(D_{y,m} - \mu_{D,m})}{\sigma_{D,m}} \quad (1)$$

که در آن $GRI_{y,m}$ بیانگر مقدار شاخص مذکور در ماه m از سال y ، مقدار $D_{y,m}$ تراز سطح ایستابی در ماه m از سال y ، $\mu_{D,m}$ میانگین طولانی مدت سطح ایستابی ماه m در طول D سال دوره آماری و مقدار $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال می‌باشد. توصیف کیفی خشک‌سالی و ترسالی با توجه به شاخص GRI در جدول (۱) ارائه شده است (Mendicino et al., 2008).

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت شاخص GRI (Mendicino et al., 2008).

Table 1. Classification of GRI Index Severity (Mendicino et al., 2008).

GRI values	Drought class
≥ 2	Extremely wet
1.5 to 1.99	Severely wet
1 to 1.49	Moderately wet
0.99 to -0.99	Normal
-1 to -1.49	Moderately dry
-1.5 to -1.99	Severely dry
≤ -2	Extremely dry

مدل‌های سری زمانی

پس از محاسبه شاخص GRI آبخوان دشت اردبیل، از مدل‌های سری زمانی برای مدل‌سازی و سپس پیش‌بینی پدیده

³Partial Autocorrelation Function (PACF)

⁴Moving Average (MA)

¹Autoregressive (AR)

²Autocorrelation Function (ACF)

$$\phi(B)\phi(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D(Z_t^{(\lambda)} - \mu_t) = \theta(B)\theta(B^s)a_t \quad (8)$$

که در آن Z_t نمایانگر داده مشاهداتی در زمان t ، s بیانگر تعداد فصل در یک سال و مؤلفه نویز a_t می باشد. در رابطه ۵، مؤلفه های اتورگرسیو (AR) عبارتند از $\phi(B)$ و $\phi(B^s)$ که به ترتیب بیانگر مؤلفه فصلی و غیر فصلی با مرتبه های p و q می باشند. همچنین مؤلفه میانگین متحرک (MA)، در رابطه ۵ با $\theta(B)$ و $\theta(B^s)$ به ترتیب مربوط به مؤلفه های فصلی و غیر فصلی با مرتبه های q و Q می باشد. عملگرهای تفاضلی فصلی و غیر فصلی به ترتیب با $(1-B)^d$ و $(1-B^s)^D$ نشان داده شده است. همچنین λ بیانگر ضریب مربوط به تبدیل باکس-کاکس می باشد (Box et al., 1994).

شاخص های ارزیابی مدل

به منظور پیش بینی شاخص GRI از مدل های تصادفی سری زمانی ARIMA و SARIMA استفاده شد. داده های مورد استفاده دارای مقیاس ماهانه بوده و از کل ۱۸ سال دوره آماری (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱)، تعداد ۱۷ سال (۲۰۰۴ ماه) برای واسنجی مدل و یک سال آخر (۱۲ ماه) برای صحت سنجی آن در نظر گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، مقادیر پیش بینی شده توسط سری های زمانی با مقادیر واقعی مقایسه گردید. در این راستا، از معیارهای ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، آماره آکائیک (AIC)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) مطابق روابط زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}_i)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{f}_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{f}_i - \bar{f})^2}} \right]^2 \quad (10)$$

$$AIC = 2LN(MSE) + 2m \quad (11)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}_i)^2 \quad (12)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

که در آن $\bar{y}$ و $\bar{f}$ به ترتیب مقدار مشاهداتی $\bar{y}$ و میانگین سری زمانی تاریخی می باشد. همچنین مؤلفه های $\hat{f}_i$ و $\bar{f}$ به ترتیب نمایانگر داده های پیش بینی و میانگین آن ها بوده و

$$Z_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

که در آن θ ضرایب مدل MA می باشند. تعداد گام ها یا q با رسم نمودار ACF مشاهدات نمونه و نیز نمودار PACF تخمین زده شدند. گرچه راههای مختلفی برای قضاوت پیرامون برازش مدل با مشاهدات وجود دارد، با این حال در مطالعه فعلی، به علت سادگی مدل در یک دیاگرام رسم و به بررسی شباهت آن ها پرداخته شد.

مدل خود همبسته-میانگین متحرک ARMA

مدل تلفیقی خود همبسته-میانگین متحرک (ARMA)، از ترکیب مدل های AR و MA حاصل می شود که این ARMA نسبت به دو مدل AR و MA انعطاف پذیری و کارایی بیشتری دارد. از رابطه ۴ مقدار ARMA محاسبه می شود (Box and Jenkins, 1994).

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4)$$

مدل میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه ARIMA

مدل ARIMA یک مدل غیر فصلی از سری مدل های باکس-جنکینز بوده که از ترکیب عملگرهای AR با مرتبه p و MA با مرتبه q به دست می آید. مدل ARIMA که در رابطه ۵ نشان داده شده است برای جهت حذف نالیستایی مدل از عمل تفاضل گیری مرتبه d بهره گرفته شده است. از این جهت مدل های ARIMA براساس مقادیر سه پارامتر اصلی مدل، دسته بندی می شوند (Box and Jenkins, 1994).

$$\phi(B)\nabla_z^d = \theta(B)\alpha_t \quad (5)$$

که در آن، $\phi(B)$ و $\theta(B)$ به ترتیب چند جمله ای های مرتبه p و q بوده که در رابطه ۶ و ۷ محاسبه شده است.

$$\phi(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (6)$$

$$\theta(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \quad (7)$$

به طور کلی ARIMA از سه مرحله تعیین p ، d و q با استفاده از نمودار ACF و PACF جهت برآورد p و q و بررسی باقی مانده های مدل به منظور ارزیابی چگونگی برازش مدل به سری مورد بررسی تشکیل می شود. (Box and Jenkins, 1994).

مدل فصلی SARIMA

مدل SARIMA همانند مدل ARIMA بدون حذف خاصیت فصلی می باشد این مدل به شرح زیر در نظر گرفته شد:

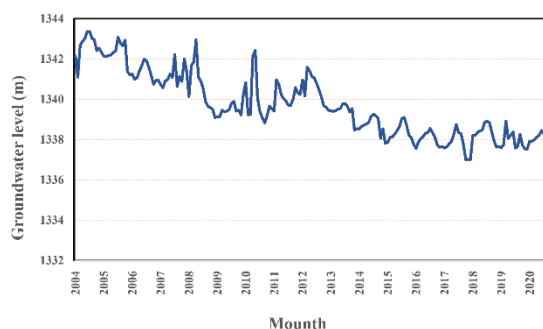
پایش شاخص GRI در دوره تاریخی (۲۰۰۴-۲۰۲۱)

محاسبه شاخص GRI در آبخوان دشت اردبیل، در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه انجام شد. شکل ۳ شاخص خشک‌سالی GRI را در مقیاس‌های زمانی مختلف در دوره آماری ۱۸ ساله (۲۰۰۴-۲۰۲۱) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که در مقیاس‌های زمانی مختلف و در طول دوره‌ی آماری، شاخص خشک‌سالی GRI در پنج مقیاس زمانی به تدریج از حالت مثبت به حالت منفی تغییر علامت داده است که مفهوم آن این است که در دشت اردبیل با توجه به تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری به تدریج از ترسالی به سمت خشک‌سالی حرکت کرده است. با توجه به شکل ۳، در مقیاس زمانی یک‌ماهه شاخص GRI، در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ در ترسالی شدید بوده و در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ نیز از حالت ترسالی متوسط به سمت نزدیک به نرمال روی آورده است. همچنین در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ ترسالی‌های متوسط تا شدید به تناوب رخ داده است ولی از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰ شاخص از حالت نزدیک به نرمال سمت خشک‌سالی شدید حرکت کرده است. در حالت کلی، در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه شاخص GRI طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ از ترسالی شدید به سمت نرمال تغییر کرده است. درحالی‌که شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰ از حالت نزدیک به نرمال به حالت خشک‌سالی شدید تغییر موضع داده است. براین اساس بعد از سال ۲۰۱۳ به علت برداشت‌های بی‌رویه آب از آبخوان دشت اردبیل همواره وضعیت خشک‌سالی هیدروژئوژیکی در منطقه حاکم بوده است، زیرا که مقدار GRI در تمام مدت بعد از سال ۲۰۱۳ منفی می‌باشد.

m در رابطه ۸ بیانگر مجموع مرتبه‌های مربوط به بخش میانگین متحرک یا q و بخش خودهمبسته یا p (یا مجموع $p+q$) می‌باشد. در آماره RMSE، مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. همچنین، هرچه مقدار R^2 و NS به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در فرآیند پیش‌بینی خواهد بود. بازه MSE از صفر تا مثبت بی‌نهایت متغیر است، به طوری که مقدار صفر نشان‌دهنده تطابق کامل مدل با داده‌ها بوده و مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده کاهش دقت مدل است. بنابراین، هرچه مقدار MSE کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری خواهد داشت. ACI معیاری برای انتخاب مدل بهینه در تحلیل‌های آماری محسوب می‌شود. مقدار این شاخص از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت متغیر است. با این حال، مقدار AIC به تنهایی قابل تفسیر نیست، بلکه باید در مقایسه با سایر مدل‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا مدل بهینه انتخاب شود.

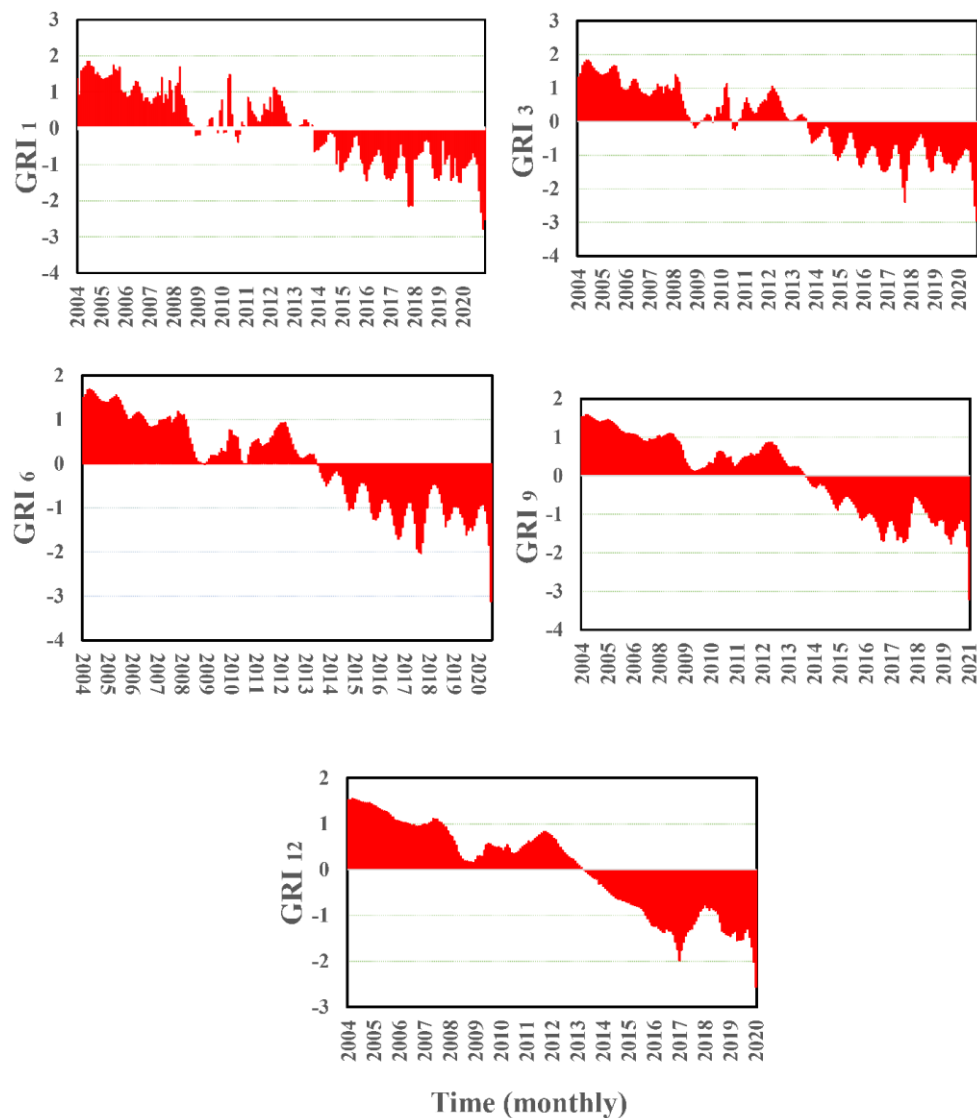
نتایج و بحث**تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل**

شکل ۲ هیدروگراف واحد آبخوان دشت اردبیل که با استفاده از روش تیسن‌بندی رسم گردیده را نشان می‌دهد. براساس شکل فوق که برای دوره آماری (۲۰۰۴-۲۰۲۱) رسم شده است، افت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل در دوره ۱۸ ساله مشهود می‌اشد. مقدار کل افت تراز سطح ایستابی در طول ۱۷ سال در آبخوان دشت اردبیل ۵/۳۶ متر می‌باشد به عبارت دیگر، متوسط افت تراز سالانه آبخوان ۰/۳۲ متر در سال می‌باشد.



شکل ۲- آبنمود آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری ۱۷ ساله (۲۰۰۴-۲۰۲۱).

Figure 2 - Hydrograph of Ardabil Plain Aquifer over a 17-year statistical period (2004-2021).



شکل ۳- نمودار شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف در آبخوان دشت اردبیل (۲۰۲۱-۲۰۰۴).
Figure 3 - GRI index chart over different time scales in Ardabil plain aquifer (2004-2021).

مدلسازی زمانی شاخص GRI

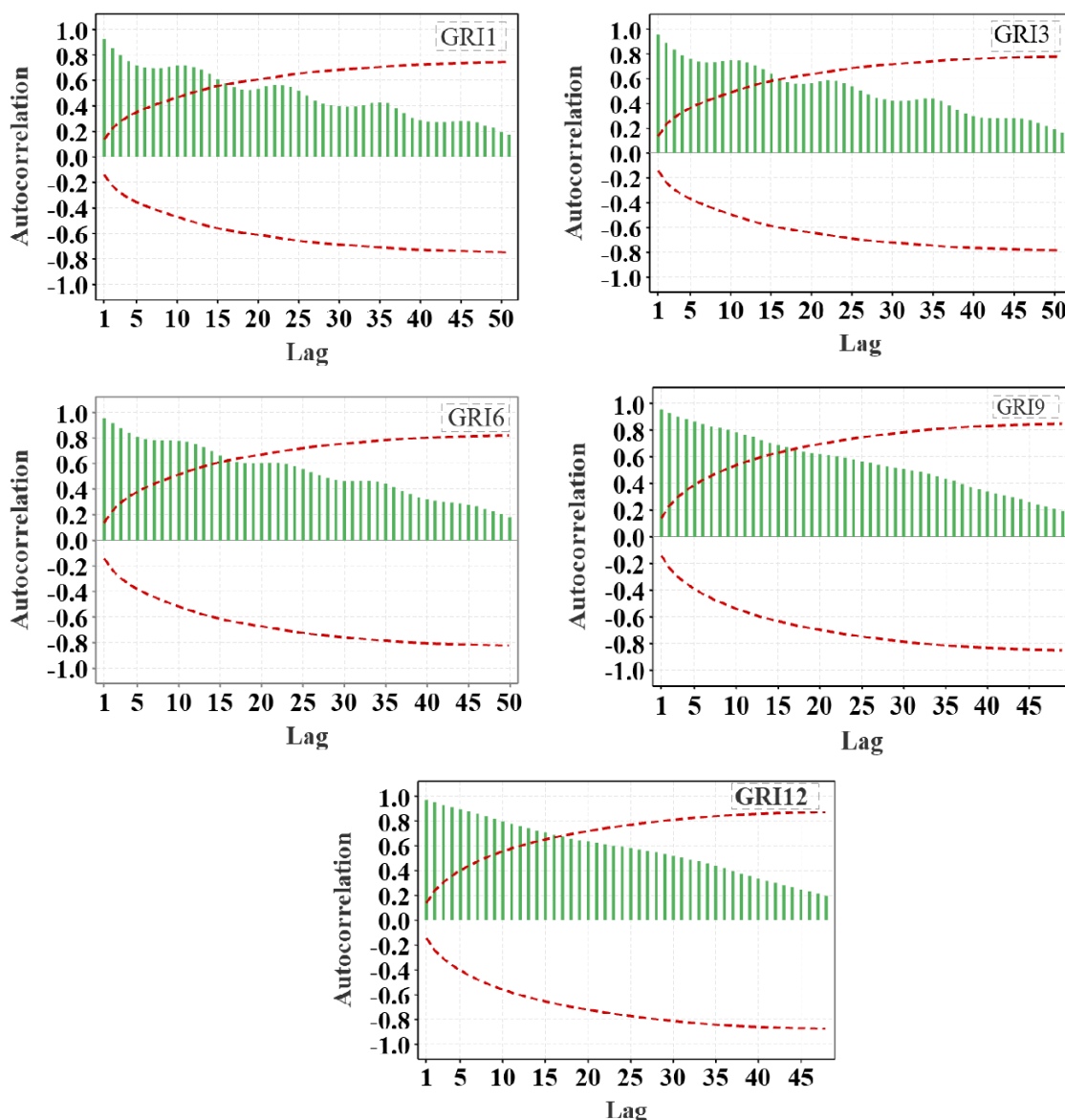
نمودارهای ACF و PACF

به‌منظور پیش‌بینی شاخص خشک‌سالی GRI، لازم است از بین مدل‌های مختلف سری‌های زمانی مناسب‌ترین آن‌ها، انتخاب شود. بر این مبنا، برای سری‌هایی که دارای روند فصلی بودند، از مدل‌های فصلی استفاده شد. اما برای سری‌هایی که فاقد روند فصلی بودند، از مدل‌های غیر فصلی بهره‌گرفته‌شد. به‌منظور شناسایی رفتار شاخص GRI، از نمودار تابع خود همبسته^۱ (ACF) استفاده گردید. شکل ۴، نمودارهای ACF را برای سری‌های زمانی GRI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه نشان می‌دهد. در این شکل، باند اطمینان ۹۵ درصد

به‌صورت خط چین دیده می‌شود و مقدار ضریب خودهمبستگی به‌ازای تاخیرهای مختلف (از ۱ تا ۵۰) با نمودارهای ستونی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان یک‌روند ترکیبی از امواج نمایی و سینوسی ضعیف را (برای هر یک از پنج پنجره زمانی) مشاهده نمود. همانگونه که از شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد، در هر کدام از پنجره‌های زمانی GRI₁، GRI₃، GRI₆، GRI₉ و GRI₁₂ تعداد ۱۵ تاخیر زمانی از باند اطمینان عبور کرده‌است. در پنجره زمانی ۱۲ ماهه می‌توان مشاهده کرد که هرچه تعداد تاخیرها افزایش یابد، مقدار ضریب همبستگی (بجز در موارد اندک) کاهش می‌یابد. همه ضرایب خود همبستگی (در هر پنجره زمانی) مثبت بوده که

¹Auto-Correlation Function

نمایانگر ارتباط مقدار GRI در هر زمان با مقدار آن در زمان‌های پیشین است. تعداد زمان‌های قبل با توجه به شکل، محل تقاطع نمودار ACF با باند اطمینان در نظر گرفته می‌شود.



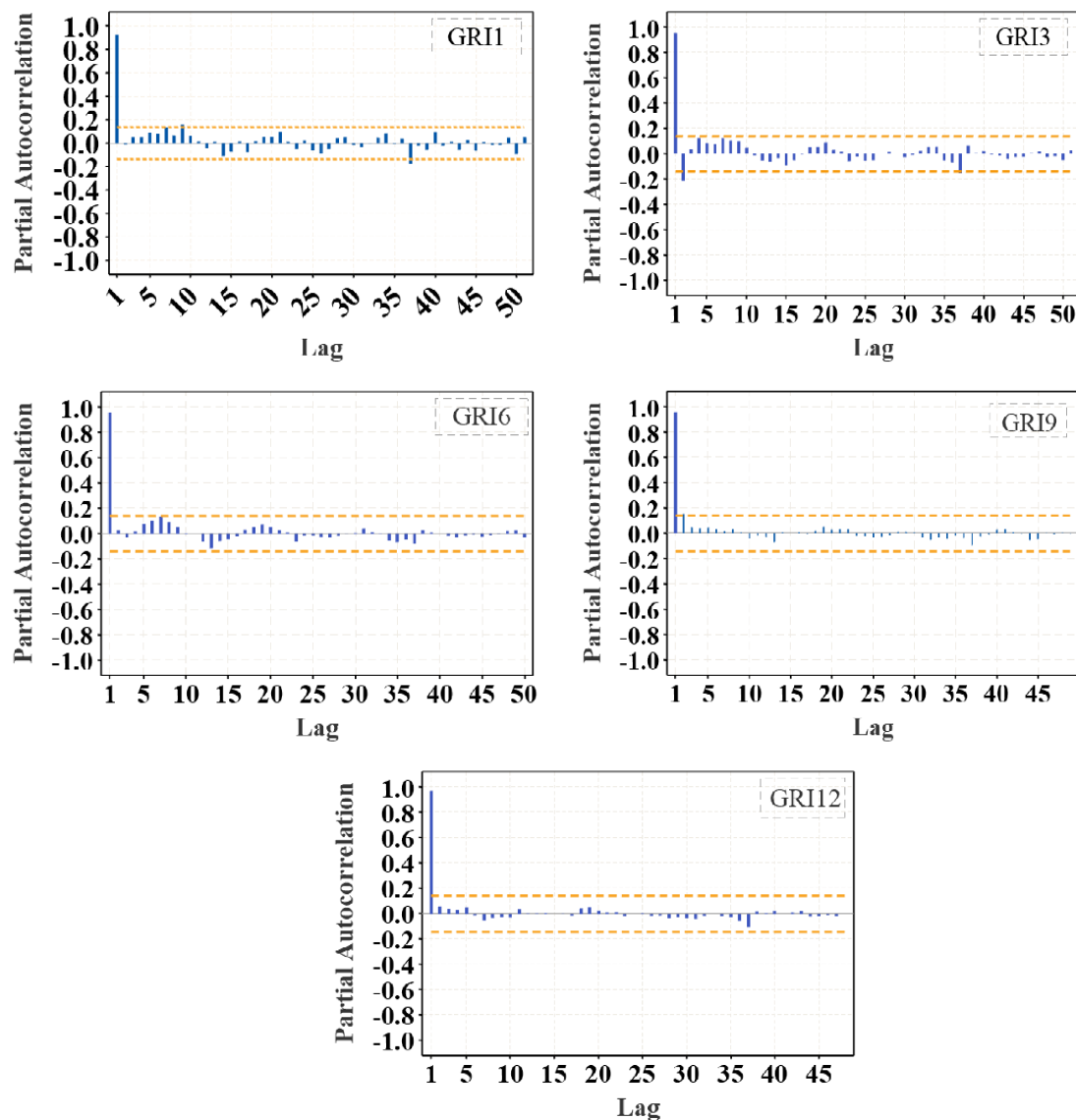
شکل ۴- نمودارهای ACF نظیر شاخص GRI با مقیاس‌های زمانی مختلف برای آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری (۲۰۰۴-۲۰۲۱).

Figure 4 - ACF plots corresponding to the GRI index with different time scales for the Ardabil plain aquifer during the statistical period (2004-2021).

تجاوز کرده‌باشد. طبق شکل ۵، در پنجره‌های زمانی GRI_1 ، GRI_3 ، GRI_6 ، GRI_9 و GRI_{12} تعداد خطوط قائم متلاقی و عبور کرده از باند اطمینان به ترتیب دو، دو، یک، یک و یک تاخیر زمانی است که این اعداد مرتبه نظیر میانگین متحرک را در مدلسازی مشخص می‌سازد.

در شکل ۵ نمودارهای خودهمبستگی جزئی ($PACF^1$) را برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل باند اطمینان ۹۵ درصد به صورت خط چین رسم شده است و مقدار $PACF$ با خطوط عمودی نشان داده شده است. تعداد مرتبه‌ی نظیر میانگین متحرک از شکل مذکور عبارت‌اند از آن تعداد از خطوط قائم که از باند اطمینان

¹Partial AutoCorrelation Function



شکل ۵- نمودارهای توابع خود همبسته جزئی (PACF) نظیر سری‌های زمانی GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف در آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری (۲۰۲۱-۲۰۰۴).

Figure 5 - Partial Auto-Correlation Function (PACF) plots corresponding to the GRI time series at different time scales in Ardabil plain aquifer during the statistical period (2004-2021).

بررسی عملکرد مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی GRI

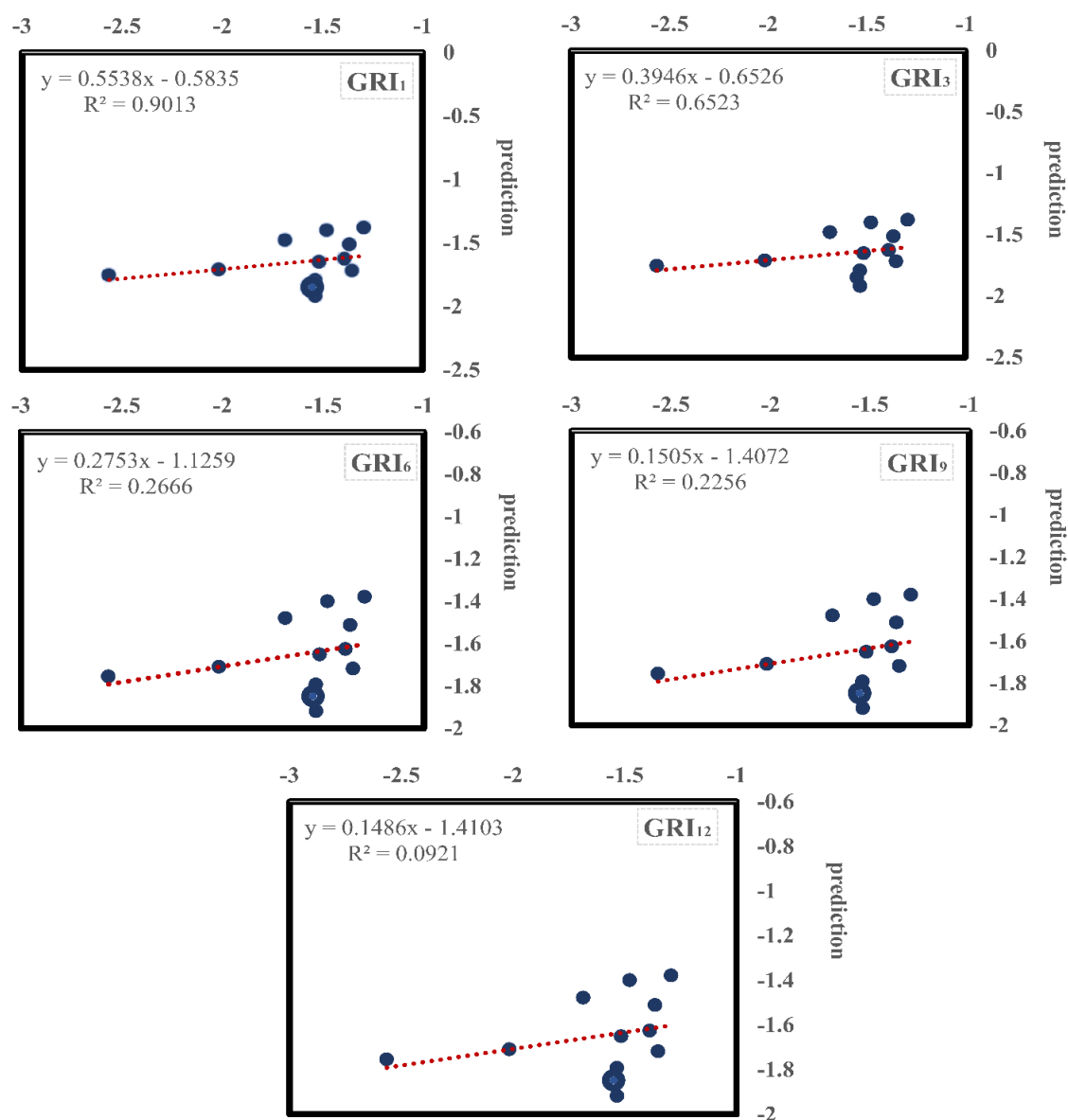
داده‌های آبخوان دشت اردبیل را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور قائم مقادیر پیش‌بینی‌شده از مدل سری زمانی و محور افقی مقادیر مشاهده‌شده می‌باشد. در ادامه، همبستگی میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده محاسبه شد. براساس شکل ۷، پنجره‌های زمانی یک‌ماهه و سه‌ماهه، با ضرایب تعیین $0/9$ و $0/65$ دارای همبستگی خوبی بوده، درحالی‌که پنجره زمانی ۱۲ ماهه با ضریب تعیین $0/09$ ، نشانگر همبستگی ضعیف در بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است.

جدول ۲ نتایج آزمون مدل‌سازی سری‌های زمانی مختلف GRI برای هر یک از پنجره‌های زمانی مورد استفاده نشان می‌دهد. براساس اطلاعات جدول مذکور می‌توان نتیجه گرفت که در پنجره زمانی سه‌ماهه مناسب‌ترین مدل سری زمانی به صورت $SARIMA(5,1,0)(0,2,2)$ بود. به‌طوری‌که در مدل فوق مقدار آماره RMSE برابر $0/63$ متر، مقدار NS برابر $0/53$ و مقدار AIC معادل $95/6$ - می‌باشد. شکل ۶، نمودار پراکنش

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل های مختلف سری زمانی نظیر شاخص GRI.

Table 2 - Results of evaluating various time series models corresponding to the GRI index.

Time series	Model	Validation		
		RMSE (m)	NS	AIC
GRI ₁	SARIMA(1,0,0)(0,2,2)	0.34	0.23	173
GRI ₃	SARIMA(5,1,0)(0,2,2)	0.63	0.53	-95.6
GRI ₆	SARIMA(2,0,0)(0,2,2)	0.49	0.75	-248.1
GRI ₉	SARIMA(1,1,0)(0,2,2)	0.47	0.81	-337
GRI ₁₂	SARIMA(1,1,0)(0,2,2)	0.34	0.99	-337

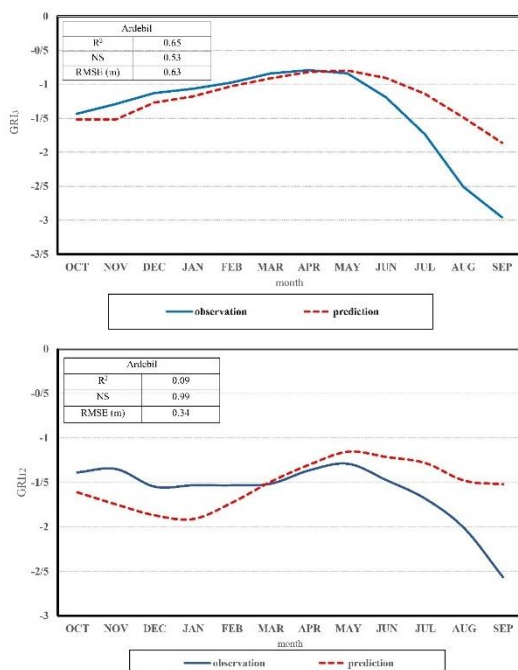


شکل ۶- نمودار پراکنش داده های مشاهداتی و پیش بینی شده با مدل SARIMA و شاخص GRI در آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۲۲.

Figure 6 - Scatter plots of the observed and the predicted values using the SARIMA model and GRI index in Ardabil Plain aquifer in the period 2021-2022.

انتخاب مدل برتر

مجدداً به شکل ۷ که در آن روند تغییرات GRI مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده نشان داده شده کرد. طبق شکل ۷، در پنجره زمانی سه‌ماهه مقادیر GRI همپوشانی مطلوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی داشته ولی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه، همپوشانی ضعیف می‌باشد.



شکل ۷- نمودار سری زمانی شاخص GRI مشاهداتی و محاسباتی در مقیاس‌های سه و ۱۲ ماهه در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۲۲.

Figure 7 - Time series plots of the observed and calculated GRI index using the three and 12-months' time scales in the period 2021-2022.

تحلیل باقی‌مانده‌های مدل و بررسی صحت پیش‌بینی‌ها

به‌منظور بررسی کم‌تخمینی^۱ یا بیش‌تخمینی^۲ مدل‌های ARIMA و SARIMA در پیش‌بینی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی با استفاده از شاخص GRI، از شاخص‌های مختلف ارزیابی مدل مانند R^2 ، NS و AIC استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌طور کلی، مدل‌های ARIMA و SARIMA با توجه به آماره‌ها، عملکرد مطلوبی برای مدل SARIMA داشته است. مقادیر AIC پایین‌تر از مدل ARIMA بوده، که نشان‌دهنده تناسب بهتر مدل با داده‌ها و جلوگیری از پیچیدگی غیرضروری در مدل است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل‌ها نه تنها بیش‌تخمینی نشده‌اند، بلکه در مقایسه با داده‌های واقعی، از عملکرد مناسبی برخوردار بودند. در مورد

با توجه به نتایج حاصله به‌منظور انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی با استفاده از شاخص GRI، از شاخص‌های ارزیابی مدل مانند شاخص‌های AIC، RMSE، R^2 و NS بهره‌گرفته شد. بدین منظور، در ابتدا مدل‌هایی که دارای مقادیر بالای AIC بودند، حذف شدند تا مدل‌های متناسب‌تر باقی بمانند. براین اساس، مدل‌های مربوط به پنجره‌های زمانی ۶، ۹ و ۱۲ ماهه به‌دلیل داشتن مقادیر AIC بالا حذف شدند. سپس برای انتخاب مدل بهینه، از شاخص عملکرد RMSE استفاده شد که پنجره‌های زمانی ۱ ماهه و ۳ ماهه که کمترین مقادیر RMSE را داشتند، به‌عنوان مدل‌های بهینه شناسایی شدند. در گام بعدی، از معیارهای NS و R^2 برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل‌ها استفاده شد. مدل پنجره زمانی ۳ ماهه با مقدار NS برابر با ۰/۵۳ و مدل ۱ ماهه با NS برابر با ۰/۲۳ عملکرد بهتری را در این شاخص نشان دادند. از سوی دیگر، مقدار آماره R^2 برای مدل‌های ۱ ماهه و ۳ ماهه به‌ترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۶۵ بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل ۱ ماهه در پیش‌بینی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی دشت اردبیل با توجه به این شاخص است.

با این حال، GRI3 با توجه به اکثر معیارهای ارزیابی (به‌ویژه در مقایسه با مدل‌های دیگر، خصوصاً مدل ۱ ماهه) عملکرد بهتری داشته که به‌همین دلیل به‌عنوان مدل برتر برای دشت اردبیل انتخاب شد. هرچند مدل ۱۲ ماهه در شاخص NS عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشت، اما در دیگر شاخص‌ها مانند R^2 عملکرد ضعیف‌تری نشان داد. بنابراین، براساس تحلیل تمام شاخص‌ها، مدل ۳ ماهه به‌عنوان مناسب‌ترین مدل و مدل ۱۲ ماهه به‌عنوان بدترین مدل شناسایی شد.

با توجه به نتایج حاصله، می‌توان ادعا کرد که مدل‌های سری زمانی توانایی مطلوبی در پیش‌بینی شاخص هیدروژئولوژیکی GRI در پنجره‌های زمانی مختلف، به‌ویژه در پنجره‌های زمانی کوتاه‌مدت دارد. در نتیجه، در دشت اردبیل از بین پنج پنجره زمانی مختلف مورد استفاده، پنجره زمانی سه‌ماهه (GRI3) بهترین پیش‌بینی را تولید نموده و پنجره زمانی ۱۲ ماهه (GRI12) نامطلوب‌ترین جواب را ارائه کرد. در این مورد می‌توان

²Overfitting

¹Underfitting

کوتاه مدت ممکن است برای تصمیم گیری سریع مفید باشد. بنابراین، توصیه می شود بسته به هدف مدیریت منابع آب، از ترکیبی از این شاخص ها استفاده شود.

یکی از یافته های مهم این تحقیق، روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در دشت اردبیل طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱ بود. نتایج نشان داد که به دلیل برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، خشک سالی های هیدرولوژیکی تشدید شده و به ویژه بعد از سال ۲۰۱۳ خشک سالی های شدیدتر و مداومتری در منطقه مشاهده شده است. این یافته ها می تواند برای برنامه ریزی مدیریت منابع آب، تنظیم الگوی بهره برداری و اجرای سیاست های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و شرب مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل باقی مانده های مدل نشان داد که مدل های مورد استفاده دچار بیش تخمینی یا کم تخمینی قابل توجهی نبوده اند. این امر نشان می دهد که انتخاب مدل ها مناسب بوده و دقت پیش بینی آن ها برای داده های مشاهده شده قابل قبول است. با این حال، پیشنهاد می شود که در مطالعات آینده، از مدل های هیبریدی و روش های یادگیری ماشین برای بهبود دقت پیش بینی و کاهش عدم قطعیت مدل ها استفاده شود.

در مجموع، این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل های سری زمانی تصادفی برای پیش بینی خشک سالی هیدرولوژیکی ابزار مفیدی برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک است. نتایج این مطالعه می تواند مبنای تصمیم گیری برای سیاست گذاران و مدیران منابع آب در جهت بهینه سازی الگوی بهره برداری از آب های زیرزمینی و کاهش اثرات خشک سالی باشد. همچنین، پیشنهاد می شود که در تحقیقات آینده، تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی بر تشدید خشک سالی های هیدرولوژیکی بررسی شده و از ترکیب مدل های سنتی و یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیش بینی ها استفاده شود. در حالت کلی، تصمیم گیران صنعت آب لازم است سیاست برداشت آب را با توجه به ورودی آبخوان (که غالباً از باران و برف می باشد) و بیلان آب تنظیم نمایند و از هرگونه برداشت غیرمجاز به طور قاطع جلوگیری نمایند تا آبخوان نه تنها برای استفاده نسل های آتی پایدار بماند بلکه از فرونشست خاک که در سایر دشت های شمال غرب ایران مانند دشت شبستر-صوفیان

کم تخمینی، براساس ارزیابی ها و مقایسه پیش بینی ها با مقادیر واقعی، مدل ها به خوبی قادر به شبیه سازی روندهای خشک سالی بوده و عاری از خطاهای بزرگ بودند. همچنین، در برخی از داده ها که رفتار فصلی واضحی داشتند، مدل SARIMA (که به طور خاص برای داده های فصلی طراحی شده بود) دقت بالاتری نسبت به مدل ARIMA نشان داد.

با این حال، برای اطمینان از اینکه مدل ها دچار بیش تخمینی نشده اند، تمام داده ها از طریق آزمون های تشخیص بیش برآزش (مثل تحلیل مانده ها) بررسی شدند. نتایج نشان داد که سری مانده های مدل ها، حالت تصادفی داشته و در ضمن، پیش بینی ها با توجه به معیارهای ارزیابی مورد استفاده (بخصوص R^2 و NS) عملکرد مناسبی را ارائه نمودند. بنابراین، نتایج این تحقیق نشان دهنده عدم وجود مشکلات عمده در مورد کم تخمینی یا بیش تخمینی مدل ها بوده و مدل ها به طور مؤثری توانستند خشک سالی هیدرولوژیکی را پیش بینی کنند.

نتیجه گیری

در این مطالعه، پیش بینی خشک سالی هیدرولوژیکی در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از مدل های سری زمانی تصادفی ARIMA و SARIMA و شاخص GRI انجام شد. برای ارزیابی عملکرد مدل ها، از شاخص های MSE ، $RMSE$ ، AIC و R^2 استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل های سری زمانی توانایی بالایی در پیش بینی خشک سالی هیدرولوژیکی دارند و می توانند برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک به کار گرفته شوند. مقایسه مدل های مختلف نشان داد که مدل $SARIMA(5,1,0)(0,2,2)$ در پنجره زمانی ۳ ماهه بهترین عملکرد را داشت، زیرا دارای AIC کمتر، مقدار $RMSE$ مناسب و شاخص NS و R^2 بالاتر نسبت به سایر مدل ها بود. این نتیجه حاکی از آن است که مدل های دارای مؤلفه فصلی می توانند رفتار پیچیده خشک سالی را بهتر مدل سازی کنند.

با توجه به تحلیل انجام شده، انتخاب $GRI3$ به عنوان شاخص مناسب تر نسبت به $GRI1$ منطقی به نظر می رسد، زیرا در دوره های بلند مدت دقت پیش بینی بیشتری ارائه داده و نوسانات غیر واقعی کمتری نسبت به مدل های کوتاه مدت داشته است. با این حال، نتایج نشان داد که $GRI1$ در بازه های زمانی کوتاه تر عملکرد مناسبی داشته است و در پیش بینی های

زندگی، فر، س.، فیجانی، ا.، نعیمی، م.، خسروشاهی، م.، ۱۳۹۸. تغییرات زمانی و مکانی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی، مطالعه موردی: حوزه آبریز زهره-جراحی. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۰۸-۱۳۰.

طاوسی، ت.، دل آرا، ق.، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی آب و هوایی استان اردبیل. نیوار، ۳۴(۷۱-۷۰): ۴۷-۵۲.

کرد، م.، اصغری مقدم، ا.، نخعی، م.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۱۵۳-۱۶۷.

مقصود، ف.، یزدانی، م.ر.، رحیمی، م.، ملکیان، آ.، ذوالفقاری، ع.، ۱۳۹۵. مقایسه کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی، سری زمانی و مدل ترکیبی ANN-ARIMA در مدل‌سازی و پیش‌بینی شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) (مطالعه موردی: جنوب استان قزوین). مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران. ۱۰(۳۳): ۴۷-۵۷.

Reference

Aghelpour, P., Bahrami-Pichaghchi, H., Varshavian, V., 2021. Hydrological drought forecasting using multi-scalar streamflow drought index, stochastic models and machine learning approaches, in northern Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 35(8), 1615–1635.

Akbari Niari, M., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, J., Nikpour, R., 2023. Simulating the Water Quality of Qarasu River Using the QUAL2Kw Model. Hydrogeology, 8(1), 137-155. [In persian]

Ali, Z., Hussain, I., Faisal, M., Nazir, H.M., Hussain, T., Shad, M.Y., Mohamd Shoukry, A., Hussain Gani, S., 2017. Forecasting drought using multilayer perceptron artificial neural network model. Advances in Meteorology, 2017(1), 5681308.

Araghinejad, S., Hosseini-Moghari, S.M., Eslamian, S., 2017. Application of data-driven models in drought forecasting. In Handbook of drought and water scarcity, (pp. 423–440). CRC Press.

Azimi, S., Hassannayebi, E., Boroun, M., Tahmoures, M., 2020. Probabilistic Analysis of Long-Term Climate Drought Using Steady-State Markov Chain Approach. Water Resources Management, 34, 4703–4724.

Azizi, H.R., Ebrahimi, H., Mohamad vali samani, H., khaki, V., 2021. Effect of Meteorological Drought on Groundwater Resources of Varamin Plain Using SPI, NISTOR and GRI index. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 14(6), 2125–2135.

(دین پژوه و همکاران، ۱۳۹۴) و دشت مرند اتفاق افتاده، جلوگیری شود.

منابع

اکبری نیازی، م.، وردی‌نژاد، و.، بهمنش، ج.، نیک پور، م.، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه قره سو با استفاده از مدل Kw2QUAL. هیدروژئولوژی، ۸(۱): ۱۳۷-۱۵۵.

بی‌نام (۱۳۹۱) مطالعات طرح آمایش استان اردبیل. جلد اول، اردبیل، ایران، ۲۷-۸۵. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل.

حسینی، ب.، دین پژوه، ی.، نیکبخت، ج.، ۱۳۹۴. تحلیل خشک‌سالی‌های شمالغرب ایران با روش شاخص اکتشاف خشک‌سالی. آب و خاک، ۲۹(۲): ۲۹۵-۳۱۰.

حسینی، س.، خوش سیمای چنار، م.، ۱۴۰۳. کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در آبخوان اردبیل. تحقیقات آب و خاک ایران.

جانی، ر.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی خوشه‌ای تراز آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از مدل آریم. هیدروژئولوژی ۴(۲): ۱۳۰-۱۰۸.

خسروی دهکردی، ا.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، صمدی بروجنی، ح.، قاسمی دستگردی، ا.، ۱۳۹۸. پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکف. هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۱۱۱-۱۲۵.

دانشوروثوقی، ف.، دین پژوه، ی.، اعلمی، م. ت.، ۱۳۹۰. تأثیر خشک‌سالی بر تراز آب زیر زمینی در دو دهه اخیر (مطالعه موردی: دشت اردبیل). دانش آب و خاک، ۲۱(۴): ۱۶۵-۱۷۹.

دین پژوه، ی.، فاخری فرد، ا.، حسن پور اقدم، م. ع.، بهشتی وایقان، و.، ۱۳۹۴. تحلیل روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در دشت شبستر - صوفیان. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۱): ۵۵-۶۹.

دین پژوه، ی.، ۱۴۰۱. خوشه‌بندی چاه‌های مشاهداتی آبخوان دشت خوی از نظر کیفیت آب با استفاده از روش-K Means. هیدروژئولوژی، ۷(۱): ۲۵-۴۱.

- Karimi, M., Melesse, A.M., Khosravi, K., Mamuye, M., Zhang, J., 2019. Analysis and prediction of meteorological drought using SPI index and ARIMA model in the Karkheh River Basin, Iran. In *Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation*, (pp. 343–353). Elsevier.
- Khosravi Dehkordi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H., Ghasemi Dastgerdi, A.R., 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought in Shahrekord plain using Groundwater Resource Index (GRI) and Markov chain model. *Hydrogeology*, 4(1), 111-125. [In persian]
- Kord, M., Asghari Moghaddam, A., and Nakhaei, M., 2019. Numerical modeling of the Ardabil plain aquifer and its management using optimization of Groundwater extraction. *Hydrogeology*, 4(1), 153-167. [In persian]
- Li, Y., Huang, Y., Li, Y., Zhang, H., Fan, J., Deng, Q., Wang, X., 2024. Spatiotemporal heterogeneity in meteorological and hydrological drought patterns and propagations influenced by climatic variability, LULC change, and human regulations. *Scientific Reports*, 14(1), 5965.
- Maghsoud, F., Yazdani, M.R., Rahimi, M., Malekian, A., Zolfaghari, A., 2016. Performance Comparison of Artificial Neural Network, Time Series and ANN-ARIMA For Groundwater Resources Index (GRI) Forecasting (Case Study: South of Qazvin Province). *Ijwmse*, 10(33), 47–57. [In persian]
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- Mishra, A.K., Desai, V.R., 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19, 326–339.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts *Journal of Hydrology*, 391(1–2): 202–216.
- Mossad, A., Alazba, A.A., 2015. Drought forecasting using stochastic models in a hyper-arid climate. *Atmosphere*, 6(4), 410–430.
- Nguyen, V.H., Li, Q.F., Nguyen, L.B., 2017. Drought forecasting using ANFIS- a case study in drought prone area of Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 15(3), 605–616.
- Rezaei, R., Shabri, A., 2023. Drought forecasting using W-ARIMA model with standardized precipitation index. *Journal of Water and Climate Change*, 14(9), 3345–3367.
- Batool, A., Kartal, V., Ali, Z., Scholz, M., Ali, F., 2025. A novel regional forecastable multiscalar standardized drought index (RFMSDI) for regional drought monitoring and assessment. *Agricultural Water Management*, 308, 109289.
- Bazrafshan, J., Khalili, A., 2013. Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003. *Desert*, 18, 63–71.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1994. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice Hall PTR.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., 1994. *Time series analysis, forecasting and control*. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall.
- Buri, E.S., Keesara, V.R., Loukika, K.N., Sridhar, V., Dzwauro, B., Montenegro, S., 2025. Climate-adaptive optimal water resources management: A multi-sectoral approach for the Munneru river basin, India. *Journal of Environmental Management*, 374, 124014.
- Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., Aalami, M.T., Jhajharia, D., 2013. Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27:547–559. [In persian]
- Dikshit, A., Pradhan, B., Huete, A., 2021. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network. *Journal of Environmental Management*, 283, 111979.
- Dinpashoh, F., Fakhari Fard, A., Hassanpoor Eghdam, M.A., Beheshtee Vayghan., V., 2015. Trend Analysis of Groundwater Quality of Shabestar- Soofian Plain. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 38(1), 55-69. [In persian]
- Farzin, S., Anaraki, M. V., Naeimi, M., Zandifar, S. (2022). Prediction of groundwater table and drought analysis; a new hybridization strategy based on bi-directional long short-term model and the Harris hawk optimization algorithm. *Journal of Water and Climate Change*, 13(5), 2233–2254.
- Hosseini, B., dinpazhoh, Y., and Nikbakht, J., 2015. Analysis of Droughts of Northwest of Iran Using the Reconnaissance Drought Index. *Water and Soil*, 29(2), 295-310. [In persian]
- Hoseini, S.M. khoshsimaie chendar, M., 2025. Application of machine learning algorithms in groundwater level prediction in the Ardabil aquifer. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. [In persian]
- Jani, R., 2020. Cluster Modeling of Groundwater Level of Tabriz Plain Using ARIMA Model. *Hydrogeology*, 4(2), 74-91. [In persian]
- Jenkins, G.M., & Box, G.E.P., 1976. *Time series analysis: forecasting and control*. (No Title).

Salas, J.D., Delleur J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L., 1997. Applied Modeling of hydrologic time series. Water Resources Publication. Fourth Edition.

Tavosi, T. and delara, G., 2010. Climate Classification of Ardebil Province. Nivar, 34(71-70), 47-52. [In persian]

Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21(5), 821–833.

Van Loon, A.F., Van Huijgevoort, M.H.J., Van Lanen, H.A.J., 2012. Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences, 16(11), 4057–4078.

Wang, J., Rong, G., Li, K., Zhang, J., 2021. Analysis of drought characteristics in northern Shaanxi based on copula function. Water (Switzerland), 13(11), 20734441.

Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. Water Resources Management, 21(5), 763–774.

Xu, D., Zhang, Q., Ding, Y., Huang, H., 2020. Application of a hybrid ARIMA–SVR model based on the SPI for the forecast of drought—a case study in Henan Province, China. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 59(7), 1239–1259.

Yan, H., Moradkhani, H., & Zarekarizi, M. 2017. A probabilistic drought forecasting framework: A combined dynamical and statistical approach. Journal of Hydrology, 548, 291–304.

Yuan, M., Gan, G., Bu, J., Su, Y., Ma, H., Liu, X., Zhang, Y., Gao, Y., 2025. A new multivariate composite drought index considering the lag time and the cumulative effects of drought. Journal of Hydrology, 132757.

Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M., Khosroshahi, M., 2020. Spatiotemporal variations of groundwater drought indices, Case study: Zohreh- Jarrahi watershed. Hydrogeology, 4(2), 108-130. [In persian]

بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و شرب‌پذیری چشمه‌های شهری سنندج به عنوان منابع جایگزین در شرایط بحران آبی

مهدی کرد^{۱*}، هاله رستمی^۲، محمدپیام محمودی^۳

۱- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته زمین شیمی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: m.kord@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

چکیده

شهر سنندج به سبب تغییرات توپوگرافی و شرایط خاص زمین‌شناسی دارای چشمه‌های متعددی در محدوده مسکونی خود است. در سال‌های اخیر، کاهش کیفیت آب شهری، مردم ساکن شهر سنندج و مناطق منفصل شهری را وادار کرده که برای تأمین آب شرب خود به این چشمه‌ها مراجعه کنند. با وجود شدیدتر شدن مراجعات در زمان پاندمی کرونا، تا کنون بررسی جامعی بر روی کیفیت آب این چشمه‌ها از لحاظ فیزیکیوشیمیایی و میکروبی انجام نشده است. این مطالعه با هدف ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و کیفیت چشمه‌های شهر سنندج انجام شده است. بدین‌منظور پس از شناسایی چشمه‌های محدوده شهری سنندج، از ۲۶ چشمه در اوایل پاییز ۱۴۰۲ نمونه‌برداری انجام شد. پارامترهای فیزیکیوشیمیایی صحرایی با دستگاه مولتی‌فانکشن، یون‌های اصلی با استفاده از تیتراسیون، فلیم‌فوتومتر و اسپکتروفوتومتر، ۷۰ عنصر جزئی با استفاده از ICP-MS آنالیز شدند و از کشت میکروبی برای اندازه‌گیری کلیفرم کل استفاده گردید. داده‌ها با روش‌های آماری، گرافیکی و تطبیق با استانداردهای کیفی تحلیل شدند. باتوجه به نتایج بدست آمده، هیچ کدام از چشمه‌ها دارای آلودگی عناصر سنگین نبودند. اگرچه برخی از چشمه‌ها از کیفیت مطلوبی برخوردارند، اما تعدادی دیگر به دلیل تأثیرات زمین‌شناسی و به‌ویژه فعالیت‌های انسانی، دارای کیفیت پایین و آلودگی هستند. مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت، شامل غلظت بالای بی‌کربنات، افزایش هدایت الکتریکی (EC) فراتر از استانداردهای شرب و همچنین آلودگی میکروبی در شماری از چشمه‌ها بوده‌اند که در برخی موارد با افزایش مقدار کلر نیز همراه بوده است. بالا بودن میزان نیتрат و سولفات در چشمه‌های واقع در مناطق مسکونی تأثیرپذیری چشمه‌ها را از فاضلاب شهری تایید کرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی میکروبی، چشمه‌های سنندج، کیفیت آب، مناطق مسکونی، هیدروژئوشیمی.

مقدمه

کارآمد برای مصارف مختلف در یک کشور می‌باشد (Mishra and Singh, 2010; Tallaksen and Lanen, 2023). در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه بررسی کیفیت منابع آبی، به‌ویژه چشمه‌ها، در مناطق مختلف جهان انجام شده است. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده تأثیرات متنوعی از جمله فعالیت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی و ویژگی‌های زمین‌شناسی بر کیفیت آب می‌باشند.

در سال‌های اخیر پژوهش‌ها بر روی چشمه‌های طبیعی افزایش یافته است چراکه چشمه‌ها را می‌توان به‌عنوان منابع تأمین آب قابل ملاحظه‌ای، در نظر گرفت و با توجه به کیفیت آن‌ها در مصارف گوناگون اعم از شرب، آبیاری و یا صنعت مورد استفاده قرار داد (Aksever, 2019). آگاهی از منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل نبود و یا کم‌بودن میزان بارش در دوره‌های طولانی، پیش‌نیاز برنامه‌ریزی‌های مؤثر و

Aksever, (2019) به منظور بررسی مشخصات هیدروژئوشیمیایی و ارزیابی کیفیت آب چشمه‌های امیرداگ ترکیه از چشمه‌های این منطقه ۱۰ نمونه جمع‌آوری و از روش‌های گرافیکی برای تحلیل آن‌ها استفاده کرده است. نتایج آن مطالعه نشان داد که خصوصیات کانی‌شناسی منطقه ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها را کنترل می‌کند که ناشی از وجود رخنمون سنگ‌های آهک و دولومیت دوران مزوزوئیک است و علت بالا بودن نیترات در برخی از چشمه‌ها را به مصرف بیش از حد کود در مزارع آن منطقه مرتبط دانسته است.

در پژوهشی دیگر که برای مطالعات کیفی و کاربری چشمه‌های واقع در حوضه باسنتر جاموهیمالیا در هند انجام شده است، ۶۰ نمونه آب چشمه از سه نوع زمین (کوهستانی، تپه‌ای و دشتی) مورد بررسی قرار گرفته است (Taloor et al., 2020). نتایج آن‌ها حاکی از آن بوده است که شیمی چشمه‌ها در درجه اول توسط برهم‌کنش آب و سنگ کنترل می‌شود. نتایج بررسی کیفی آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون استان خوزستان نیز به خوبی تأثیر انحلال، تبادل کاتیونی و به طور کلی تبادل شیمیایی بین واحدهای سنگی و آب زیرزمینی در این آبخوان‌ها را نشان می‌دهد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۳). حبیبی‌نیا و همکاران (۱۴۰۰) نیز تأثیرپذیری کیفیت آبخوان از سازندهای کربناتی شهبازان و مارنی امیران و کشکان را عامل اصلی تعیین خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی در دشت شیان استان کرمانشاه معرفی کردند که از فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی نیز متأثر شده‌اند.

چشمه‌ها به واسطه تخلیه مداوم و همچنین در دسترس بودن، یکی از گزینه‌های مناسب برای نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی هستند. در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی دو حوضه آبریز کرانه باختری فلسطین انجام شده است، از ۵۰ چشمه موجود در منطقه نمونه‌برداری صورت گرفته و خواص فیزیکوشیمیایی و میکروبی آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است (Ghanem et al., 2021). نتایج این بررسی حاکی از پایین بودن غلظت عناصر سنگین، با وجود

در مطالعه‌ای که به بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه مرتفع کوهستانی همدان پرداخته شده، نتایج نشان‌دهنده دو گروه اصلی چشمه‌ها با ویژگی‌های متفاوت در غلظت یون‌ها و TDS بوده است. در این تحقیق، ۵۰ چشمه مورد بررسی قرار گرفت و از روش تجزیه عاملی برای تحلیل داده‌ها استفاده شد (Jalali and Jalali, 2016). نتایج این مطالعه نشان داد که چهار عامل اصلی بر شیمی آب تأثیرگذار هستند که هر یک با ترکیبات شیمیایی خاصی همبستگی دارند.

با افزایش جمعیت، هرروزه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر روی منابع آب بیشتر می‌شود. در مطالعات (Malki et al., 2017) که تأثیر فعالیت‌های کشاورزی را بر کیفیت آبخوان چتوکا در جنوب غربی موروکا، مورد بررسی قرار داده‌اند، بیان می‌دارند که حتی نوع آبیاری بر میزان نیترات آب زیرزمینی تأثیرگذار است. همچنین مطالعات تغییرات هیدرووشیمیایی و کیفیت آبخوان جیانگان چین در بخش میانی رودخانه یانگ تسه که به منظور تعیین منبع آلودگی این آبخوان انجام شده است، حاکی از آنست که کودهای کشاورزی و در برخی از نمونه‌ها مواد شیمیایی صنعتی عامل آلودگی بوده‌اند (Niu et al., 2017).

نفوذ فاضلاب به آب‌های زیرزمینی هم معطلی دیگر است که متأثر از فعالیت‌های انسان‌زاد است و سبب آلودگی آب‌های زیر زمینی شده است. کلانتری و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از بررسی منشأ نیترات، نقش فعالیت‌های انسان‌زاد در منابع آب زیرزمینی بهبهان در استان خوزستان را مطالعه کردند.

در پژوهشی دیگر که توسط Barakat et al., (2018) انجام گرفت، آب چشمه‌های موجود در پیدمونت بنی ملال اطلس (مراکش) از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی برای تأمین آب شرب مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. آنالیزهای میکروبی، آلودگی چشمه‌ها را در زمان‌های مختلف با کلیفرم کل و ایکلاوی و اینتروکوکسی نشان داده‌اند. نتایج آن‌ها تأکید دارد که این منابع تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند فاضلاب، جنگل‌زدایی، فعالیت‌های کشاورزی، دفع زباله و منابع آلودگی غیرنقطه‌ای می‌باشند.

نهادند است که در پهنه سنج-سیرجان قرار دارد. مطالعات هیدروژئوشیمیایی، ایزوتوپی و میدانی، درجه توسعه کارست، نحوه تغذیه و سنگ مخزن آن را مشخص کرده است (کیانی و همکاران، ۱۴۰۰). این تحقیقات مجموعاً نشان‌دهنده اهمیت بررسی کیفیت چشمه‌ها و تأثیرات متعدد ناشی از عوامل طبیعی و انسانی بر آن‌ها است.

شهر سنج شهر کوهستانی با میانگین بارش سالیانه ۴۹۲ میلی‌متر است (احمدی و کمانگر، ۱۴۰۲). اما در سال‌های اخیر با بحران بی‌آبی روبه‌رو شده و علاوه بر قطعی‌های مکرر آب شهری در فصول گرم سال، کاهش شدید کیفیت آب شهری، مردم ساکن شهر سنج و مناطق منفصل شهری را وادار کرده که روزانه برای تأمین آب شرب خود به چشمه‌های واقع در محدوده شهری مراجعه کرده و ساعت‌ها در صف‌های طولانی وقت بگذرانند (شکل ۱). بین سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ که پاندمی کرونا رخ داد، این موضوع شدیدتر شد. مصرف عمومی از چشمه‌های شهر سنج در حالی است که بررسی جامعی بر روی کیفیت آب این چشمه‌ها از لحاظ فیزیکیوشیمیایی و میکروبی انجام نشده است. از آن‌جا که این مسئله با سلامت عمومی مردم در ارتباط مستقیم است، ضرورت بررسی آن‌را صدچندان می‌کند. این مطالعه با هدف بررسی کیفیت و ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های محدوده شهر سنج انجام شده است.

از دیگر دلایلی که مردم را به استفاده از آب چشمه‌ها و داشته است کیفیت بسیار پایین آب شهری و احساس نارضایتی مردم از طعم و بوی آن در سالیان اخیر است تا جایی که مردم شهر سنج آب چشمه‌ها را به‌عنوان منبعی جایگزین برای آب شرب مورد استفاده قرار می‌دهند.

با گذشت زمان و گسترش منطقه مسکونی، تعدادی از چشمه‌های موجود در محدوده شهری قرار گرفته‌اند و در اطراف برخی از این چشمه‌ها، منازل مسکونی زیادی ساخته شده است (شکل ۲). از این‌رو علاوه بر تأثیرات طبیعی و زمین‌شناسی، فعالیت انسانی و شهرنشینی کیفیت این چشمه‌ها را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهند. این تأثیرات از آلودگی هوا تا گردشگری و دفع پسماند و غیره را شامل می‌شود.

آلودگی کلیفرم مدفوعی و کل بالا، در بیشتر نمونه‌ها است که اغلب در مناطق پرجمعیت قرار گرفته‌اند.

در ایران نیز مطالعات متنوعی بر روی چشمه‌ها انجام شده است. ابراهیمی محمدی (۱۳۹۶) ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و کیفیت آب ۷ چشمه و ۱۵ چاه محدوده دریایچه زریوار را براساس ۱۵ متغیر کیفیت آب طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ مورد بررسی قرار داده است. نتایج به‌دست آمده آن‌ها از روش‌های گرافیکی و نسبت‌های یونی مختلف، نشان می‌دهد که میزان سختی آب همه نمونه‌ها بیشتر از ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر بوده و برای شرب نامطلوب بوده‌اند.

در پژوهشی دیگر، طالبی و همکارانش (۱۳۹۶) از روش‌های گرافیکی و شاخص کیفی آب برای ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی و کشاورزی ۱۵ چشمه منطقه شمال دشت قزوین استفاده کرده‌اند. این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های گرافیکی، مشخصات کیفی را با جزئیات بیشتری نسبت به استفاده از شاخص کیفی نشان می‌دهند.

سلطانی و اصغری مقدم (۱۴۰۰) نیز به‌منظور بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد با روش‌های آماری چند متغیره، از ۳۳ چشمه و چاه نمونه‌برداری کرده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده است که افزایش تحرک و یا جذب برخی از فلزات سنگین در آبخوان متأثر از دیگر پارامترهای کیفی است.

در پژوهشی که بر روی حوضه آبریز گاماسیاب استان کرمانشاه با هدف رده‌بندی کیفی منابع آبی این حوضه برای مصارف شرب و کشاورزی انجام شده، پارامترهای SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , TDS, EC, pH ایستگاه از سال ۱۳۵۸-۱۳۹۷ و ۵ حلقه چاه مورد ارزیابی قرار گرفته‌است (جعفری و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج آن‌ها براساس شاخص‌های WQI و GWQI نشان‌دهنده کیفیت عالی آب‌های سطحی و زیرزمینی بوده است. در حالی که نمودارهای کیفی با جزئیات بیشتری خصوصیات کیفی آب را از لحاظ شرب و کشاورزی، مشخص کرده‌اند.

از دیگر مطالعات انجام‌شده بررسی هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های کارستی ملوسان و باروداب شهرستان

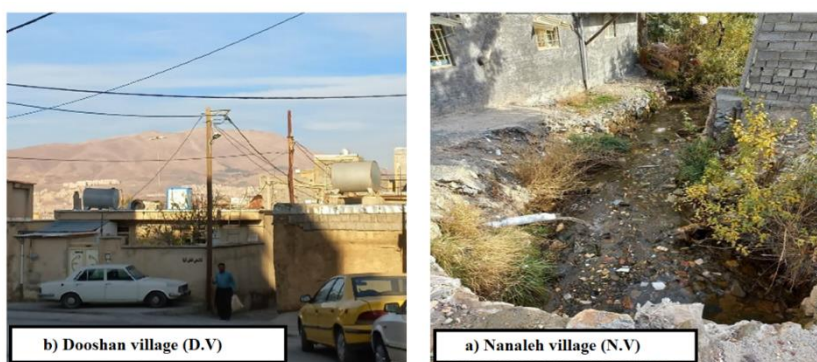
هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های محدوده شهر سنندج کیفیت آن‌ها برای شرب و کشاورزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از آن‌جا که این موضوع با سلامت عمومی مردم این منطقه و حتی گردشگران ارتباط دارد، بررسی کیفی آن‌ها را لازم و ضروری می‌کند.

باتوجه به دلایل ذکر شده و استفاده روزافزون مردم شهر سنندج از این چشمه‌ها و عدم آگاهی از وضعیت بهداشتی و مطلوب بودن آن‌ها برای مصرف، انجام این مطالعه دارای اهمیت ویژه‌ای است چرا که در صورت آلوده بودن این منابع، سلامت عمومی جامعه شهری مورد تهدید قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است با وجود چنین شرایطی تاکنون مطالعه کامل هیدروژئوشیمیایی در خصوص ارزیابی کیفیت آب چشمه‌های سنندج انجام نشده و تنها به نمونه‌برداری مقطعی برای بررسی آلودگی میکروبی و برخی از عناصر اصلی چشمه‌ها توسط معاونت بهداشتی دانشگاه علوم پزشکی کردستان اکتفا شده است. در این مطالعه سعی بر آن است تا ضمن بررسی



شکل ۱- استفاده مردم از چشمه‌های محدود شهر سنندج جهت تأمین آب شرب (a) چشمه ساتیله، (b) چشمه دگایران، (c) کانی سنگ شکن، (d) چشمه کمیز، (e) چشمه تفتقان، (f) چشمه آساوله.

Figure 1- Public utilization of limited springs in Sanandaj for drinking water supply: a) Satelah Spring, b) Degayran Spring, c) Kani Sang-shekan Spring, d) Kamez Spring, e) Tagtaqan Spring, f) Asavlah Spring.



شکل ۲- (a) تخلیه فاضلاب خانگی در فاصله چند متری از چشمه ننه، (b) استفاده مردم از تانکر بر روی پشت بام خانه‌ها به منظور ذخیره آب (روستای دوشان).

Figure 2- a) Release of domestic wastewater a few meters from Nenaleh Spring, b) Public use of rooftop water tanks for water storage (Dooshan Village).

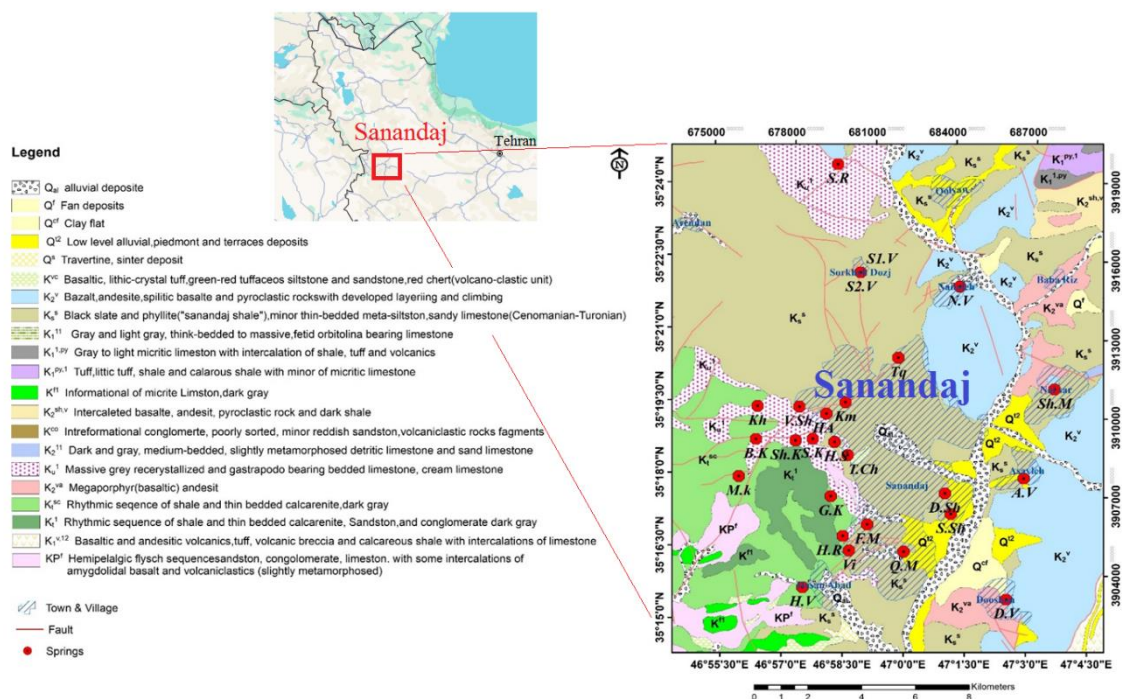
گستره مورد مطالعه شهر سنندج و نواحی اطراف آن است که بین طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 55' 46''$ تا $30^{\circ} 44' 47''$

مواد و روش‌ها
منطقه مطالعاتی

از لحاظ زمین‌شناسی ساختاری گستره مورد مطالعه در زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است. واحدهای سنگ چینه‌ای گستره مورد نظر عمدتاً مربوط به کرتاسه بالایی بوده و علاوه بر آن‌ها رسوبات آبرفتی کواترنری در منطقه دیده می‌شود. واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه بیشتر از شیل، سنگ آهک، فیلیت، اسلیت، ماسه‌سنگ، سنگ‌های ولکانیک با جنس آندزیت، بازالت و توف تشکیل شده‌اند (شکل ۳). همچنین رسوبات کواترنری و تراس‌های آبرفتی در محدوده مورد مطالعه گسترش دارند.

شرقی و عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ} 15' 00''$ تا $35^{\circ} 25' 00''$ شمالی واقع شده است.

شهر سنندج با جمعیت حدود ۵۰۰ هزار نفر و ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا، مرکز استان کردستان می‌باشد. این شهر در گذشته با نام «سنه» شناخته شده و هم‌اکنون نیز در بین مردم محلی با همین نام معروف است. این شهر از لحاظ آب‌وهوایی دارای اقلیم گرم و معتدل است و از نظر دمایی دارای میانگین دمای سالانه $12/8$ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه ۴۹۲ میلی‌متر است (احمدی و کمانگر، ۱۴۰۲).



شکل ۳- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ تیزتیز و سنندج) و محل چشمه‌ها.

Figure 3- Location and geological map of the area (derived from the 1:100,000 geological map of Tizh-Tizh and Sanandaj) and the location of the springs.

ابتدای پاییز سال ۱۴۰۲ از ۲۶ چشمه شناسایی شده نمونه‌برداری صورت گرفت.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری عناصر

برای نمونه‌برداری از هرچشمه ۲ بطری یک‌لیتری برای اندازه‌گیری کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی و ۲ بطری نیم‌لیتری برای آنالیز میکروبی و عناصر جزئی، تهیه شد. ظروف نمونه‌برداری قبل از اقدام به نمونه‌برداری از لحاظ نبود آلودگی بررسی شد و همچنین به منظور اطمینان بیشتر هنگام نمونه‌برداری ظروف با آب چشمه مورد ارزیابی چند مرتبه شست‌وشو داده شدند. پس از پر کردن ظروف نمونه‌برداری،

در پژوهش حاضر که به منظور ارزیابی کیفیت آب ۲۶ چشمه سطح شهر سنندج از لحاظ هیدروژئوشیمیایی و میکروبی صورت گرفته است، در وهله اول بوسیله تحقیقات میدانی و پرس‌وجو از مردم بومی شهر سنندج، لیستی از چشمه‌های محدوده مسکونی که مورد استفاده عمومی قرار دارند، تهیه شد (جدول ۱).

نمونه‌برداری کیفی چشمه‌ها معمولاً در فصل تر و فصل خشک انجام می‌شود. باتوجه به اینکه کیفیت آب چشمه‌ها در فصل خشک در پایین‌ترین حد کیفیت خود قرار دارد در نتیجه معیار خوبی برای تعیین کیفیت آب چشمه‌ها خواهد بود. بنابراین در

Microsoft و Phreeqc, Hydrogeochem, Google earth office را ذکر کرد.

یکی از موضوعات مربوط به آلودگی آب‌های زیرزمینی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است بررسی وجود عناصر جزئی است. در استفاده از روش‌های گرافیکی، عناصر جزئی به کار برده نمی‌شوند و این دیاگرام‌ها صرفاً از عناصر اصلی استفاده می‌کنند. در این میان عناصر فلزی جزئی که حد مجاز آن‌ها در استاندارد آب آشامیدنی آمده است مانند Ag, Cd, Cu, Hg, Fe, Mn, Zn از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (اصغری مقدم، ۱۳۹۸).

در جدول ۲ بالاترین حد مجاز (MCL^1) برخی از مهم‌ترین عناصر سنگین تأثیرگذار بر سلامت، براساس استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USA)، سازمان بهداشت جهانی (WHO)، اتحادیه اروپا (EU) و سازمان استاندارد ایران (ISIRI) برای آب شرب، ارائه شده است.

باکتری‌های کلیفرم معمولاً به‌عنوان شاخص کیفیت بهداشتی بودن آب و غذا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع ویژگی‌های کلیفرم باعث شده است که از آن‌ها به‌عنوان شاخص آلوده بودن آب استفاده شود. کشت این باکتری‌ها ساده است و مانند برخی انواع دیگر پیچیده و دشوار نیست. از طرف دیگر کمتر بیماری‌زا هستند و از همه مهم‌تر به‌سادگی در همه جا پخش می‌شوند و حضور دارند این ویژگی‌ها و به‌ویژه مورد آخر، باعث شده است در حوزه سنجش سلامت از آن‌ها به‌عنوان شاخص میکروارگانیسم‌ها استفاده نمایند. به‌این معنا که اگر در آزمایش مشخص شود که آب حاوی کلیفرم نیست، باتوجه به آسان بودن پراکندگی آن‌ها، می‌توان اطمینان داشت که احتمالاً دیگر انواع میکروب‌ها، مخصوصاً انواع بیماری‌زا در آب وجود ندارند. کلیفرم‌ها به ۲ دسته کلیفرم کل^۲ و کلیفرم مدفوعی تقسیم می‌شوند. واحد بیان کلیفرم تعداد باکتری‌ها در ۱۰۰ میلی‌لیتر می‌باشد.

برای جلوگیری از رسوب کاتیون‌های موجود در آب چند قطره اسیدنیتريك غلیظ به ظروف کاتیون‌ها و عناصر جزئی اضافه شد (شکل ۴).

از آن‌جا که پارامترهای دما (T)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO) و پتانسیل اکسیداسیون و احیاء (Eh) با تغییرات دما و تحت شرایط محیطی دچار تغییر می‌شوند، این پارامترها با استفاده از دستگاه مولتی‌فانکشن در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های تهیه‌شده مربوط به آنالیز میکروبی به آزمایشگاه آریاشیمی شریف واقع در کرج و نمونه‌های مربوط به آنالیز عناصر جزئی برای اندازه‌گیری فلزات سنگین به شرکت آزمون سلامت آسا در تهران ارسال گردید که روش اندازه‌گیری عناصر جزئی، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) بوده است. کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی نیز در آزمایشگاه هیدروژئوشیمی دانشگاه کردستان آنالیز شدند. کاتیون‌های Na^+ و K^+ با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر و آنیون‌های SO_4^{2-} و NO_3^- توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد ارزیابی قرار گرفتند. آنیون‌های Cl^- ، HCO_3^- ، CO_3^{2-} و کاتیون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} به روش تیتراسیون آنالیز شدند. برای اطمینان از صحت آنالیزهای هیدروشیمیایی علاوه بر تکرار آزمایشات و نیز ارسال نمونه‌های تکراری، خطای بالانس یونی (CB) از رابطه ۱ تعیین گردید.

$$CB = \left| \frac{\sum cat - \sum an}{\sum cat + \sum an} \right| \times 100 \quad (1)$$

که در آن، غلظت کاتیون‌ها (cat) و آنیون‌ها (an) برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) می‌باشند. درصد خطای قابل‌قبول بالانس یونی ۵ است و تا ۱۰ نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Mazor, 1991).

در این پژوهش نرم‌افزارها و روش‌های متعددی جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله نرم‌افزارهای مورد استفاده می‌توان نرم‌افزارهای Arc GIS،

² Total coliform

¹Maximum Contamination Level

جدول ۱- موقعیت و مختصات محل‌های نمونه‌برداری براساس UTM.

Table 1- Location and coordinates of sampling points based on UTM.

Sample	Location	UTMX	UTMY	Elevation (m)
1 Q.M	Qaradian Mosque	682008	3904940	1443
2 Vi	Vila Shahr	679969	3904990	1589
3 F.M	Farooogh Azam Mosque	680651	3905981	1565
4 H.R	Hasan Abad Road	679742	3905544	1672
5 H.V	Hasan Abad Village	678886	3904218	1610
6 T.Ch	Takyeh va Chaman	679925	3908628	1619
7 H.S	Hijab Square	679436	3909133	1638
8 V.Sh	Vahdat Town	678126	3910479	1664
9 HA	Haji Abad	679132	3910217	1608
10 Km	Kamez	679843	3910649	1562
11 S.Sh	Saheli Town	683768	3906378	1424
12 D.Sh	Degayran Town	683548	3907166	1538
13 D.V	Dooshan Village	685826	3903115	1470
14 A.V	Asavlah Village	686483	3907738	1464
15 Sh.M	Shaikh Rash Mosque	687633	3911137	1474
16 N.V	Nannaleh Village	684102	3915069	1472
17 S.R	Satelah	679570	3919747	1578
18 S1.V	Sorkkeh Dezaj Village 1	680409	3915612	1563
19 S2.V	Sorkkeh Dezaj Village 2	680409	3915612	1563
20 Tq	Taghtaghan	681812	3912352	1587
21 Kh	Khezre Zende Spring	676566	3910510	1963
22 S.K	Sang Shekan Spring	678621	3909256	1812
23 Sh.K	Shafah Spring	677985	3909194	1912
24 M.K	Mamatkeh Spring	675865	3907830	2178
25 G.K	Gweza Kwer Spring	679294	3907064	1814
26 B.K	Banta Spring	676503	3909239	2000



شکل ۴- نمونه‌برداری از چشمه‌های مورد مطالعه، (a) مسجد قرادیان، (b) چشمه خضر زنده، (c) چشمه ویلا شهر، (d) جاده حسن آباد، (e) مسجد شیخ رش و (f) شهرک ساحلی.

Figure 4- Sampling from the studied springs: a) Qaradian Mosque, b) Khezre Zende Spring, c) Vila Shahr Spring, d) Hasan Abad Road, e) Shaikh Rash Mosque, and f) Saheli Town.

جدول ۲- استاندارد آب آشامیدنی.

Table 2- Drinking water standards.

Parameter	Unit	USA (MCL)	WHO (MCL)	EU (MCL)	ISIRI (MCL)
Arsenic As	ppm	0.05	0.01	0.01	0.01
Antimony An	ppm	0.01	0.02	0.01	0.02
Barium Ba	ppm	2	0.7		0.7
Boron B	ppm		0.5	1	0.5
Cadmium Cd	ppm	0.01	0.004	0.05	
Chromium Cr	ppm	0.05	0.05	0.05	0.05
Copper Cu	ppm	1	2	2	
Cyanide CN	ppm	0.05	0.07	0.05	0.07
Fluoride F	ppm	2	1.5	1.5	
Iron Fe	ppm	0.3	0.3	0.2	
Lead Pb	ppm	0.05	0.01	0.05	0.01
Manganese Mn	ppm	0.05	0.4	0.05	
Mercury Hg	ppm	0.002	0.006	0.001	0.006
Molybdenum Mo	ppm		0.07		0.07
Nickel Ni	ppm	0.1	0.07	0.05	0.07
Selenium Se	ppm	0.01	0.01	0.01	0.01
Silver Ag	ppm	0.05	0.1	0.01	
Phosphorus P	ppm			2000	
Uranium U	ppm		0.015		
Zinc Zn	ppm	5		0.1	

نتایج و بحث

ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های نمونه‌برداری شده

آنالیزهای شیمیایی برای یون‌های اصلی و نیترات بلافاصله بعد از نمونه‌برداری در آزمایشگاه هیدروژئوشیمی دانشگاه کردستان اندازه‌گیری شدند. در جدول ۳ خلاصه آماری مرتبط با پارامترهای فیزیکیوشیمیایی اندازه‌گیری شده در صحرا و آزمایشگاه ارائه شده است.

پارامترهای دما (T)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO) و پتانسیل اکسیداسیون و احیاء (Eh) نمونه‌ها در محل چشمه‌ها و همچنین نتایج حاصل از

جدول ۳- خلاصه آماری پارامترهای فیزیکیوشیمیایی اندازه‌گیری شده در چشمه‌ها.

Table 3- Statistical summary of physicochemical parameters measured in springs.

Parameter	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	Variance	Kurtosis	Skewness	WHO (MCL)	ISIRI (MCL)
pH	-	7	8.19	7.600	0.251	0.063	0.545	-0.030	6.5- 8.5	6.5- 9.2
h	m	1424	2178	1641.62	189.723	35994.8	1.184	1.28		
T	°C	11.6	20.8	16.188	2.439	5.948	-0.660	-0.387		
Eh	mv	-154	-41	-75.42	20.30	412.01	7.91	-2.14		
EC	μs/s	251	1113	488.154	199.027	39611.899	2.413	1.405		
DO	mg/L	13	35	21.985	4.915	24.159	0.737	0.378		
Th	mg/L	166.141	464.789	269.986	79.568	6330.991	-0.299	0.714		500
TDS	mg/L	160.64	712.32	312.418	127.378	16225.034	2.413	1.405	1000	1500
Ca ²⁺	mg/L	59.060	169.860	91.321	26.233	688.156	1.380	1.122	300	200
Mg ²⁺	mg/L	4.230	21.730	10.167	5.391	29.060	-0.331	0.859	30	150
Na ⁺	mg/L	2.854	140.650	15.031	26.039	678.012	22.099	4.555	200	200
K ⁺	mg/L	0.471	2.345	0.807	0.356	0.126	13.279	3.268	400	
Cl ⁻	mg/L	1.772	260.557	31.564	48.260	2329.004	20.488	4.342	250	400
SO ₄ ²⁻	mg/L	10.424	184.523	64.150	48.658	2367.628	0.456	1.139	500	400
HCO ₃ ⁻	mg/L	134.200	441.640	239.214	68.869	4742.950	1.263	0.964	300	
NO ₃ ⁻	mg/L	0.000	32.265	8.162	11.130	123.881	-0.190	1.187	50	45

کانی گوئزه کویر ۲۵ (G.K) از لحاظ اسیدیته در بازه نسبتاً قلیایی قرار می‌گیرند و سایر نمونه‌ها دارای اسیدیته خنثی هستند. با این وجود براساس استانداردهای WHO و ۱۰۵۳

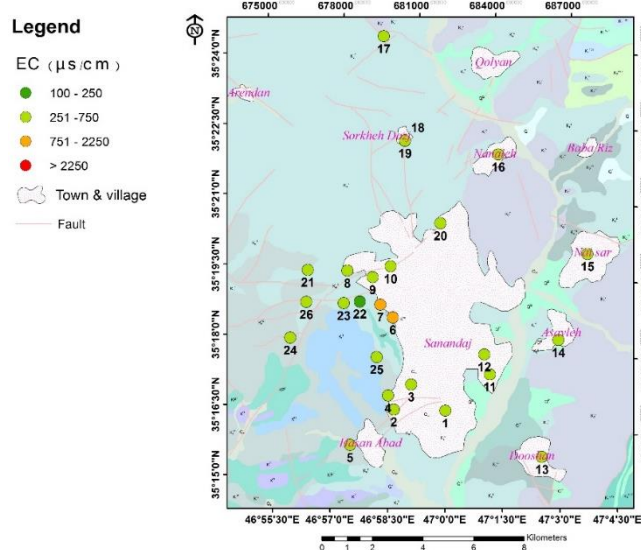
مقدار pH چشمه‌های نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه از ۷ تا ۸/۱۹ با میانگین ۷/۶ متغیر است و براساس داده‌ها تنها نمونه‌های مربوط به چشمه‌های کانی سنگ شکن ۲۲ (S.K) و

نزدیک بودن مسیر جریان آب زیرزمینی به سطح زمین در هر یک از این چشمه‌ها مربوط باشد.

هدایت الکتریکی آب یا (EC) برای نمونه‌های برداشت شده از ۲۵۱ تا ۱۱۱۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر بوده و میانگین EC نمونه‌ها برابر با ۴۸۸/۱۵ میکروموس بر سانتی‌متر است (شکل ۵). T.D.S محاسبه شده برای چشمه‌های نمونه‌برداری شده نیز محدوده ۱۶۰/۶۴ تا ۷۱۲/۳۲ را با میانگین ۳۱۲/۴۲ نشان می‌دهد که طبق استاندارد WHO و استاندارد ۱۰۵۳ ایران چشمه‌های شماره ۶ (T.ch) و شماره ۷ (H.S) در رده مجاز و مابقی در رده مطلوب قرار می‌گیرند.

ایران تمامی چشمه‌ها در محدوده اسیدیته مجاز و مطلوب قرار می‌گیرند. به دلیل قرار گرفتن واحدهای کربناته در بالادست و اطراف چشمه‌ها کانی سنگ‌شکن و کانی گویزه‌کوبر می‌توان علت مقدار اندک قلیایی بودن در آن‌ها را به وجود یون بی‌کربنات نسبت داد.

دمای ۲۶ نمونه آنالیز شده از ۱۱/۶ تا ۲۰/۸ درجه سانتی‌گراد و با میانگین ۱۶/۱۸ متغیر می‌باشد. با در نظر گرفتن ارتفاع و دمای هر چشمه می‌توان به این نتیجه رسید که ارتفاع و دمای چشمه‌ها هیچ ارتباطی با هم ندارند و این می‌تواند به مقدار



شکل ۵- نقشه میزان هدایت الکتریکی (EC) چشمه‌های نمونه‌برداری شده بر حسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر.

Figure 5- Map of electrical conductivity (EC) of sampled springs in $\mu\text{S}/\text{cm}$.

مقدار سختی کل نمونه‌های آنالیز شده از ۱۶۶/۱۴ تا ۴۶۴/۷۹ متغیر می‌باشد که میانگین TH برای نمونه‌ها برابر با ۲۶۹/۹۹ است. براساس استاندارد ۱۰۵۳ ایران سختی چشمه‌های مورد مطالعه در رده قابل قبول قرار داشتند.

مقدار سختی کل نمونه‌های آنالیز شده از ۱۶۶/۱۴ تا ۴۶۴/۷۹ متغیر می‌باشد که میانگین TH برای نمونه‌ها برابر با ۲۶۹/۹۹ است. براساس استاندارد ۱۰۵۳ ایران سختی چشمه‌های مورد مطالعه در رده قابل قبول قرار داشتند.

مقدار سختی کل نمونه‌های آنالیز شده از ۱۶۶/۱۴ تا ۴۶۴/۷۹ متغیر می‌باشد که میانگین TH برای نمونه‌ها برابر با ۲۶۹/۹۹ است. براساس استاندارد ۱۰۵۳ ایران سختی چشمه‌های مورد مطالعه در رده قابل قبول قرار داشتند.

غلظت و ترکیب املاح و یون‌های موجود در آب متأثر از عوامل متعددی است که در طول مسیر از محل تغذیه تا تخلیه بر آن تأثیر می‌گذارند. از جمله این عوامل می‌توان به عوامل زمین‌شناسی همچون نوع کانی‌ها، سازندها و لیتولوژی مسیر عبور آب و محل ظهور چشمه، عوامل آب‌وهوایی از قبیل کوهستانی یا کویری بودن ناحیه مورد مطالعه و عوامل هیدروژئولوژیکی چون مقدار مسافت طی‌شده اشاره نمود (اصغری مقدم، ۱۳۹۸). چشمه‌ها، نتیجه تمرکز یک یا چند

از آب این چشمه برای آبیاری فضای سبز واقع در نزدیکی چشمه استفاده می‌نماید. لازم به ذکر است که اکنون محل دپو نمک به جای دیگری انتقال یافته اما همچنان پس از گذشت ۱ سال، میزان شوری آب به حدی زیادی است که مناسب شرب نیست. شیخ الاسلامی و همکاران (۱۳۹۰) عنوان داشته‌اند که استفاده از نمک برای یخ‌زدایی معابر، معایب زیاد بلندمدتی را در پی دارد که می‌تواند به صورت گرد و غبار وارد هوا شده و باقی به صورت محلول وارد خاک و آب زیرزمینی شود و سبب اثرات منفی زیست محیطی شوند. نکته حائز اهمیت دیگری که مطرح است این است که با تغییر مکان محل دپو نمک، مکان مورد نظر به فضای سبز تبدیل شده و در جوار آن فضولات حیوانی به منظور استفاده به عنوان کود طبیعی دپو شده است (شکل ۶). با توجه به نفوذپذیری این منطقه و شور شدن چشمه پایین دست، آلودگی میکروبی چشمه در آینده بسیار بالا می‌رود هر چند که هم اکنون نیز نتایج آنالیز کلیفرم کل چشمه مورد نظر، آلودگی میکروبی را تأیید کرده است.

حد مجاز آنیون HCO_3^- در استاندارد WHO که ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر اعلام شده است و بررسی نمونه‌ها، چشمه‌های ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۷ (H.S)، ۱۶ (N.V)، ۱۸ (S.V) و ۱۹ (S.V) مقداری بیشتر از ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر و بالاتر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی را نشان می‌دهند. همچنین مقدار مجاز Cl^- طبق استاندارد WHO کمتر از ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده که میزان این آنیون در چشمه ۶ (T.Ch) بیشتری از آن است. باتوجه به اختلاف قابل ملاحظه غلظت کلر در چشمه مورد نظر با تمامی چشمه‌های مورد مطالعه، براساس تحقیقات میدانی مشخص شد که شهرداری در بالادست این چشمه، محلی را به عنوان دپو نمک برای یخ‌زدایی در فصول سرد سال در نظر گرفته است و احتمال آن داده شد که بر اثر انحلال نمک‌های سطحی دپو شده، میزان Cl^- این چشمه به صورت چشمگیری افزایش یافته است و مقدار بالاتری از حد مجاز استاندارد را نشان می‌دهد. میزان شوری این چشمه به حدی زیاد است که در طعم آن تأثیر گذاشته و مردم از آن برای مصارف آشامیدن استفاده نمی‌کنند ولی شهرداری منطقه



b) Koodak park



a) Takyeh va Chaman(T.Ch)

شکل ۶- (a) چشمه تکیه و چمن، (b) مکان دپو کود حیوانی.

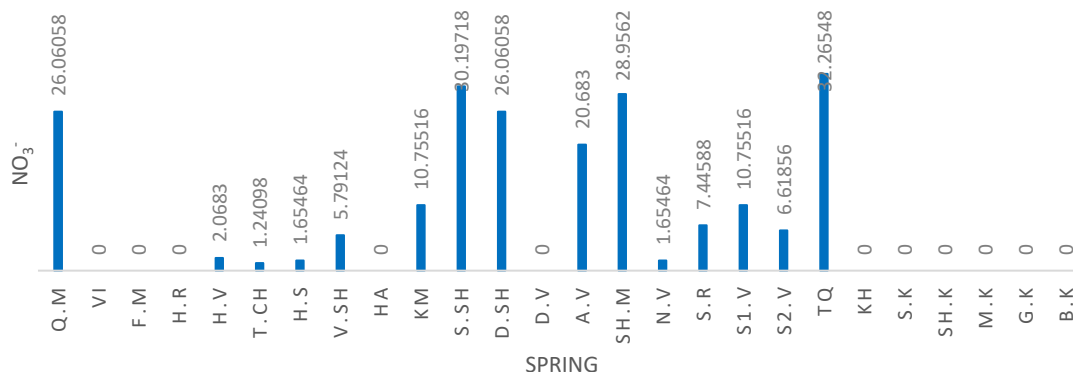
Figure 6- a) Takyeh va Chaman spring, b) Animal manure disposal site.

فاضلاب‌های شهری، کودهای کشاورزی و برخی اوقات کشت چمن‌زارها می‌باشد (Honslow, 2018). مقدار نیترات موجود در نمونه‌های آنالیز شده در شکل ۷ به نمایش درآمده است، که براین اساس ۳۰/۷۸٪ از نمونه‌ها دارای غلظت نیترات بالای ۱۰ mg/L هستند این نمونه‌ها شامل چشمه‌های شماره ۱ (M.Q)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۸ (S.Vi) و ۲۰ (Tg) می‌باشند. تمامی چشمه‌های ذکر شده به ترتیب در محلات و

از متداول‌ترین اشکال نیتروژن در آب‌های سطحی و زیرزمینی، نیترات است که در صورت وجود در آب سبب پایین آمدن کیفیت آب خواهند شد (تیموری و اسدی‌نیلوان، ۱۳۹۹). سرعت جذب آن توسط کانی‌های رسی پایین است و به راحتی در آبخوان به حرکت در می‌آید. به طور کلی می‌توان گفت تقریباً تمامی آب‌ها حاوی مقداری نیترات هستند اما غلظت mg/L ۱۰ یا بیشتر نشان‌دهنده آلوده شدن احتمالی آب توسط

رخنمون در یک مکان هستند اما سرچشمه‌های متفاوتی دارند و مسیر عبوری آن‌ها تا محل ظهور چشمه متفاوت است (شکل ۸). به همین دلیل میزان یون‌های آن از جمله نیترات و سایر مشخصات دیگر آن‌ها با یکدیگر متفاوت است.

مناطق مسکونی قرادیان (داخل مسجد)، کمیز، شهرک ساحلی، شهرک دگیان، روستای آساوله، روستای نایسر (داخل مسجد)، روستای سرخه‌دزج و محله تقشقان واقع شده‌اند که در بالادست چشمه‌ها منازل مسکونی ساخته شده است. چشمه‌های ۱۸ (S₁.V) و ۱۹ (S₂.V) با وجود اینکه دارای



شکل ۷- میزان نیترات در چشمه‌های نمونه‌برداری شده برحسب میلی گرم بر لیتر.

Figure 7- Nitrate concentration in sampled springs (mg/L).



شکل ۸- چشمه‌های سرخه دزج (سورازه).

Figure 8- Sorkheh Dezaj (Surazeh) springs.

کاتیون غالب به تیپ و رخساره‌های هیدروشیمیایی تقسیم می‌شوند. بر همین اساس آب‌های زیرزمینی در چهار تیپ بی‌کربنات، سولفات، کلراید و مخلوط رده‌بندی می‌شوند (اصغری مقدم، ۱۳۹۸). با توجه به کاتیون‌های اصلی آب‌های زیرزمینی به سه رخساره کلسیک، منزیک و سدیک (سدیم و پتاسیم) تقسیم می‌شوند. براساس تیپ و رخساره، چشمه‌های منطقه مورد مطالعه در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. گروه اول که اغلب چشمه‌ها را شامل می‌شود، دارای تیپ و رخساره بی‌کربنات کلسیک است. ۲۱ چشمه‌ای که در این گروه قرار دارند عبارتند از چشمه‌های ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵

براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی و استاندارد ۱۰۵۳ ایران حد مجاز برای آنیون NO₃⁻ به ترتیب ۵۰ و ۴۵ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است که براین اساس تمامی نمونه‌ها در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند.

منطقه آب و خاک با وجود ضخامت کم و اما فعال از نظر بیولوژیکی تأثیر چشم‌گیری در تغییر شیمی آب دارد. همچنین تعاملات آب و سنگ و فرآیندهای شیمیایی مابین آن‌ها بسته به نوع لیتولوژی در مسیر عبور آب از منطقه تغذیه تا تخلیه بر غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های آب تأثیرگذار است. آب‌های زیرزمینی با ماهیت ژئوشیمیایی متفاوت براساس آنیون و

به طوری که نمونه‌ها در سه مربع اول، چهارم و نهم قرار گرفته‌اند. مربع شماره ۹ نشان‌دهنده آب‌هایی با یون‌های غالب Na^+ و Cl^- است که در انتهای چرخه آب قرار دارند و نمونه شماره ۶ (T.ch) در این محدوده قرار گرفته است.

مربع شماره ۴ دارای آنیون غالب SO_4^{2-} و کاتیون غالب Ca^{+2} می‌باشد و می‌تواند نشان‌دهنده آب تغذیه شده در ته-نشست‌های گچی و یا لاواها باشد در غیر این صورت انحلال ساده آب را در مسیر نشان می‌دهد. علاوه بر آن نشت از فاضلاب و مواد شوینده هم می‌تواند مقدار سولفات را افزایش دهند. نمونه‌های ۱ (Q.M)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh) و ۱۲ (D.Sh) در این محدوده قرار می‌گیرند. نمونه‌های بیان شده دارای آنیون غالب بی‌کربنات می‌باشند ولی میزان سولفات بالایی نیز دارند.

مربع شماره ۱ آب‌هایی با یون‌های غالب HCO_3^- و Ca^{+2} را نشان می‌دهد و نشان دهنده آب‌های تغذیه شده به سفره‌های آهکی و ماسه‌سنگی و برخی سفره‌های دیگر می‌باشد. چشمه-های ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵ (H.V)، ۷ (H.S)، ۸ (V.Sh)، ۹ (HA)، ۱۳ (D.V)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۶ (N.V)، ۱۷ (S.R)، ۱۸ (S1.V)، ۱۹ (S2.V)، ۲۰ (Tq)، ۲۱ (Kh)، ۲۲ (S.K)، ۲۳ (Sh.K)، ۲۴ (M.K)، ۲۵ (G.K) و ۲۶ (B.K) در این محدوده قرار گرفته‌اند.

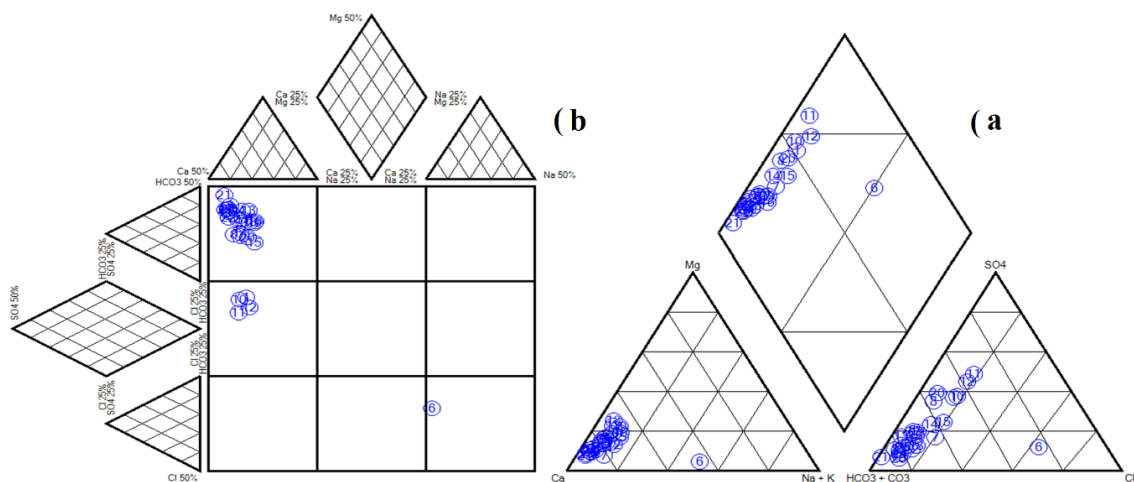
رخساره‌های هیدروشیمی اصطلاحی است که برای بیان تفاوت شیمیایی آب‌های زیرزمینی به کار می‌رود (Fetter, 2001). نمودار استیف برای به دست آوردن سریع رخساره‌های هیدروشیمیایی و همچنین تشخیص سنگ منشأ آب می‌تواند بسیار مفید و کاربردی باشد (Hounslow, 2018). نمودارهای استیف برای چشمه‌های نمونه‌برداری شده از سه الگو پیروی می‌کنند که در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

(H.V)، (H.S) ۷، (V.Sh) ۸، (HA) ۹، (D.V) ۱۳، (A.V) ۱۴، (Sh.M) ۱۵، (N.V) ۱۶، (S.R) ۱۷، (S1.V) ۱۸، (S2.V) ۱۹، (Tq) ۲۰، (Kh) ۲۱، (S.K) ۲۲، (Sh.K) ۲۳، (M.K) ۲۴، (G.K) ۲۵ و (B.K) ۲۶.

گروه دوم را چشمه‌های با ترکیب $\text{Ca-HCO}_3-\text{SO}_4$ و Ca- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ تشکیل می‌دهند که غلظت کلسیم و بی‌کربنات و سولفات در آن‌ها مقدار بالایی را نشان می‌دهد و شامل ۴ چشمه‌ی ۱ (Q.M)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh) می‌باشد.

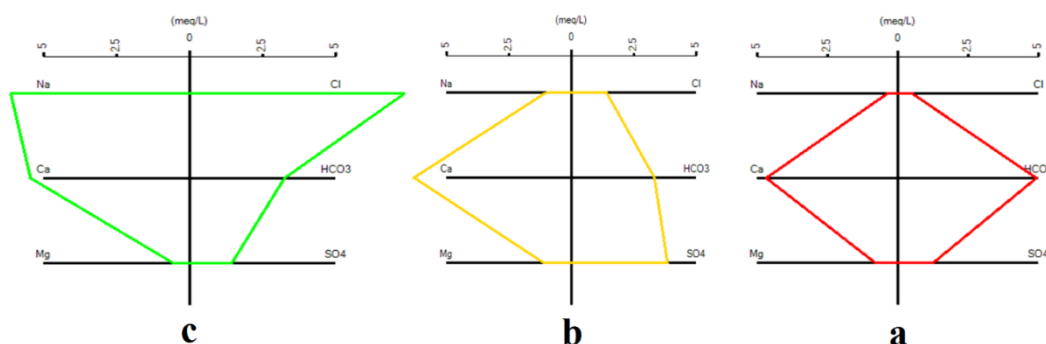
گروه سوم نیز دارای ترکیب Na-Cl یا کلرات سدیک است که تنها عضو این گروه را چشمه شماره ۶ (T.ch) تشکیل می‌دهد. باتوجه به نمودار پایپر (شکل ۹-الف) چشمه‌های ۱ (Q.M)، ۱۰ (Km)، ۱۲ (D.Sh) در محدوده آب‌های اختلاطی قرار گرفته و چشمه ۱۱ (S.Sh) با یون غالب SO_4^{2-} در بالاترین قسمت لوزی نمودار پایپر قرار می‌گیرد که براین اساس واکنش ژئوشیمیایی غالب برای این چشمه‌ها تبادل یونی معکوس است اما باید خاطر نشان کرد که این موضوع به علت غلظت بالای یون سولفات در آب این چشمه می‌باشد. به دلیل درز و شکافی بودن چشمه و قرارگیری آن در منطقه مسکونی علت بالای سولفات آن را می‌توان به نشت از فاضلاب مرتبط دانست. چشمه ۶ (T.ch) در گوشه سمت راست نمودار قرار گرفته که نشان‌دهنده انتهای چرخه آب بوده و آب‌های خیلی شور در این ناحیه قرار می‌گیرند. از آن‌جا که چشمه تکیه و چمن در دامنه آبیدر قرار دارد به محل تغذیه نزدیک است اما به دلیل دپوی نمک و کود حیوانی در مناطق بالادست، آب این چشمه تحت تأثیر قرار گرفته است. باقی چشمه‌ها در گوشه سمت چپ نمودار قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده نزدیک بودن این منابع به محل تغذیه است.

همانطور که در شکل ۹-ب قابل مشاهده است، نمودار دوروف نسبت به پایپر تفکیک کیفی بهتری از نمونه‌ها را ارائه داد



شکل ۹- نمودارهای (a) پایپر و (b) دوروف بسط داده شده چشمه های آنالیز شده منطقه مورد مطالعه.

Figure 9- Diagrams of analyzed springs in the study area: a) Piper diagram and b) Expanded Durov diagram.



شکل ۱۰- الگوهای حاصل از رسم نمودار استیف برای چشمه های شهر سنندج.

Figure 10- Patterns from Stiff diagram plotting for Sanandaj city springs.

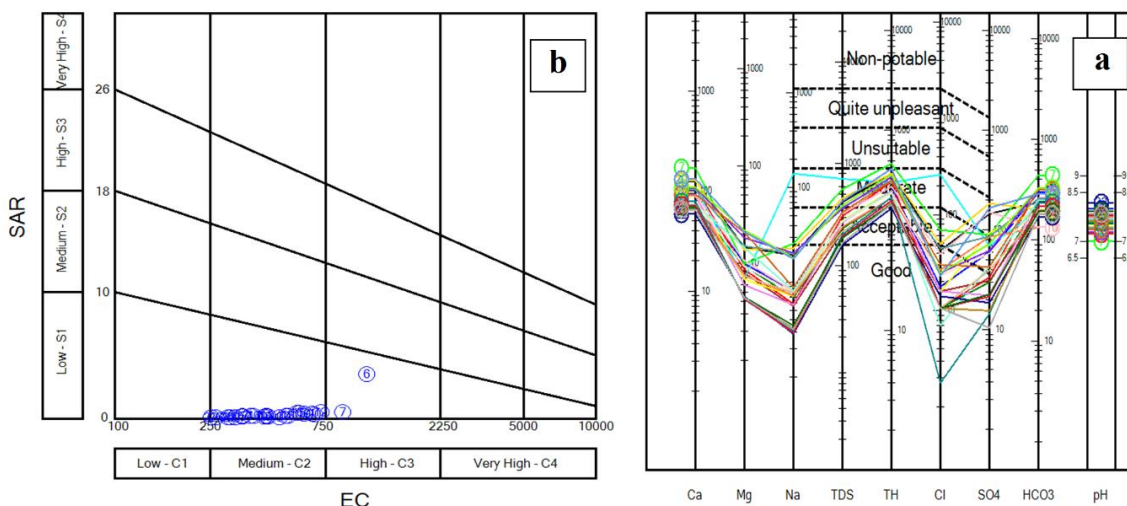
چشمه های ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵ (H.V)، ۷ (H.S)، ۸ (V.Sh)، ۹ (HA)، ۱۳ (D.V)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۶ (N.V)، ۱۷ (S.R)، ۱۸ (S1.V)، ۱۹ (S2.V)، ۲۱ (Kh)، ۲۲ (S.K)، ۲۳ (Sh.K)، ۲۴ (M.K)، ۲۵ (G.K) و ۲۶ (B.K) چشمه ۶ (T.ch) بر روی نمودار استیف نشان دهنده آبی با منشأ آب دریا است؛ اما با در نظر گرفتن لیتولوژی منطقه، نزدیک بودن به منطقه تغذیه و همچنین مقایسه میزان درصد یون های موجود در چشمه های اطراف چشمه ۶ (T.ch)، این میزان شوری را تنها می توان با احتمال نفوذ نمک دیو شده در بالادست چشمه مورد نظر توجیه کرد.

برای بررسی کاربری شرب علاوه بر استفاده از استانداردهای کیفی، از نمودار شولر هم استفاده می شود. همان گونه که در شکل ۱۱- الف نشان داده شده است چشمه میدان حجاب (H.S) با داشتن سختی بالا، از نظر شرب در محدوده نامناسب و سایر چشمه ها در رده قابل قبول تا معتدل و میانه قرار می گیرند. چشمه میدان حجاب در انتهای دره تفریحی قرار دارد که در پایین دست محل عبور آب های سطحی و فاضلاب مغازه ها و سرویس های بهداشتی قرار دارد.

چشمه های ۱ (Q.M)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh) و ۲۰ (Tq) نشان دهنده مقدار زیادی سولفات هستند. نمودار استیف سنگ منشاء آن ها شبیه به سنگ های کربناتی است که مقدار سولفات آن زیاد است. با توجه به لیتولوژی غالب منطقه که شیل و سنگ آهک است و همچنین قرار گرفتن چشمه ها در مناطق مسکونی نتیجه گرفته شد این میزان سولفات منشأ انسانی داشته و ناشی از نفوذ فاضلاب می باشد.

نمک‌های محلول در نمونه مشخص می‌گردد که می‌تواند بر روی رشد گیاهان تأثیرگذار باشد، ساختار خاک را برهم زند و نفوذپذیری خاک را کاهش دهد. SAR نسبت مقدار یون Na^+ به یونهای Ca^{+2} و Mg^{+2} را نشان می‌دهد. سدیم به دلیل کاهش نفوذپذیری و کاهش جریان آب در خاک نقش منفی را ایفا می‌کند و با جایگزین شدن به جای Ca^{+2} و Mg^{+2} ساختار خاک را برهم می‌زند و باعث پراکندگی ذرات رس می‌شود (Bouderbala and Gharbi, 2017).

نمودار USSSL نیز برای بررسی کیفی آب چشمه‌های سنندج از لحاظ کشاورزی رسم و در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. نمونه‌های شماره ۶ (T.ch) و ۷ (H.S) در نمودار USSSL در محدوده C3S1 و سایر نمونه‌ها در محدوده C2S1 قرار گرفته‌اند که به ترتیب نشان‌دهنده رده کیفی خوب تا قابل قبول و رده عالی تا خوب هستند. مقدار بالای EC بر بهره‌وری محصول تأثیرگذار بوده و پتانسیل عمل را کاهش خواهد داد (Wilcox and Durum, 1967). درصد Na^+ براساس غلظت کل



شکل ۱۱- نمودارهای کیفی (a) شولر و (b) USSSL.

Figure 11- Quality diagrams: a) Schoeller, and b) USSSL.

(D.V) ۱۴، (A.V) ۱۵، (Sh.M) ۱۶، (N.V) ۱۷، (S.R) ۱۸، (S1.V) ۱۹، (S2.V) ۲۰ و (Tq) نشان‌دهنده فوق‌اشباع بودن آن‌ها نسبت به کوارتز می‌باشند و چشمه‌های ۲۱ (Kh)، ۲۲ (S.K)، ۲۳ (Sh.K)، ۲۴ (M.K)، ۲۵ (G.K) و ۲۶ (B.K) با داشتن ضریب اشباع منفی کوارتز تحت‌اشباع هستند. تمامی چشمه‌ها از لحاظ کانی‌های تالک، هالیت و سیدریت تحت اشباع بوده و قادر به انحلال این کانی‌ها هستند. همچنین از لحاظ گوئیت و هماتیت فوق‌اشباع می‌باشند. از لحاظ هیدروکسید آهن III چشمه‌های ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh)، ۱۳ (D.V)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۶ (N.V)، ۱۷ (S.R)، ۱۸ (S1.V)، ۱۹ (S2.V)، ۲۰ (Tq)، ۲۱ (Kh)، ۲۲ (S.K)، ۲۳ (Sh.K)، ۲۴ (M.K)، ۲۵ (G.K) و ۲۶ (B.K) تحت‌اشباع و چشمه‌های ۱ (Q.M)، ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵ (H.V)، ۶ (T.Ch)، ۷ (H.S)، ۸ (V.Sh)، ۹ (HA)، ۱۰ (Km) و ۱۱ (S.Sh) فوق‌اشباع هستند. براساس ضرایب کانیایی می‌توان نوع آب این چشمه‌ها را پوسته‌گذار در نظر گرفت.

ضرایب اشباع برای فازهای مختلف کانیایی نیز به‌وسیله نرم‌افزار phreeqc محاسبه شده و نتایج نشان می‌دهند که تمامی چشمه‌ها از لحاظ فاز کلسیت فوق‌اشباع هستند. از لحاظ فاز آراگونیت نمونه ۶ (T.Ch) تحت اشباع بوده و باقی چشمه‌ها فوق اشباع هستند. از لحاظ دولومیت نیز چشمه‌های ۲ (Vi)، ۸ (V.Sh)، ۱۳ (D.V)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۷ (S1.V)، ۱۸ (S1.V)، ۱۹ (S2.V)، ۲۰ (Tq)، ۲۲ (S.K) و ۲۵ (G.K) فوق اشباع و چشمه‌های ۱ (Q.M)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵ (H.V)، ۶ (T.Ch)، ۷ (H.S)، ۹ (HA)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh)، ۱۶ (N.V)، ۲۱ (Kh)، ۲۳ (Sh.K)، ۲۴ (M.K) و ۲۶ (B.K) تحت اشباع هستند. تمامی چشمه‌ها از لحاظ انیدریت و ژیپس تحت اشباع می‌باشند.

از لحاظ انحلال سیلیس تمامی چشمه‌ها تحت اشباع بودند. مقادیر مثبت ضریب اشباع کوارتز برای چشمه‌های ۱ (Q.M)، ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۴ (H.R)، ۵ (H.V)، ۶ (T.Ch)، ۷ (H.S)، ۸ (V.Sh)، ۹ (HA)، ۱۰ (Km)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh)، ۱۳

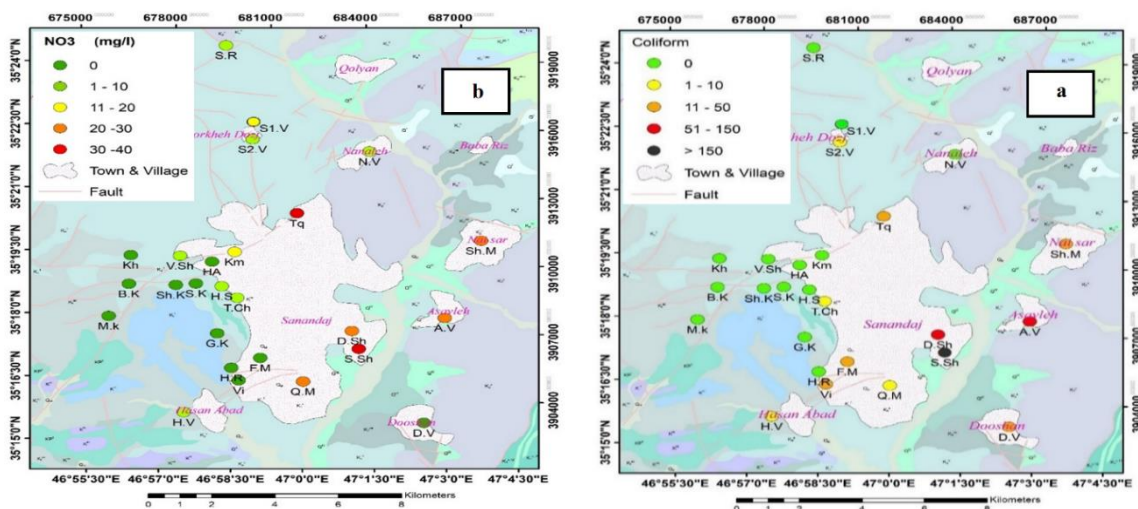
نتایج آنالیز کلیفرم کل

برای ارزیابی میکروبی چشمه‌ها در این پژوهش، کلیفرم کل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. باتوجه به نتایج حاصل چشمه‌های شماره ۱ (Q.M)، ۲ (Vi)، ۳ (F.M)، ۵ (H.V)، ۶ (T.ch)، ۱۱ (S.Sh)، ۱۲ (D.Sh)، ۱۳ (D.V)، ۱۴ (A.V)، ۱۵ (Sh.M)، ۱۹ (S2.V) و ۲۰ (Tq) دارای آلودگی میکروبی هستند و مناسب شرب نیستند (شکل ۱۲- الف). لازم‌به‌ذکر است تمامی چشمه‌های آلوده در مناطق مسکونی قرار گرفته‌اند. در روستای سرخه‌دزج، علت آلوده‌بودن چشمه ۱۹ (S2.V) و آلوده‌نبودن چشمه ۱۸ (S1.V) را همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، داشتن منشأهای متفاوت و مسیر عبور متفاوت آب چشمه از سرچشمه تا محل خروج آب بیان کرد. مردم ساکن این روستا نیز بیان کردند که دو چشمه دارای طعم متفاوتی هستند و از طعم و مزه آب چشمه شماره ۱۹ (S2.V) که دارای آلودگی میکروبی است ناراضی بودند. همخوانی توزیع

کلیفرم و نیترات گویای منشأ مشترک آلودگی است (شکل ۱۲- ب).

معاونت بهداشتی علوم پزشکی کردستان و سازمان آب و فاضلاب درسال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بر روی برخی از چشمه‌های محدوده شهر سنندج مطالعات میکروبی انجام داده و آن‌ها را از لحاظ کلیفرم گرمپای مورد بررسی قرار داده‌اند (جدول ۴).

ملاحظه می‌شود که تنها برخی از چشمه‌های محدوده سنندج جهت آنالیز، نمونه‌برداری شده‌اند و چشمه‌های قرار گرفته در برخی از نقاط شهر، همچون مسجد قرادیان (Q.M) شهرک ساحلی (S.Sh)، شهرک دگران (D.Sh) و روستای آساوله (A.V) بدون آلودگی و قابل شرب گزارش شده‌اند، این درحالی است که در مطالعه حاضر، نتایج آنالیز کلیفرم کل برای این چشمه‌ها آلودگی میکروبی را نشان می‌دهد. با توجه به این قضیه می‌توان گفت که باگذشت زمان چشمه‌ها در معرض منابع آلودگی قرار گرفته و آلوده شده‌اند.



شکل ۱۲- نقشه میزان (a) کلیفرم و (b) نیترات در چشمه‌های شهر سنندج.

Figure 12- Map of a) Coliform, and b) Nitrate levels in Sanandaj city spring.

نتایج آنالیز ICP-MS

غلظت عناصر جزئی آلاینده بستگی به منبع و محیط هیدروژئولوژیکی آب زیرزمینی دارد و معمولاً در حدود میکروگرم و حتی نانوگرم در لیتر است که به‌دلیل تأثیر تراکمی زنجیره تغذیه‌ای، با وجود مقدار بسیار کم می‌توانند بسیار خطرناک باشند. افزایش شناخت نقش تأثیرگذار عناصر جزئی در سلامتی انسان احتمال این‌که در سال‌های آینده تعداد

بیشتری از این عناصر مورد توجه و بررسی قرار گیرند را افزایش می‌دهد (اصغری مقدم، ۱۳۹۸).

در پژوهش انجام شده ۷۰ عنصر موجود در آب چشمه‌ها با روش ICP-MS اندازه‌گیری شدند که نتایج در جدول ۵ آورده شده است. خوشبختانه با مقایسه مقادیر به‌دست آمده عناصر سنگین با میزان تعیین شده در استاندارد آب آشامیدنی، تمامی چشمه‌ها عاری از آلاینده‌گی عناصر سنگین هستند.

علاوه بر موارد ذکر شده در جدول ۵ عناصر Cd, Bi, Be, Ag, Ir, In, Ho, Hg, Hf, Gd, Ge, Eu, Er, Dy, Cs, Cr, Co, Ce, Sb, Ru, Rh, Re, Pt, Pr, Pd, P, Os, Ni, Nd, Nb, Lu, La, Zr, Yb, Y, Tm, Tl, Th, Te, Rb, Tb, Ta, Sn, Sm, Se, Sc نیز کمتر از مقدار تشخیص بوده‌اند. بررسی کیفی چشمه‌های حوالی صومعه‌سرا در غرب شهرستان رشت، به‌طور مشابهی نشان داده است که با وجود عدم آلودگی چشمه‌ها با فلزات سنگین، تمامی آن‌ها دارای آلودگی میکروبی بوده‌اند (مظفری و همکاران، ۱۴۰۰). این مسأله با نتایج مطالعه Ghanem et al., (2021) مبنی بر بالا بودن آلودگی میکروبی و پایین بودن عناصر سنگین آب چشمه‌ها به واسطه واقع شدن آن‌ها در مناطق جمعیتی نیز هم‌خوانی دارد. از این‌رو بررسی کیفی آب چشمه‌ها از جنبه‌های مختلف ضروری به نظر می‌رسد و نباید صرفاً به بررسی عناصر اصلی اکتفا کرد.

جدول ۴- داده‌های آنالیز کلیفرم گرم‌پای اندازه‌گیری شده توسط علوم پزشکی و سازمان آب و فاضلاب.

Table 4- Thermotolerant Coliform analysis data measured by Medical Sciences and Water and Wastewater (Abfa) Organizations.

Sample location	Abbreviation	Thermotolerant Coliform (Abfa, 2020)	Thermotolerant Coliform (Medical Sciences, 2021)	Thermotolerant Coliform (Medical Sciences, 2020)
Farooogh Azam Mosque	F.M	-	9.1	-
Qaradian Mosque	Q.M	-	0	-
Vila Shahr	Vi	-	3.6	-
Vahdat Town	V.Sh	0	0	0
Haji Abad	HA	-	0	-
Kamez	Km	0	0	0
Hijab Square	H.S	-	0	-
Takyeh va Chaman	T.Ch	0	-	0
Hasan Abad Road	H.R	-	0	0
Khezre Zende Spring	Kh	-	0	-
Asavlah Village	A.V	-	0	-
Satelah	S.R	-	-	0
Sorkheh Dezaj Village	S.V	2	-	0
Degayran Town	D.Sh	-	0	-
Saheli Town	S.Sh	-	0	-
Sang Shekan Spring	S.K	-	0	0

جدول ۵- نتایج آنالیز ICP-MS چشمه‌های مورد مطالعه برحسب ppb.

Table 5- ICP-MS analysis results of studied springs (ppb).

Element	Unit	Min	Max	Mean	Median
Al	ppb	<1	82.90436093	18.60592875	10.93094
As	ppb	<1	3.760213396	1.174559081	<1
B	ppb	20	110	50.8	50
Ba	ppb	2.419335335	42.42415851	17.09063484	15.53026
Ca	ppb	59060	169860	92360.4	89490
Cu	ppb	<1	36.15315973	4.884473882	<1
Fe	ppb	<1	170.6193472	24.92497904	<1
Ga	ppb	<1	5.565677262	2.2735511	2.103493
K	ppb	<1	1030	168.456	140
Li	ppb	<1	8.693845555	2.929397664	2.062876
Mg	ppb	4230	21730	10398	9240
Mn	ppb	<1	21.00238671	4.620868869	1.258283
Mo	ppb	<1	3.653356268	0.995545774	<1
Na	ppb	990	102510	9924.4	5920
Pb	ppb	<1	7.005876229	1.256422942	<1
S	ppb	2160	37070	13455.6	12530
Si	ppb	2920	7860	5711.6	6110
Sr	ppb	300	1200	623.2	580
Ti	ppb	<1	2.649170144	<177966805772237	<1
U	ppb	<1	1.039526394	<113581055759037	<1
V	ppb	<1	2.928280784	0.894615583	<1
W	ppb	<1	5.46039377	1.085409325	<1
Zn	ppb	<1	44.25405918	13.0904884	9.833797

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی کیفی و هیدروشیمیایی چشمه‌های شهرستان سنندج انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد که اگرچه هیچ‌کدام از چشمه‌ها آلودگی ناشی از عناصر سنگین ندارند، اما متأسفانه تعدادی از آن‌ها از نظر میکروبی آلوده بوده و برای شرب مناسب نیستند. چشمه‌های قرادیان، ویلاشهر، مسجد فاروق اعظم، روستای حسن آباد، تکیه و چمن، شهرک ساحلی، شهرک دیاگران، روستای دوشان، روستای آساوله، مسجد شیخ رش، چشمه دوم روستای سرخه‌دز (سورازه) و محله تفتقان در این دسته قرار می‌گیرند. علاوه بر آلودگی میکروبی، برخی از چشمه‌ها دارای مشکلات دیگری نیز هستند. برای مثال، چشمه‌های ویلاشهر، مسجد فاروق اعظم، میدان حجاب، روستای ننه و هر دو چشمه سرخه‌دز (سورازه) دارای غلظت بالای بی‌کربناته هستند. چشمه تکیه و چمن نیز به دلیل میزان بالای کلر و EC بالاتر از استاندارد WHO، در رده نامطلوب قرار گرفته و برای شرب مناسب نیست. چشمه میدان حجاب نیز به دلیل بی‌کربناته و EC بالا، شرایط مشابهی دارد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بالا بودن میزان نترات و سولفات در چشمه‌های واقع در مناطق مسکونی، نشان‌دهنده تأثیرپذیری این چشمه‌ها از فاضلاب شهری است. این موضوع، ضرورت توجه بیشتر به مدیریت فاضلاب و جلوگیری از ورود آن به منابع آب زیرزمینی را آشکار می‌سازد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که اقدامات زیر برای بهبود کیفیت آب چشمه‌های سنندج در دستور کار قرار گیرد:

- ۱- جابجایی مکان دپو نمک و کود حیوانی واقع در پارک کودک که در بالادست چشمه تکیه و چمن قرار دارد، به منظور جلوگیری از آلودگی آب این چشمه.

- ۲- تعیین حریم کیفی برای چشمه‌ها، به منظور حفاظت از آن‌ها در برابر آلودگی‌های مختلف.

- ۳- انجام پایش دوره‌ای چشمه‌ها، به منظور ارزیابی مستمر کیفیت آب و شناسایی زودهنگام مشکلات احتمالی.

- ۴- محوطه‌سازی مناسب برای چشمه‌ها و نصب تابلوی کیفی، به منظور اطلاع‌رسانی به مردم و افزایش آگاهی آن‌ها در مورد کیفیت آب.

این اقدامات می‌توانند به بهبود کیفیت آب چشمه‌های سنندج کمک کرده و از سلامت شهروندان محافظت نمایند. انجام

پژوهش‌های بیشتر در زمینه شناسایی منابع آلودگی و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت آن‌ها نیز ضروری است.

منابع

ابراهیمی‌محمدی، ش.، ۱۳۹۶. ارزیابی ویژگی‌های هیدروشیمیایی و کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های محدوده دریاچه زریوار. اکوهیدرولوژی، ۴(۴): ۱۰۶۰-۱۰۴۹.

احمدی، م.، کمانگر، م.، ۱۴۰۲. تحلیل آماری و پیش‌بینی دمای ماهانه ایستگاه سینوپتیک سنندج با کاربرد مدل SARIMA. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱): ۱-۱۳.

اصغری مقدم، ا.، ۱۳۸۹. اصول شناخت آبهای زیرزمینی، "چاپ اول"، انتشارات دانشگاه تبریز، ۳۴۹ ص.

تیموری، م.، اسدی‌نیلوان، ا.، ۱۳۹۹. تأثیر کاربری اراضی و زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره و زمین‌آمار، مطالعه موردی: بخشی از حوضه‌ی آبریز حبله‌رود. هیدروژئومورفولوژی، ۷(۲۵): ۱۹-۳۷.

حبیبی‌نیا، ه.، کرد، م. و طاهری، ک.، ۱۴۰۰. تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت و خصوصیات ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت شیان، کرمانشاه. هیدروژئولوژی، سال ششم، شماره ۱، ۱۱۴-۱۲۵.

جعفری، ن.، حافظ‌پرست، م. و فرهادی، ب.، ۱۴۰۰. ارزیابی کیفی منابع آب جهت مصارف شرب و کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز گاماسیاب، استان کرمانشاه). مطالعات علوم محیط زیست، ۶(۲)، ۳۵۲۵-۳۵۳۲.

شیخ‌الاسلامی، ع.، آرمان، م. ع. و خاکسار، ح.، ۱۳۹۰. مقایسه تطبیقی مواد مورد استفاده برای یخ‌زدایی جاده‌ها در زمستان و پیشنهاد مواد مناسب برای راه‌های ایران. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

طالبی، ب.، سجادی، ن. و شارمد، ت.، ۱۳۹۶. ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی و کشاورزی در چشمه‌های منطقه شمال دشت قزوین. پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، ۱۲(۲): ۱۶-۱.

کلانتری، ن.، زروش، ن.، علیجانی، ف.، دانشیان، ح. و باشتی، م.، ۱۴۰۳. استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و

springs and wells in Zarivar Lake zone. Journal of Ecohydrology, 4(4), 1049-1060. (In Persian)

Fetter. C. W., 1988. Applied Hydrogeology. Mc Milian publishing Company. U.S.A. 592 p.

Ghanem, M., Ahmad, W., Keilani, Y., Sawaftah, F., Schelter, L., & Schuettrumpf, H., 2021. Spring water quality in the central West Bank, Palestine. Journal of Asian Earth Sciences: X, 5, 100052.

Habibinia, H., Kord, M., Taheri, K., 2021. Effect of geological formations on the quality and geochemical characteristics of groundwater Shiyan plain aquifer, Kermanshah. Hydrogeology, 6(1), 114-125. (In Persian)

Hounslow, A.W., 2018. Water quality data: Analysis and interpretation.

Institute of Standard and Industrial Research of Iran (ISIRI), 1997. Characteristics of Drinking Water. Standard No. 1053. The 4th and 5th editions, Commission of the standard and drink water characteristics. (In Persian)

Jafari, N., Hafezparast, M., Farhadi, B., 2021. Qualitative evaluation of water resources for drinking and agricultural uses (Case study: Gamasiab catchment, Kermanshah province). Journal of Environmental Sciences Studies, 6(2), 3525-3532. (In Persian)

Jalali, M., Jalali, M., 2016. Geochemistry and background concentration of major ions in spring waters in a high-mountain area of the Hamedan (Iran). J. Geochemical Explor., 165, 49-61.

Kalantari, N., Zarvash, N., Alijani, F., Daneshian, H., Bashti, M., 2024. Investigating the quality of groundwater resources with emphasis on the origin and determining the nitrate pollution index using hydrochemical methods and multivariate statistical techniques in the southern part of Behbahan aquifer in Khuzestan province. Hydrogeology, 9(1), 40-56. (In Persian)

Kiyani, V., Esmaili, A., Alijani, F., Kiani, S., 2021. Hydrogeochemistry and Isotopic Investigation of Barudab and Malusan springs of Nahavand area output from Carboniferous-Permian limestones (Introduce ancients' host rocks in Sanandaj-Sirjan zone in Iran). Iran-Water Resources Research, 17(2), 82-99. (In Persian)

Malki, M., Bouchaou, L., Hirich, A., A. Brahim, Y., Choukr-Allah, R., 2017. Impact of agricultural practices on groundwater quality in intensive irrigated area of Chtouka-Massa, Morocco. Sci. Total Environ., 574, 760-770.

Mohammadi, H., Kalantari, N., Alijani, F., Mehrabinejd, A., 2024. Hydrochemical Processes in the Aquifers of Behbahan, Ramhormoz and Zeidon in

تکنیک‌های آماری چند متغیره در بخش جنوبی آبخوان بهبهان استان خوزستان. هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۱، ۴۰-۵۶.

کیانی، و، اسماعیلی، ع، علیجانی، ف. و کیانی، س. ۱۴۰۰. هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی چشمه‌های ملوسان و باروداب (شهرستان نهاوند) خروجی از آهکهای کربونیفر-پرمین (معرف قدیمیترین مخازن کارستی ناحیه سندج-سیرجان در ایران). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۲): ۸۲-۹۹.

محمدی، ه، کلانتری، ن، علیجانی، ف. و محرابی‌نژاد، ع. ۱۴۰۳. فرایندهای هیدرووشیمی در آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون استان خوزستان با استفاده از نمودارهای ترکیبی و ایزوتوپی. هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۲، ۱۵-۲۹.

مظفری، م، تاکی، س. و آیتی، ف.، ۱۴۰۰. بررسی کیفیت چشمه‌های حوالی صومعه‌سرا (غرب شهرستان رشت) و تأثیر احتمالی واحدهای زمین‌شناسی بر آنها. مطالعات علوم محیط زیست، ۶(۳): ۴۰۱۳-۴۰۲۲.

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۸. استاندارد ۱۰۵۳، آب‌آشامیدنی-ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی. تجدید نظر پنجم. ۱۸.

Reference

Ahmadi, M., Kamangar, M., 2023. Statistical analysis and forecasting monthly temperature of Sanandaj synoptic station with the application of SARIMA model. Water and Soil Management and Modeling, 3(1), 1-13. (In Persian)

Aksever, F., 2019. Hydrogeochemical characterization and water quality assessment of springs in the Emirdağ (Afyonkarahisar) basin, Turkey. Arabian Journal of Geosciences, 12(24), 780.

Asghari-Moghaddam, A., 2010. Principles of Hydrogeology. First Edition, Tabriz University Publications, 349 p. (In Persian)

Barakat, A., Meddah, R., Afdali, M., & Touhami, F., 2018. Physicochemical and microbial assessment of spring water quality for drinking supply in Piedmont of Béni-Mellal Atlas (Morocco). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/b/c, 104, 39-46.

Bouderbala, A., & Gharbi, B. Y., 2017. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain, Algeria. Environmental Earth Sciences, 76, 1-17.

Ebrahimi Mohammadi, Sh., 2018. Assessment of hydrochemical characteristics and water quality of

Khuzestan Province Using Combined and Isotopic Diagrams. *Hydrogeology*, 9(2), 15-29. (In Persian)

Mozafari, M., Taki, S., Ayati, F., 2021. Investigating the quality of springs near Soomehsara (west of Rasht city) and the possible impact of geological units on them. *Journal of Environmental Sciences Studies*, 6(3), 4013-4022. (In Persian)

Mazor, E., 1991. Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. *Appl. Chem. Isot. Groundw. Hydrol.*

Mishra, A. K., & Singh, V. P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.

Niu, B., Wang, H., Loáiciga, H.A., Hong, S., Shao, W., 2017. Temporal variations of groundwater quality in the Western Jiangnan Plain, China. *Sci. Total Environ.*, 578, 542-550.

Sheikh Eslami, A., Arman, M. A., Khaksar, H., 2011. A Comparative Study of Materials Used for Road De-icing in Winter and Proposed Suitable Materials for Iranian Roads. The Sixth National Civil Engineering Congress, May 6-7, Saman University, Semnan, Iran. (In Persian)

Talebi, B., Sajjadi, N., Sharmad, T., 2017. Evaluation of Drinking and Agricultural Water Quality in the North of Qazvin Plain's Springs. *Journal of Marine Science and Technology Research*, 12(2), 1-16. (In Persian)

Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., 2023. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Second Edition. 684 p.

Taloor, A. K., Pir, R. A., Adimalla, N., Ali, S., Manhas, D. S., Roy, S., & Singh, A. K., 2020. Spring water quality and discharge assessment in the Basantar watershed of Jammu Himalaya using geographic information system (GIS) and water quality Index (WQI). *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100364.

Teimouri, M., 2021. Assessing the impact of land use and geology on groundwater quality using multivariate statistical models and geostatistical analyses (Case Study: Part of the Hable-Rood River Basin). *Hydrogeomorphology*, 7(25), 19-37. (In Persian)

White, W.B., 2010. Springwater geochemistry. In: *Groundwater Hydrology of Springs*.

Wilcox, L.V., Durum, W.H., 1967. Quality of irrigation water. *Irrig. Agric. lands*, 11, 104-122.

ارزیابی تناسب اقلیمی حوضه آبریز ارس برای کشت چهار گونه از گیاهان دارویی با استفاده از دورسنجی و خوشه‌بندی فازی و بررسی تحلیل اقتصادی بر مبنای سودآوری

مرجان معظم نیا^{۱*}، سید بهمن موسوی^۲، سینا صادق فام^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

* نویسنده مسئول: m.moazamnia@ubonab.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳

چکیده

شناسایی مناطق مناسب به منظور کشت محصول برای کشاورزی پایدار و حفاظت از منابع خاک و آب بسیار مهم است. در این تحقیق، شاخص تناسب اقلیمی برای چهار گونه از گیاهان دارویی کور، گل محمدی، سرخارگل و اسطوخودوس با استفاده از مجموعه داده‌های اقلیمی شامل بارش متوسط سالانه و دمای دوره رشد برگرفته از ماهواره‌های CHIRPS و ERA5 محاسبه شده است. نیازهای اقلیمی مذکور برای گیاهان مورد مطالعه از توصیه‌های نشریه‌های جهاد کشاورزی استخراج شده و برای محاسبه شاخص تناسب اقلیمی نیز از روش خوشه‌بندی فازی استفاده شده است. بررسی‌های نشان داد که کور و گل محمدی سازگاری اقلیمی بیش از ۷۵ درصد در نیمه شرقی حوضه آبریز دارند. بر اساس نتایج بدست آمده از تناسب اقلیمی سرخارگل و اسطوخودوس نیز مشاهده گردید که در بخش‌هایی از نیمه شرقی و غربی محدوده مورد مطالعه، شاخص تناسب اقلیمی بین ۵۰ تا ۷۵ درصد می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که روش پیشنهادی با کاهش وابستگی به نظرات کارشناسی و کمی‌سازی عدم قطعیت، دیدگاه عمیق‌تری نسبت به نتایج ارائه می‌دهد. همچنین نسبت سودآوری مربوط به گیاهان دارویی برای اسطوخودوس در سال چهارم ۱۲/۶، سرخارگل از سال دوم به بعد ۵/۳، گل محمدی در سال چهارم ۱/۶ و در سال هشتم ۴/۴ تخمین زده شده است. بنابراین در حالت کلی کشت گیاهان دارویی با توجه به دارا بودن نسبت سود به هزینه بالا و نیاز آبی کم پتانسیل بالایی برای سرمایه‌گذاری در منطقه دارند.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، کشاورزی پایدار، نظرات کارشناسی، CHIRPS، EAR5.

مقدمه

اراضی کشاورزی است (Budak et al., 2022; Sadeghfam et al., 2024a). این شاخص همچنین دارای مزایای اقتصادی و کشاورزی برای گیاهان دارویی است و عمدتاً زمان استفاده از سیستم‌های تناوب یا کشت مخلوط می‌تواند سلامت خاک را بهبود بخشد، آفات و بیماری‌ها را مدیریت کرده و انعطاف‌پذیری اقتصادی را افزایش دهد. علاوه بر این، تلفیق تکنیک‌های دورسنجی و داده‌کاوی می‌تواند موجب افزایش کاربرد مؤثر شاخص پتانسیل کشت می‌باشد. شاخص تناسب

مدیریت پایدار کشاورزی بر داده‌های دقیق آب و هوایی و غیر اقلیمی متکی است (Viana et al., 2022) که در قالب هدف دوم از اهداف توسعه پایدار با عنوان ریشه کن کردن گرسنگی و سوء تغذیه هماهنگ است. سیاست‌گذاران می‌توانند با شناسایی مناطق مناسب از طریق شاخص پتانسیل کشت، در راستای توسعه کشاورزی پایداری حرکت کنند. هدف از شاخص پتانسیل کشت، افزایش بهره‌وری کشاورزی و تضمین دسترسی به مواد غذایی با پهنه‌بندی فراهمی و توزیع

دارویی کاکوتی در حوضه مورد مطالعه بوده است. در مطالعه رحیمی مقدم (۱۴۰۲) با استفاده از تحلیل سلسه‌مراتبی و نرم-افزار ArcGIS به ارزیابی اکولوژیک کشت گیاهان دارویی در مراتع مختلف استان لرستان برای احیای مراتع و حفاظت از این گیاهان دارویی پرداخته شده است. مجموعه داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های خاکی، داده‌های بلندمدت اقلیمی (۲۰۲۰ - ۱۹۷۰) و توپوگرافی بودند. نتایج نشان داد که نقش عامل اقلیمی میانگین دمای سالانه در کشت گیاهان دارویی بیشتر از سایر عوامل بوده و ارتفاع و بارندگی تجمعی سالانه در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و به طور کلی مراتع استان لرستان پتانسیل خوبی برای کشت گیاهان دارویی آنغوزه، باریجه و کرفس کوهی داشته و برای کشت گیاهان دارویی گل گاوزبان ایرانی و شیرین بیان دارای پتانسیل متوسطی می‌باشند.

Mehrabi et al., (2014) به بررسی پتانسیل کشت گیاه شیرین بیان در شهرستان اراک براساس لایه داده‌های دما، بارش و یخبندان پرداختند. نتایج آنها وضعیت منابع اقلیمی منطقه مورد مطالعه را برای کشت شیرین بیان مناسب نشان داد. Zhang et al., (2016) به بررسی پیش بینی پتانسیل کشت گیاهان دارویی در چین با استفاده از مدل‌سازی حداکثر آنتروپی و منطق فازی پرداختند. در این مطالعه ارتباط بین عوامل محیطی و گیاه دارویی با ترکیب منطق فازی و مدل‌سازی حداکثر آنتروپی بر اساس تکنیک GIS ایجاد شده و نتایج، پتانسیل بالایی منطقه مورد مطالعه را برای کشت گیاه دارویی موردنظر نشان داد. در مطالعه Pourhadian, (2017) به بررسی پتانسیل کشت گیاه دارویی گل گاوزبان با لایه داده‌های اقلیمی شامل بارش، دمای متوسط، دمای حداکثر و دمای حداقل پرداخته شده است. نقشه پهنه‌بندی بدست آمده در استان مازندران نشان داد که سطح وسیعی از استان پتانسیل خوبی برای کاشت گیاه دارویی گل گاوزبان دارد. (et al., (2019) Mirmohammadsadeghi طی تحقیقی برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت گیاه گل محمدی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای وزن‌دهی و پارامترهای اقلیمی، توپوگرافی و اجتماعی و اقتصادی به عنوان داده‌های اولیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل کشت گل محمدی در استان اصفهان را تهیه نمودند و در

اقلیمی (CSI)^۱ بخش مهمی از شاخص پتانسیل کشت بوده که مشتمل بر پارامترهای مهم اقلیمی نظیر بارش و دما می‌باشد (Sadeghfam et al., 2024b).

علاوه بر انواع محصولات کشاورزی زراعی و باغی، کشت گیاهان دارویی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد که دلیل اصلی آن هم نیاز آبی کم و سازگاری بالای آن‌ها با شرایط کم‌آبی و خشکی دارند (Das et al., 2016; Harish et al., 2012). با توجه به این نکته که در ایران طی سال‌های اخیر از یک سو با کاهش نزولات جوی و از سوی دیگر با برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی روبرو هستیم، لذا کشت گیاهان دارویی می‌تواند به عنوان جایگزینی برای محصولات پرمصرف آب در نظر گرفته شود. مضافاً اینکه این کشت جایگزین می‌تواند از منظر تجاری و تقاضای مصرف نیز درخور توجه باشد. لازم به ذکر است که پیشنهاد کشت جایگزین باید براساس اصول و پشتوانه علمی باشد و اولین قدم در این راستا بررسی تناسب و پتانسیل کشت با درنظرگیری الگوی اقلیمی می‌باشد (کلانتری و همکاران ۱۴۰۳، شیخ زاده و همکاران ۱۴۰۳).

پورمیدانی و همکاران (۱۴۰۰) به تناسب کشت چهار گونه گیاه دارویی شامل گل محمدی، زعفران، آویشن و اسطوخودوس در ۳۶ دشت واقع در حوضه آبریز دریاچه نمک با سناریوی تغییر اقلیم پرداختند. در این مطالعه همه مدل‌ها تحت سناریوهای مختلف، کاهش بارندگی و افزایش دما را پیش‌بینی کرده و نتیجه گرفتند که با توجه به نیازهای اکولوژیکی و ویژگی‌های اقلیمی منطقه، کشت زعفران، آویشن و گل محمدی در بیشتر اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه نمک مطلوب یا بسیار مطلوب است. علی‌خواه و همکاران (۱۴۰۰) به مکان‌یابی کشت گیاه کاکوتی در حوضه آبخیز سبلان با روش فازی تحلیل شبکه (ANP² Fuzzy) پرداخته‌اند. در این مطالعه ۱۲ معیار در قالب خوشه‌های توپوگرافی، خاک، اقلیم، زمین‌شناسی و کاربری اراضی با استفاده از روش تحلیل شبکه و استفاده از نظر کارشناسی در تهیه نقشه تناسب کشت و توسعه این گیاه معرفی شده است. نتایج نشان داد، مدل فازی تحلیل شبکه به خوبی قادر به شناسایی مناطق مناسب برای توسعه کشت گیاه

²Analytic Network Process

¹Climate Suitability Index

تحقیقات برای کاربرد دورسنجی در پتانسیل کشت گیاهان دارویی و چالش‌های مرتبط مورد بحث قرار گرفته است.

خوشه‌بندی فازی به روش C-means یکی از روش‌های محبوب در تحلیل داده و یادگیری ماشین است که به دسته‌بندی داده‌ها به مجموعه‌های مختلف با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها می‌پردازد. این روش توسط Bezdek et al., (1984) توسعه داده شد. این روش بر اساس این اصل پایه‌گذاری شده است که داده‌ها می‌توانند به چندین خوشه تعلق داشته باشند و به جای یک تخصیص سخت، از تخصیص نرم استفاده می‌کند. این قابلیت باعث می‌شود که خوشه‌بندی فازی برای داده‌های پیچیده و غیرخطی مؤثرتر باشد و نتایج دقیق‌تری را به همراه داشته باشد. این الگوریتم به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، مانند تقسیم تصویر برای برنامه‌های کاربردی کشاورزی (Peng et al., 2024)، ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی (Golaki et al., 2024; Matsui et al., 2022) و طبقه‌بندی بیماری‌های برگ (Rajagopal et al., 2024) استفاده می‌گردد.

کشت دیم محصولات کشاورزی می‌تواند باعث کاهش فشار بر منابع آب سطحی و زیرزمینی گردد (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲). این مسئله با توجه به وابستگی بخش کشاورزی منطقه مورد مطالعه به منابع آب زیرزمینی اهمیت چشمگیری دارد. به عبارت دیگر تغییر شیوه کشت از آبیاری به دیم در محافظت از منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار است. از طرفی کشت دیم گیاهان دارویی در کنار کاهش فشار بر منابع آبی، سود اقتصادی بیشتری نیز در بر دارد. توجه به این دو نکته می‌تواند ضرورت انجام پژوهش حاضر را آشکار سازد. با مرور در ادبیات فنی موجود مشاهده شد که مطالعات محدودی در زمینه استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی برای پهنه‌بندی CSI وجود دارد. به‌کارگیری خوشه‌بندی فازی برای این منظور که می‌تواند عدم قطعیت در خوشه‌بندی را در نظر بگیرد، در مطالعات CSI استفاده نشده است. استفاده از داده‌های اقلیمی ماهواره‌ای یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری مطالعه حاضر است. یکی از محدودیت‌های استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بارش و دما و استفاده از تکنیک‌های درونیایی، عدم کفایت

نهایت نشان دادند که سه پارامتر بارش سالیانه، ارتفاع و دمای میانگین سالیانه بیشترین تأثیر و شیب کمترین تأثیر بر کمیت و کیفیت این گونه گیاهی داشته است. Sadeghfam et al., (2024b) براساس شاخص تناسب اقلیم به بررسی پتانسیل کشت ۱۲ گونه گیاه دارویی با چارچوب احتمالی در حوضه دریاچه ارومیه پرداخته‌اند. در روش معرفی شده، برای کاهش نظرات کارشناسی و عدم قطعیت‌های موجود، تحلیل فراوانی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)¹ انجام یافته است. Roopashree et al., (2024) با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و اطلاعات خاک شامل نوع خاک و خوشه مناسب خاک، به حفظ گیاهان دارویی آسیب‌پذیر و کمک به رشد آن‌ها در هند پرداخته‌اند. این گیاهان برای درمان بیماری‌ها و کمک به کشف داروهای جدید استفاده می‌شوند.

مطالعه Shen et al., (2021) با هدف شبیه‌سازی اثر تغییرات آب و هوایی بر توزیع گیاهان دارویی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)² و ارزیابی تأثیر بالقوه مناسب بودن زیستگاه بر کیفیت گیاهان دارویی انجام یافته است. Asigbaase et al., (2023) مزایای اقتصادی و وضعیت حفاظت از گیاهان دارویی را در ذخایر جنگلی در غنا ارزیابی کرده‌اند. در این مقاله با تمرکز بر ویژگی‌های اجتماعی و جمعیتی منطقه، گیاهان دارویی مورد استفاده برای درمان بیماری‌ها در جوامع، روند در دسترس بودن گیاهان دارویی، سهم گیاهان دارویی در درآمد ناخالص و استراتژی‌های حفاظت از این گیاهان توسط بازدیدهای میدانی و پرسشنامه‌ای بررسی شد. در نهایت کشت گیاهان دارویی در مزارع، ایجاد نهالستان‌های گیاهان دارویی، ادغام گیاهان دارویی در باغ‌های خانگی، ایجاد باغ‌های گیاه‌شناسی و سیستم‌ها و شیوه‌های دانش بومی به عنوان راهکارهایی برای حفاظت و بهره‌برداری پایدار از آن‌ها پیشنهاد شد. در مطالعه Zhong et al., (2025) به بررسی ترکیب کاربردهای بالقوه دورسنجی در کشت گیاهان دارویی پرداخته می‌شود. در این مقاله در درجه اول روش‌های مختلف داده‌های دورسنجی تجزیه و تحلیل شده، سپس پیشرفت

²Maximum Entropy

¹Particle Swarm Optimization

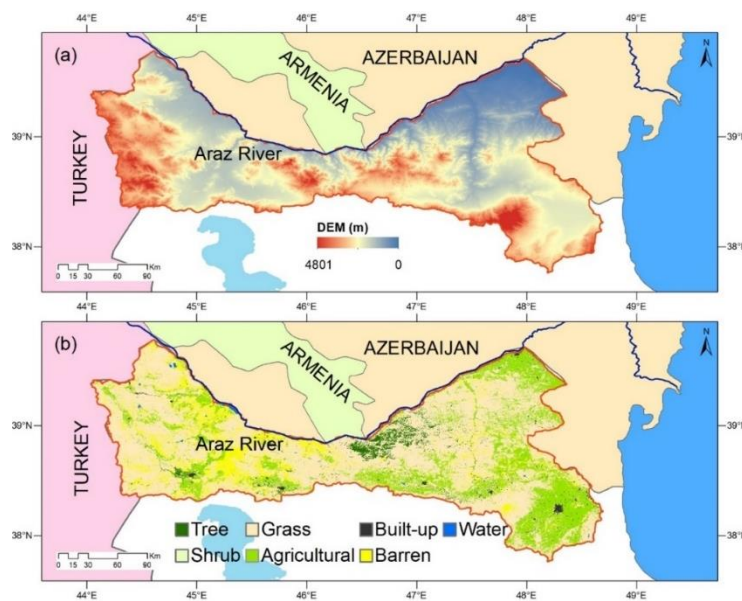
شده است. این حوضه، سه استان آذربایجان شرقی و غربی و اردبیل را در بر میگیرد و زیرمجموعه حوضه دریای خزر است. مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۱ با استفاده از رادار شاتل ناسا (SRTM)^۲ نشان می‌دهد که تراز ارتفاعی منطقه بین صفر تا ۴۸۰۱ متر بالاتر از سطح دریا (a.s.l)^۳ تغییر می‌کند. رودخانه ارس که رودخانه اصلی این حوضه است، از کوه آرارات در ترکیه در ارتفاع ۵۱۱۱ متری سرچشمه می‌گیرد و در ارتفاع ۵۱ متری به دریای خزر می‌ریزد. شکل ۱(ب) نقشه کاربری اراضی برای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که از آژانس فضایی اروپا -ESA^۴ (۲۰۲۱) استخراج شده است و نشان می‌دهد که کشاورزی جزو کاربری‌های مهم می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه بر اساس داده‌های ماهواره CHIRPS بین ۲۳۰ تا ۹۵۰ میلی‌متر متغیر بوده که مقادیر پایین‌تر در زمینهای پست و مقادیر بالاتر در ارتفاعات مشاهده می‌شود (۱۳۷۰-۱۴۰۲). همچنین میانگین بارش سالانه برای کل حوضه ۴۳۴ میلی‌متر در سال است (۱۳۷۰-۱۴۰۲).

توزیع مکانی ایستگاه‌ها و در نتیجه عدم در نظر گیری میکرو اقلیم‌های موجود در منطقه مطالعه است. این محدودیت می‌تواند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تاحد زیادی مرتفع گردد. روش شناسی ارائه شده محاسبه شاخص CSI برای کشت دیم گیاهان دارویی شامل کور، گل محمدی، سرخارگل و اسطوخودوس در حوضه آبریز ارس استفاده شده که می‌تواند تأثیر مهمی در کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی داشته باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ارس (آراز) بخش‌هایی از کشورهای ترکیه، ارمنستان، ایران و جمهوری آذربایجان را شامل می‌شود. مساحت کل این حوضه ۹۵۷۳۹ کیلومتر مربع است که از این مساحت ۳۹۵۳۲ کیلومتر مربع در ایران واقع شده است (شکل ۱-الف). سیستم مختصات شکل ۱ بر اساس سیستم مختصات Universal Transverse Mercator واقع در ناحیه ۳۸ ترسیم



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه: (الف) موقعیت جغرافیایی، (ب) نقشه کاربری اراضی.

Figure 1- Study area: (a) geographical location; (b) land use map.

اقلیمی است. لایه داده‌هایی که در محاسبه CSI مورد استفاده قرار گرفته شامل بارش متوسط سالانه و دمای دوره رشد است. جدول ۱ ویژگی‌های لایه داده‌ها شامل منابع، ارائه‌دهندگان، قدرت تفکیک مکانی و دوره‌های زمانی را نشان می‌دهد.

داده‌ها و منابع

ادغام لایه‌های گنجانیده شده به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار، امکان ارزیابی جامع CSI را فراهم می‌کند. هر متغیر با توجه به تأثیر آن بر بهره‌وری کشاورزی، با دقت انتخاب گردیده و اطمینان حاصل شده که CSI منعکس‌کننده شرایط

³ above sea level

⁴ European Space Agency

¹ Digital Elevation Model

² Shuttle Radar Topography Mission

جدول ۱- منابع و ویژگی‌های لایه داده‌های ادغام شده.

Table 1 - Sources and features of the aggregated data layer.

Data Layer	Source	Provider	Resolution	Time period	Reference
Prcp	CHIRPS	UCSB, CHG	5566 m	1992-1-1 2024-1-1	Chris et al. (2015)
Temp	ERA5	Daily Aggregates: Google and Copernicus Climate Data Store	11132 m	1992-1-1 2024-1-1	Muñoz Sabater (2019)

روش خوشه‌بندی فازی

خوشه‌بندی فازی تکنیکی است که به طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل داده‌ها و یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفته و داده‌ها را با در نظرگیری عدم قطعیت به خوشه‌ها طبقه بندی می‌کند. (Dunn and Bezdek (1980) توصیه نمودند که با استفاده از این تکنیک داده‌ها می‌توانند به خوشه‌های چندگانه تعلق داشته باشند و از تخصیص نرم به جای سخت مورد استفاده قرار گیرند. این فرآیند شامل چندین مرحله به شرح زیر است که در محیط متلب اجرا شده است. (i) مقداردهی اولیه: انتخاب تعداد خوشه‌ها و مقداردهی اولیه برای مراکز آن‌ها. (ii) محاسبه تابع عضویت: برای هر نقطه داده، یک تابع عضویت برای نشان دادن احتمال عضویت آن در هر خوشه محاسبه می‌شود که امکان احتمال‌های مختلف را در چندین خوشه فراهم می‌کند. (iii) محاسبه مرکز خوشه: به روز رسانی مراکز خوشه بر اساس توابع عضویت با به حداقل رساندن تابع هدف زیر (Bezdek, 2013):

$$Obj. Func. = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m D_{ij}^2 \quad (1)$$

که در آن n تعداد داده‌ها، C تعداد خوشه، m ماتریس پارتیشن فازی که میزان همپوشانی فازی را تنظیم می‌کند، D_{ij} فاصله داده j از خوشه i است؛ μ_{ij} درجه عضویت داده j در خوشه i است.

(iv) تکرار: تکرار مراحل ۲ و ۳ تا زمانی که تغییرات در مراکز خوشه‌ای و توابع عضویت تثبیت شود. در این مطالعه از خوشه‌بندی فازی برای تعیین CSI استفاده شده و عدم قطعیت با استفاده از درجه عدم عضویت در خوشه انتخاب شده بررسی می‌گردد.

درون‌یابی

در این مطالعه از روش وزن‌دهی با فاصله معکوس (IDW^1) برای درون‌یابی مکانی خروجی‌های خوشه‌بندی فازی در وضوح مشخص استفاده شده است. IDW میانگین نقاط نمونه از مکان‌های اطراف را برای هر نقطه ناشناخته محاسبه می‌کند، بر اساس این اصل که تأثیر هر نقطه با فاصله کاهش می‌یابد که به قانون توان معکوس نیز معروف است (Isaaks and Srivastava., 1989).

معرفی چهار گونه از گیاهان دارویی و متغیرهای اقلیمی مورد نیاز این گیاهان

کور (کبر)

جنس (Capparis) از تیره Capparaceae در ایران پنج گونه را دارا است که در مناطق خشک و نیمه خشک و کویری انتشار دارند. در میان این گونه‌ها *Capparis spinosa* L. با نام فارسی کور بیشترین پراکنش را در کشور ایران دارد و به صورت خودرو در شکاف صخره‌ها، در بالای دیوارهای گلی، مناطق مخروبه و به طور کلی در هر خاکی با حداقل مواد غذایی رشد می‌کند. کور تابستان‌های با دمای بیش از ۴۰ درجه سلسیوس و زمستان‌های تا ۸- درجه سلسیوس را به خوبی تحمل می‌کند. این گیاه در مناطق خشک با بارندگی کم از خاک محافظت کرده و یک محافظ واقعی در کنترل فرسایش خاک است و می‌تواند برای احیای خاک‌های کم شور، خاک‌های آهکی و زمین‌های مزروعی و حفاظت از مناطق تخریب شده مورد استفاده قرار گیرد. در طب سنتی ایران این گیاه برای درمان رماتیسم، التهاب، امراض کبدی و کم‌خونی استفاده می‌شود (خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۶). جدول ۳ نیازهای اقلیمی برای کشت کور را نشان می‌دهد.

¹ Inverse Distance Weighted

گل محمدی

دارد. این گیاه، اثر بسیار خوبی روی سیستم ایمنی بدن دارد، به طوری که موجب تقویت سیستم ایمنی از راه پیشگیری و درمان سرماخوردگی معمولی، سرفه، برونشیت و عفونت‌های ریوی می‌شود و مقاومت بدن را در برابر بیماری‌ها افزایش می‌دهد. همچنین مصرف آن به عنوان پیشگیری و درمان کمکی برای عفونت‌های مجاری تنفسی فوقانی، زخم‌ها و مارگزیدگی و نیز گزینه‌ای برای درمان بیماری ایدز اثبات شده است. جدول ۳ نیازهای اقلیمی برای کشت سرخارگل را نشان می‌دهد.

اسطوخودوس

اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) گیاهی است دارویی و زینتی، چندساله و خشبی، همیشه‌سبز، دارای ساقه چوبی و بوته‌ای شکل که در زمین‌های آهکی زیاد دیده می‌شود. اسطوخودوس دارای طبع گرم و خشک است و از فراورده‌های معطر گیاهی مورد استفاده در طب سنتی ایران است که اثرات آرام‌بخشی و ضد درد آن مورد تأکید دانشمندان ایران زمین همچون رازی و بوعلی سینا بوده است. همچنین مصرف دو بار در روز جوشانده اندام هوایی خشک شده اسطوخودوس به درمان افسردگی در بیماران کمک می‌کند. اسطوخودوس از گیاهان سازگار با مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این گیاه در طول رویش به نور فراوان، هوای گرم و رطوبت کم نیاز دارد. از روش‌های تکثیر آن می‌توان به قلمه زدن، خوابانیدن کپه‌ای و کشت بذر اشاره کرد. زمان مناسب کاشت این گیاه به صورت قلمه با شروع فصل بهار و از بین رفتن سرمای زمستانه و به صورت بذر در آذر ماه یا نیمه دوم اسفند اقدام به کشت بذر می‌کنند. متوسط دمای دوره رشد این گیاه مابین ۱۸ الی ۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد (سازمان جهاد کشاورزی). جدول ۲ نیازهای اقلیمی برای کشت اسطوخودوس را نشان می‌دهد.

گل محمدی با نام علمی (*Mill Rosa damasena*) گیاهی نورپسند است ولی نیاز ارقام و واریته‌های مختلف آن به نور متفاوت بوده و کمبود نور کافی از عوامل مهم بازدارنده رشد گیاه محسوب می‌شود. pH مناسب خاک برای کشت گل محمدی حدود ۶ تا ۵/۷ است. کشت ارقام مختلف در خاک‌های برخوردار از بافت سبک، مانند خاک‌های شن‌لومی نتایج بهتری را به همراه دارد. خاک‌هایی که برای کشت گل محمدی در نظر گرفته می‌شوند، باید غنی از مواد و عناصر غذایی و همچنین مواد آلی باشد. خاک‌های دارای بافت سنگین برای کشت این گیاه مناسب نیستند. همچنین در مناطقی که میانگین بارندگی سالانه از ۲۵۰ میلی‌متر بیشتر باشد کشت دیم آن امکان‌پذیر است. از گل محمدی در صنایع غذایی و آشامیدنی شامل: انواع نوشیدنی‌ها، شیرینی‌جات، پودینگ، ژله‌ها، دسرهای، مربا و گل آرای، تهیه بالشک‌های خوشبو و تزئین سبدهای خشک استفاده می‌شود. این گیاه دارای خواص درمانی است و در صنعت عطر سازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (رزم‌جو و همکاران، ۱۳۹۵). جدول ۳ نیازهای اقلیمی برای کشت گل محمدی را نشان می‌دهد.

سرخارگل

سرخارگل از جنس اکیناسه (*Echinacea*) و از خانواده کاسنی (*Asteraceae*) است. ریشه کلمه *Echinacea*، کلمه یونانی اکینوز (*Echinos*) به معنی خارپشت دریایی یا جوجه تیغی است که به علت شباهت نهنج مخروطی شکل و نوک‌های خاردار براکته (حلقه زیر گل) در گل‌های آن می‌باشد. این گیاه علفی، چندساله و بومی قاره آمریکای شمالی است که به صورت جمعیت‌های طبیعی در غرب کوه‌های راکی در آمریکا تا آلبرتا، جنوب کانادا و خلیج مکزیک یافت می‌شود. گونه‌های سرخارگل معمولاً متحمل به خشکی هستند و این گیاه برای رشد بهینه، نیاز به آفتاب کامل دارد؛ هر چند می‌تواند در محیط با نور کم (حدود ۵۰ درصد سایه) هم به خوبی رشد کند. سرخارگل در مرحله جوانه‌زنی، تحمل پایینی به تنش شوری

جدول ۲- متغیرهای اقلیمی برای کشت گیاهان دارویی.

Table 2- Climatic variables for cultivating medicinal plants.

NO	Plant name	Growth period	Optimum growth temperature (degrees Celsius)	Minimum annual rainfall required (mm)
----	------------	---------------	--	---------------------------------------

1	Capparis spinosa L	Early March to early October	-8-50	200-300
2	Mill Rosa damasena	Early April to mid-July	15-22	250-375
3	Echinacea	Early March to early October	18-26	300-400
4	Lavandula angustifolia	Mid-April to late September	18-25	300-400

نتایج و بحث

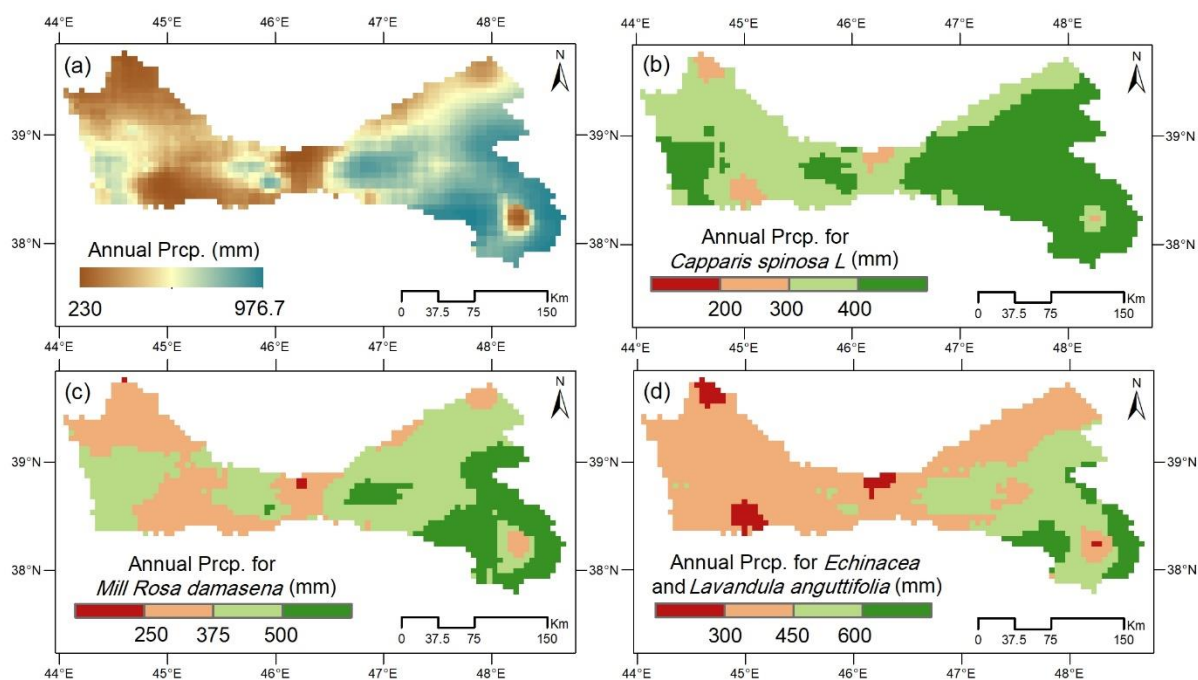
متغیرهای اقلیمی بارش برای گیاهان دارویی

در محدوده ۲۵۰ تا ۳۷۵ میلیمتر متغیر است. با این حال حداقل مقدار بارش مورد نیاز در تمامی بخش‌ها تامین می‌شود. در شکل ۲- د بارش سالانه مورد نیاز سرخارگل و اسطوخودوس به چهار کلاس تقسیم‌بندی شده است. حداقل بارش مورد نیاز این دو گیاه نیز ۳۰۰ میلیمتر در سال بوده که در این شکل بیشتر نواحی مورد بررسی حوضه در محدوده ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلیمتر متغیر بوده و بخش‌هایی در نیمه شرقی بارش بیشتر از ۴۵۰ میلیمتر بوده است. با این حال بر اساس این شکل تقریباً تمامی بخش‌های حوضه جوابگوی حداقل بارش مورد نیاز سالانه این دو گیاه می‌باشد.

متغیرهای اقلیمی دما برای گیاهان دارویی

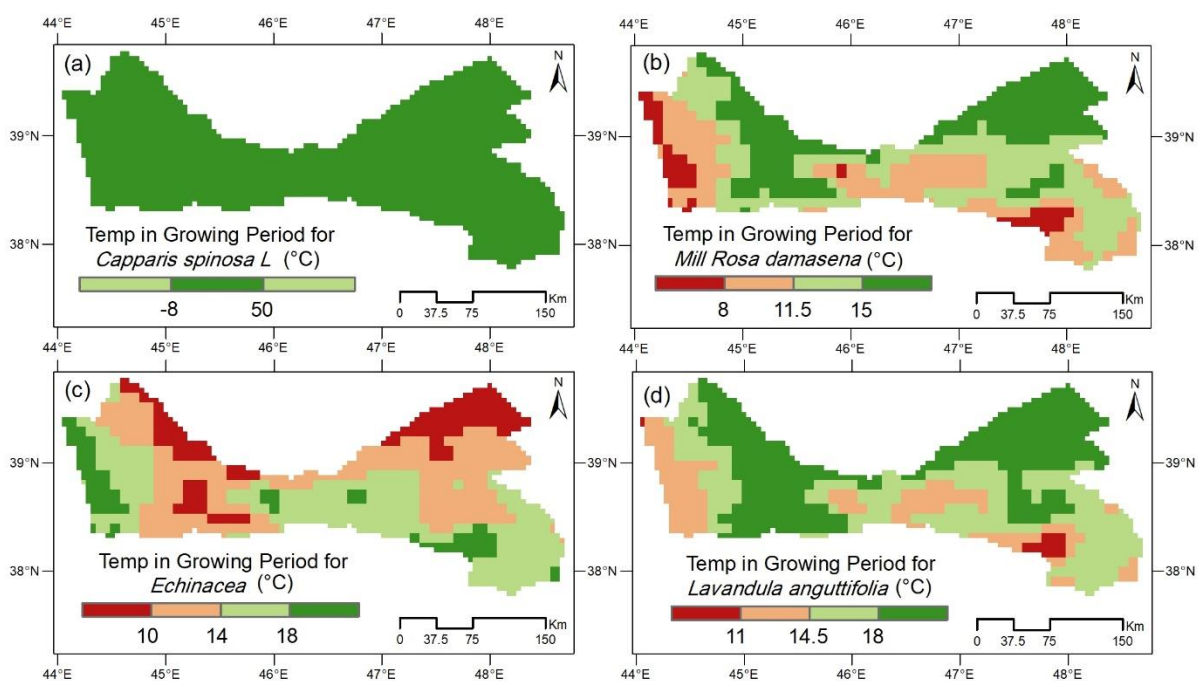
شکل ۳-الف توزیع دمای هوا بر اساس پایگاه داده ERA5 بر حسب درجه سلسیوس منطبق بر دوره رشد کور را نشان می‌دهد. مطابق این شکل دمای هوا در این دوره در بازه ۵/۵ تا ۲۱/۲ درجه متغیر است. دوره رشد کور منطبق بر اوایل اسفند تا اوایل مهر بوده و مقدار دمای مورد نیاز در بازه ۸- تا ۵۰ درجه متغیر است. با توجه به این طیف وسیع دمایی، این گیاه مقاوم به تغییرات دمایی بوده و تمامی بخش‌های حوضه جوابگوی نیاز دمایی دوره رشد خواهد بود.

شکل ۲- الف توزیع مکانی بارش سالانه بر اساس پایگاه داده CHIRPS را بر حسب میلیمتر در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دوره‌های رشد و مقدار بارش مورد نیاز هر دوره برای گیاهان دارویی مشخص نیست و تحقیقات جامعی در این زمینه وجود ندارد، بارش سالانه معیار ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۲(ب) بارش سالانه مورد نیاز گیاه کور در چهار کلاس تقسیم بندی شده است. حداقل مقدار بارش سالانه مورد نیاز ۲۰۰ میلیمتر در سال بوده که بر اساس این شکل کل محدوده حوضه جوابگوی این مقدار است. با این حال بارش‌های بیش از ۴۰۰ میلیمتر در نیمه شرقی حوضه غالب بوده و در نیمه غربی بارش در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتر متغیر است. در شکل ۲- ج بارش مورد نیاز سالانه برای کشت گل محمدی به چهار کلاس تقسیم‌بندی شده است. حداقل بارش مورد نیاز سالانه برای این گیاه ۲۵۰ میلیمتر در سال بوده که بر اساس این شکل محدوده حوضه جوابگوی این مقدار بارش نیز هست. بر اساس این شکل نیز نیمه شرقی حوضه بارش بیشتر از ۳۷۵ میلیمتر بوده ولی در نیمه غربی بارش در قسمت چشمگیری از حوضه



شکل ۲- (الف) توزیع مکانی بارش سالانه؛ (ب تا د) تقسیم‌بندی بارش برای کشت گیاهان دارویی کور، گل محمدی، سرخارگل و اسطوخودوس.

Figure 2- (a) Spatial distribution of annual precipitation; (b to d) Precipitation distribution for medicinal plant cultivation including *Capparis spinosa* L, *Mill Rosa damasena*, *Echinacea*, and *Lavandula angustifolia*.



شکل ۳- توزیع مکانی دمای هوا در دوره رشد و تقسیم‌بندی بر اساس دمای مورد نیاز برای (الف) کور، (ب) گل محمدی، (ج) سرخارگل، (د) اسطوخودوس.

Figure 3 - Spatial distribution of temperature during the growing period and classification based on the temperature required for (a) *Capparis spinosa* L, (b) *Mill Rosa damasena*, (c) *Echinacea*, (d) *Lavandula angustifolia*.

شکل ۳- ب تغییرات مکانی دمای هوا بر اساس پایگاه داده ERA5 منطبق بر دوره رشد گل محمدی را در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲ بر حسب درجه سلسیوس نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل دمای هوا در بازه ۳/۷ تا ۱۹/۹ سلسیوس متغیر است. شایان ذکر است دوره رشد گل محمدی بر اوایل فروردین تا اواسط تیر منطبق بوده و مقدار دمای مطلوب در

زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲ برحسب درجه سلیسیوس نشان می‌دهد. بر اساس این شکل دمای هوا در دوره رشد این گیاه در بازه ۸/۳ تا ۲۴/۴ متغیر است. لازم به ذکر است دوره رشد اسطوخودوس بر اواسط فروردین الی اواخر شهریور منطبق بوده و بازه دمایی مطلوب بین ۱۸ تا ۲۵ درجه قرار دارد. تقسیم‌بندی دمایی را در چهار کلاس نشان می‌دهد که دمای مطلوب با رنگ سبز نشان داده شده است.

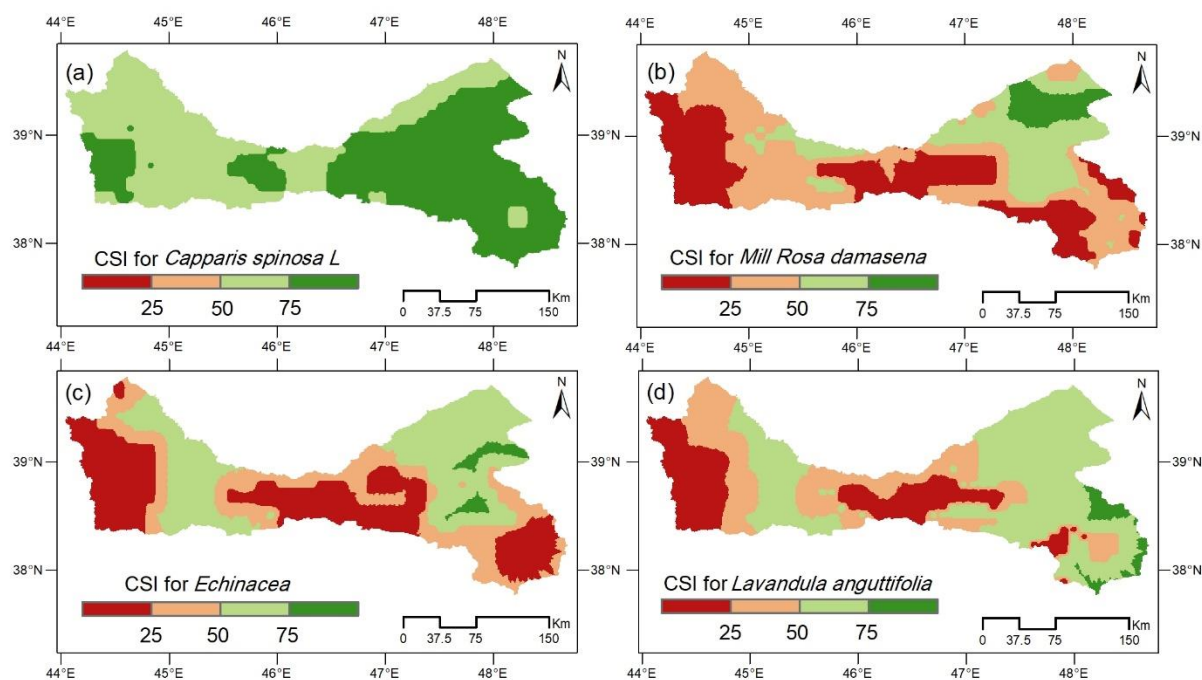
پتانسیل کشت گیاهان دارویی و بررسی عدم قطعیت

شکل ۴-الف توزیع مکانی پتانسیل کشت کور از دیدگاه اقلیمی شامل بارش مورد نیاز سالانه و دمای مورد نیاز دوره رشد را نشان می‌دهد. عبارت پتانسیل کشت از منظر اقلیم در ادامه تناسب اقلیمی خوانده خواهد شد. نتایج این شکل با استفاده از روش خوشه بندی فازی محاسبه شده است. بر اساس این شکل نیمه شرقی حوزه پتانسیل بالاتری نسبت به نیمه غربی دارد. شکل ۵-الف عدم قطعیت خوشه‌بندی را نشان می‌دهد که با توجه به عدم تغییرات چشمگیر پارامترهای اقلیمی، تغییری در توزیع عدم قطعیت مشاهده نمی‌شود.

بازه ۱۵ الی ۲۲ درجه سلیسیوس قرار دارد. بر اساس شکل بخش‌های شمالی در نیمه شرقی حوزه و بخش‌هایی در شمال و مرکز در در نیمه غربی در این محدوده جای دارد (ناحیه سبز رنگ). با حرکت به سمت قسمت‌های جنوبی و غربی حوزه از دمای مطلوب فاصله گرفته می‌شود.

شکل ۳-ج نقشه مکانی دمای هوا بر اساس پایگاه داده ERA5 منطبق با دوره رشد گیاه سرخارگل را در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل مشاهده می‌شود دمای هوا در بازه ۵/۵ تا ۲۱/۲ تغییر می‌کند. شایان ذکر است دوره رشد سرخارگل منطبق بر اوایل اسفند الی اوایل مهر بوده و دمای مطلوب در بازه ۱۸ الی ۲۶ درجه تغییر می‌کند. در شکل تغییرات دمای هوا در چهار کلاس تقسیم‌بندی شده و دمای مطلوب با رنگ سبز نشان داده شده است. مطابق این نقشه با حرکت به بخش‌های جنوبی و غربی پتانسیل دمایی به شدت کاهی می‌یابد.

شکل ۳-د نقشه تغییرات مکانی دمای هوا براساس پایگاه داده ERA5 منطبق با دوره رشد اسطوخودوس را در بازه



شکل ۴- پتانسیل اقلیمی کشت بر اساس روش خوشه‌بندی فازی برای (الف) کور، (ب) گل محمدی، (ج) سرخارگل، (د) اسطوخودوس.

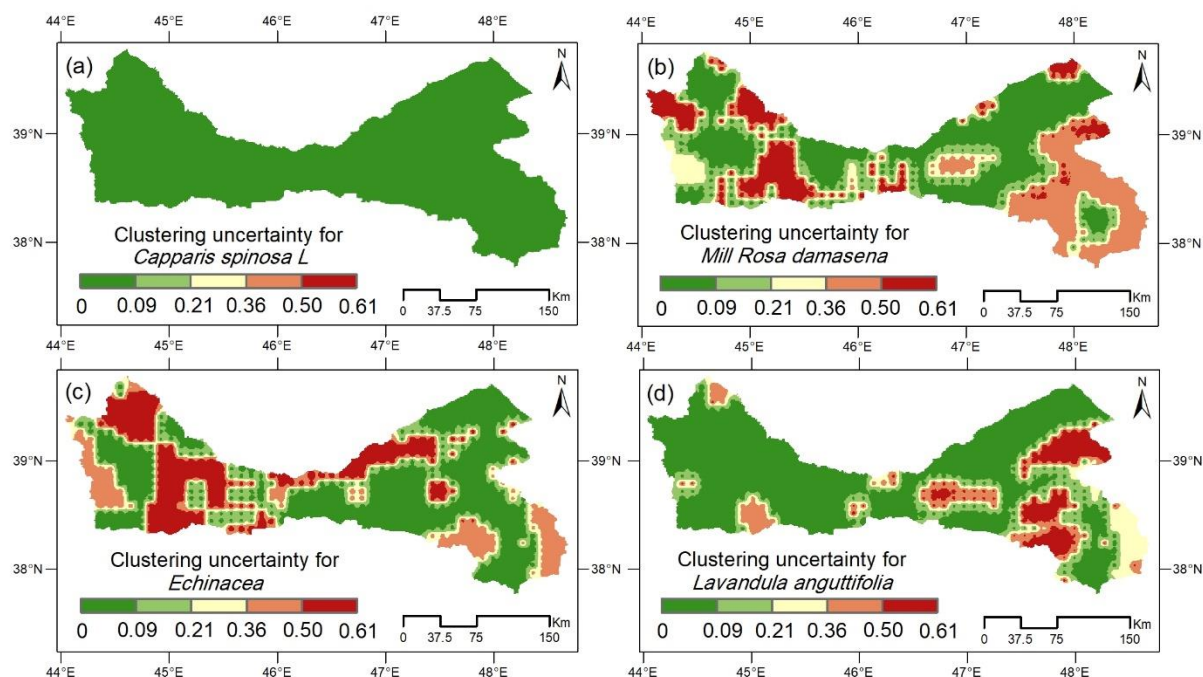
Figure 4 - Climatic potential of cultivation based on fuzzy clustering method for (a) *Capparis spinosa* L, (b) *Mill Rosa damasena*, (c) *Echinacea*, (d) *Lavandula angustifolia*.

شکل ۴- ب توزیع مکانی تناسب اقلیمی (شامل بارش سالانه و دمای دوره رشد) گل محمدی را بر اساس روش خوشه بندی فازی نشان می دهد. بر اساس این شکل در نیمه شرقی پتانسیل کشت بین ۵۰ تا ۷۵ درصد بوده و در نیمه غربی بیشترین پتانسیل کشت در محدوده ۲۵ تا ۵۰ درصد متغیر است. شکل ۵- ب مقدار عدم قطعیت کلاسه بندی تناسب اقلیمی را نشان می دهد که بر اساس این شکل در نیمه شرقی عدم قطعیت نسبت به نیمه غربی کمتر است.

شکل ۴- ج توزیع مکانی تناسب اقلیمی (شامل بارش سالانه و دمای دوره رشد) سرخارگل را بر اساس روش خوشه بندی فازی نشان می دهد. بر اساس این شکل در نیمه شرقی تناسب اقلیمی در محدوده بیش از ۵۰ درصد قرار دارد. در نیمه غربی

در شکل ۴- د تناسب اقلیمی (شامل بارش سالانه و دمای دوره رشد) اسطوخودوس با استفاده از روش خوشه بندی فازی ارائه شده است. براساس این شکل طیف وسیعی از نواحی حوضه در نیمه شرقی دشت در کلاس بالای ۵۰ درصد قرار گرفته است. همچنین در نیمه غربی در محدوده بالای ۵۰ درصد قرار دارد. شکل ۵- د نیز میزان عدم قطعیت کلاس های تناسب اقلیمی را نشان می دهد که در نیمه غربی مقدار عدم قطعیت کمتر از نیمه شرقی است.

شکل ۴- د توزیع مکانی تناسب اقلیمی (شامل بارش سالانه و دمای دوره رشد) اسطوخودوس را بر اساس روش خوشه بندی فازی نشان می دهد. بر اساس این شکل در نیمه شرقی تناسب اقلیمی در محدوده بیش از ۵۰ درصد قرار دارد. در نیمه غربی



شکل ۵- عدم قطعیت خوشه بندی برای (الف) کور، (ب) گل محمدی، (ج) سرخارگل، (د) اسطوخودوس.

Figure 4 - Clustering uncertainty for (a) *Capparis spinosa* L., (b) *Mill Rosa damasena*, (c) *Echinacea*, (d) *Lavandula angustifolia*.

تحلیل اقتصادی بر مبنای تحلیل سودآوری

تحلیل اقتصادی کشت گیاهان به عنوان یکی از جنبه های کلیدی در مدیریت کشاورزی و بهینه سازی تولیدات غذایی، نقش اساسی در برنامه ریزی و تصمیم گیری های اقتصادی ایفا می کند. تحلیل اقتصادی کشت گیاهان نه تنها برای کشاورزان بلکه برای سیاست گذاران و برنامه ریزان اقتصادی نیز اهمیت دارد. در دنیای امروز، جایی که تغییرات آب و هوایی، نوسانات

قیمت ها و نیاز به منابع پایدار به چالش های جدیدی تبدیل شده اند، انجام تحلیل های دقیق هزینه و درآمد می تواند به کشاورزان و مدیران کمک کند تا به بهترین نتایج ممکن دست یابند. از سوی دیگر، بررسی هزینه ها و درآمدها به کشاورزان این امکان را می دهد که استراتژی های بهینه تری را برای مدیریت منابع خود انتخاب کنند. با تحلیل دقیق هزینه ها، کشاورزان می توانند الگوهای مصرف آب، کود و سایر نهاده ها

را بررسی کرده و به کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی تولید بپردازند. بهره‌گیری از این تحلیل‌ها در سطح کلان می‌تواند شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری، به بهبود کیفیت زندگی در مناطق روستایی و افزایش امنیت غذایی کمک نماید.

پس از بررسی امکان سنجی کشت گیاهان دارویی، به تحلیل اقتصادی این محصولات بر مبنای هزینه و درآمد پرداخته می‌شود. در جداول ۳ تا ۵ نتایج حاصل از تحلیل سودآوری به تفکیک برای هر محصول ارائه شده است. لازم به ذکر است هزینه‌ها و درآمدهای ارائه شده در این جدول بر اساس شرایط اقتصادی سال ۱۴۰۳ به ازای هر هکتار محاسبه شده است. همچنین در محاسبه هزینه‌های ارائه شده، هزینه مربوط به اجاره زمین در نظر گرفته نشده است. متغیرهای تأثیرگذار در محاسبات نظیر مقادیر توان تولید به ازای هر هکتار یا قیمت فروش محصول به ازای یک کیلوگرم به صورت متوسط در نظر گرفته شده است.

براساس این جداول بالاترین نسبت سودآوری (نسبت درآمد به هزینه) مربوط به اسطوخودوس در سال چهارم برابر ۱۲/۶، سپس سرخارگل از سال دوم به بعد برابر ۵/۳ است. در بررسی گل محمدی نیز مقدار این نسبت در سال چهارم ۱/۶ و در سال هشتم ۴/۴ تخمین زده شد. در بررسی‌های اقتصادی فاکتورهایی نظیر استراتژیک بودن محصول و میزان مصرف آب نیز باید در نظر گرفته شود. در حالت کلی کشت گیاهان دارویی با توجه به دارا بودن نسبت سود به هزینه بالاتر و نیاز آبی کمتر پتانسیل بسیار بالایی برای سرمایه‌گذاری در منطقه دارند.

جدول ۳- تحلیل اقتصادی مبتنی بر هزینه و درآمد برای سرخارگل.

Table 3 - Economic analysis based on costs and revenues for Echinacea.

Cost (planting, growing and harvesting)	Type of income or expense
$3,000 \text{ kg/ha} \times 240,000 \text{ toman} = 720,000,000 \text{ toman}$	Income from the second year onwards (flowers and leaves)
134,000,000 toman	Cost (purchase of seedlings, plowing, fertilization and harvesting)
$\frac{720,000,000}{134,000,000} = 5.3$	Profitability ratio

جدول ۴- تحلیل اقتصادی مبتنی بر هزینه و درآمد برای گل محمدی.

Table 4 - Economic analysis based on costs and revenues for Mill Rosa damasena.

Cost (planting, growing and harvesting)	Type of income or expense
$1,000 \text{ kg/ha} \times 85,000 \text{ toman} = 85,000,000 \text{ toman}$	First year income (flowers and leaves)
$2,500 \text{ kg/ha} \times 85,000 \text{ toman} = 212,500,000 \text{ toman}$	Second year income (flowers and leaves)
$4,500 \text{ kg/ha} \times 85,000 \text{ toman} = 382,500,000 \text{ toman}$	Third year income (flowers and leaves)
$5,500 \text{ kg/ha} \times 85,000 \text{ toman} = 467,500,000 \text{ toman}$	Fourth year income (flowers and leaves)
$15,000 \text{ kg/ha} \times 85,000 \text{ toman} = 1,275,000,000 \text{ toman}$	Eighth year income (flower and leaf)
330,000,000 toman	Cost for the first year (purchase of seedlings, plowing, fertilizing and harvesting)
290,000,000 toman	Cost for the second year onwards (plowing, fertilizing and harvesting)
$\frac{85,000,000}{330,000,000} = 0.26$	Profitability ratio in the first year
$\frac{212,500,000}{290,000,000} = 0.73$	Profitability ratio in the second year
$\frac{382,500,000}{290,000,000} = 1.3$	Profitability ratio in the third year
$\frac{467,500,000}{290,000,000} = 1.61$	Profitability ratio in the fourth year
$\frac{1,275,000,000}{290,000,000} = 4.4$	Profitability ratio in the eighth year

جدول ۵- تحلیل اقتصادی مبتنی بر هزینه و درآمد برای اسطوخودوس.

Table 4 - Economic analysis based on costs and revenues for Lavandula angustifolia.

Cost (planting, growing and harvesting)	Type of income or expense
$600 \text{ kg/ha} \times 280,000 \text{ toman} = 168,000,000 \text{ toman}$	First year income
$1,700 \text{ kg/ha} \times 280,000 \text{ toman} = 476,000,000 \text{ toman}$	Second year income
$3,200 \text{ kg/ha} \times 280,000 \text{ toman} = 896,000,000 \text{ toman}$	Third year income
$3,700 \text{ kg/ha} \times 280,000 \text{ toman} = 1,036,000,000 \text{ toman}$	Fourth year income
144,400,000 toman	First year costs (purchase of seedlings, plowing, fertilization, irrigation and harvesting)
81,900,000 toman	Costs for the second to fourth years (plowing, fertilizing, irrigation, and harvesting)
$\frac{168,000,000}{144,400,000} = 1.2$	First year profitability ratio
$\frac{476,000,000}{81,900,000} = 5.8$	Second year profitability ratio
$\frac{896,000,000}{81,900,000} = 10.9$	Third year profitability ratio
$\frac{1,036,000,000}{81,900,000} = 12.6$	Fourth year profitability ratio

نتیجه گیری

بارش سالانه و دمای دوره رشد بوده و تمامی داده‌های اقلیمی توسط داده‌های ماهواره‌ای استخراج شده است. برای مقادیر بارش مورد نیاز، زمان دوره رشد و مقدار دمای مورد نیاز در این دوره از توصیه‌های موجود در نشریه‌های جهاد کشاورزی

در این پژوهش تناسب اقلیمی گیاهان دارویی شامل کور، گل محمدی، سرخارگل و اسطوخودوس در پهنه حوضه آبریز ارس برای شناسایی مناطق مستعد برای سرمایه‌گذاری در تولید این گیاهان ارزیابی شده است. متغیرهای اقلیمی شامل

استفاده شده و از روش خوشه‌بندی فازی برای استخراج تناسب اقلیمی استفاده شده است.

در ارزیابی تناسب اقلیمی گیاهان دارویی مشاهده شد کور سازگاری اقلیمی بیش از ۷۵ درصد در نیمه شرقی حوضه آبریز و بیش از ۵۰ درصد در نیمه غربی دارد. تناسب اقلیمی گل محمدی در نیمه شرقی حوضه در کلاس بیش از ۵۰ و ۷۵ درصد قرار گرفته است. نیمه غربی حوضه در کلاسهای زیر ۵۰ درصد واقع شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از تناسب اقلیمی سرخارگل و اسطوخودوس مشاهده شد که در بخش‌هایی در هر دو بخش نیمه شرقی و غربی کلاس‌های بین ۵۰ تا ۷۵ درصد مشاهده می‌شود. به طور خلاصه ترتیب کور، اسطوخودوس، سرخارگل و گل محمد را می‌توان به عنوان ترتیب تناسب اقلیمی برای کشت این گیاهان در نظر گرفت.

در تحلیل اقتصادی نسبت سودآوری می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب محصول برای سرمایه‌گذاری باشد. بر اساس نتایج مربوط به مقادیر این نسبت مشخص گردید این نسبت برای اسطوخودوس در سال چهارم ۱۲/۶، برای سرخارگل از سال دوم به بعد ۵/۳ است. در بررسی گل محمدی نیز مقدار این نسبت در سال چهارم ۱/۶ و در سال هشتم ۴/۴ تخمین زده شد. در بررسی‌های اقتصادی فاکتورهایی نظیر استراتژیک بودن محصول و میزان مصرف آب نیز باید در نظر گرفته شود. بنابراین کشت گیاهان دارویی با توجه به دارا بودن نسبت سود به هزینه بالا و نیاز آبی کم پتانسیل بسیار بالایی برای سرمایه‌گذاری در منطقه دارند.

به صورت کلی جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی نقش مهمی در توسعه یک شاخص جامع برای ارزیابی کشت گیاهان دارد. هنگام ارزیابی پتانسیل کشت گیاهان، ملاحظات اقتصادی مانند تقاضای بازار می‌تواند در تعیین اینکه کدام گونه‌ها برای بررسی بیشتر اولویت دارند، بسیار مهم باشد. با درک اهمیت اقتصادی این گیاهان، سیاستگذاران می‌توانند تصمیمات آگاهانه در مورد تخصیص منابع اتخاذ کنند. از دیدگاه زیست محیطی، تشخیص تأثیر بالقوه گیاهان معرفی شده بر گونه‌ها و اکوسیستم‌های بومی ضروری است. برخی از گونه‌های گیاهی ممکن است رفتار تهاجمی از خود نشان داده، با گیاهان بومی رقابت نموده و تعادل اکولوژیکی را مختل کنند.

بنابراین، ارزیابی دقیق تهاجم بالقوه یک گیاه برای حفاظت از تنوع زیستی و پایداری یک منطقه ضروری است. یکی دیگر از جنبه‌های زیست محیطی که در ارزیابی گیاه باید مورد توجه قرار گیرد، کیفیت و بافت خاک است. ویژگی‌های خاک می‌تواند به طور قابل توجهی بر رشد و بقای گیاهان و مناسب بودن کلی آنها برای یک محیط خاص تأثیر بگذارد. با در نظر گرفتن شرایط خاک، محققان می‌توانند محدودیت‌ها و فرصت‌های گونه‌های گیاهی در یک زیستگاه را بهتر درک کنند که منجر به ارزیابی کامل‌تر و جامع‌تر می‌شود. از جمله پیشنهادات برای مطالعات آینده می‌توان به تأثیر تغییر اقلیم بر کشت گیاهان دارویی و تلفیق جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی اشاره نمود.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت دانشگاه بناب تحت شماره قرارداد (۱۴۰۳/۱۶) انجام یافته است.

منابع

- پورمیدانی، ع.، توکلی نکو، ح.، قمقامی، م.، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی کشت چهار گونه دارویی در سطح دشت‌های حوضه آبریز دریاچه نمک براساس شاخص‌های اقلیمی و هیدروژئولوژیکی. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۳۷(۱): ۱۶۲-۱۷۷.
- تقی‌زاده، س.، نوید، ح.، فعله‌گری، ر.، فاخری فرد، ا.، ۱۳۹۲. تغییر الگوی کشت بهینه با توجه به ریسک و محدودیت‌های جدید اعمالی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان (مطالعه موردی مزرعه ۲۰۰ هکتاری در دشت دهگلان). دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۳(۱): ۷۱-۸۴.
- خوش‌سیما، ا.، عصری، ی.، بخشی‌خانکی، غ.، ادنایی، س. م.، ۱۳۹۶. مطالعه ویژگی‌های اکولوژیکی گونه کور *Capparis spinosa* L. در برخی از رویشگاه‌های استان قم. مجله پژوهشهای گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران) (علمی)، ۳(۳۰): ۵۷۱-۵۸۰.
- رحیمی مقدم، س.، ۱۴۰۲. ارزیابی اکولوژیک کشت گیاهان دارویی در مراتع مختلف استان لرستان. فصلنامه علوم محیطی، ۲۱(۳): ۲۴۹-۲۶۶.

Harish, B.S., Dandin, S.B., Umesha, K., Sasanur, A., 2012. Impact of climate change on medicinal plants - A review. *Anc. Sci. Life*, 32(Suppl 1): 1-3.

Isaaks EH, Srivastava RM., 1989. *Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press: New York.

Kalantari, M., Sadeghi Aghdam, F., Kaki, M., Asadzadeh, F., Byzedi, M., 2024. The vulnerability assessment of the aquifer of Dehgolan plain using Different Methods Based on Vegetation Changes. *Hydrogeology*, 9(1): 147-163. (In persion)

Khoshsima, E., Asri, Y., Bakhshi Khaniki, G., Adnani, S.M., 2017. Study of ecological characteristics of some *Capparis spinosa* L. habitats in Qom province. *J. Plant Res.*, 30(3): 571-580. (In persion)

Matsui, K., Kageyama, Y., 2022. Water pollution evaluation through fuzzy c-means clustering and neural networks using ALOS AVNIR-2 data and water depth of Lake Hosenko, Japan. *Ecol. Inform.*, 70: 101761.

Mehrabi, P., Behdani, M.A., Tajbakhsh, S.M., Mahmoudi, S., 2014. Zoning of climatic potentials of cultivation of licorice (*Glycyrrhiza glabra*) in Arak city. The 3rd National Congress on Organic and Conventional Agriculture, Ardebil, 20-21 August: 1-4.

Mirmohammadsadeghi, S.A., Alipoori, E., Alipour, A., 2019. Investigation of climatic adaptation of regions for *Rosa damascene* cultivation using network analysis method (case study: Isfahan province). *EWE*, 5(3): 264-275.

Peng, M., Liu, Y., Qadri, I. A., Bhatti, U. A., Ahmed, B., Sarhan, N. M., Awwad, E. M., 2024. Advanced image segmentation for precision agriculture using CNN-GAT fusion and fuzzy C-means clustering. *COMPUT ELECTRON AGR*, 226: 109431.

Pourhadian, H., 2017. Climatic zonation of rainfed cultivation of borage in Mazandaran province. The 1st National Conference of The role of medicinal plants in Resistive economy. Fereydunshahr, 27-28 April: 1-8.

Pourmeidanil, A., Tavakoli Neko, H., Ghamghami, M., 2021. Zoning the plains of Salt Lake catchment for cultivation of four medicinal plant species based on climatic and hydrological indicators. *IJMAPR*, 37 (1): 162-177. (In persion)

Rahimi-Moghaddam, S., 2023. Ecological evaluation of cultivating medicinal plants in different rangelands of Lorestan Province. *Environ. Sci*, 21(3): 249-266 (In persion)

Rajagopal, M., Kayikci, S., Abbas, M., Sivasakthivel, R., 2024. A Novel Technique for Leaf Disease Classification Using Legion Kernels with Parallel Support Vector Machine (LK-PSVM) and Fuzzy C Means Image Segmentation. *Heliyon*.

Razmjoo, M., Shahbazi, F., Jafarzadeh, A.A., Moghadam Vahed, M., 2016. Site Speciation of

رزم جو، م.، شهبازی، ف.، جعفر زاده، ع.ا.، مقدم واحد، م.، ۱۳۹۵. مکان‌یابی پهنه‌های مستعد کشت گل محمدی (مطالعه موردی: ایستگاه تولید بذر گیاهان دارویی و صنعتی سراب). *نشریه دانش آب و خاک*. ۲۶(۱): ۱۹۷-۲۱۲.

شیخ زاده، ع.، نخعی، م.، احمدی، ع.، ۱۴۰۳. راه کارهای پیشنهادی مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سطح ملی. *هیدروژئولوژی*، ۸(۲): ۱۱۵-۱۳۶.

علی‌خواه اصلی، م.، معمری، م.، ناصری، د.، مفتاحی، ش.، ۱۴۰۰. مکان‌یابی توسعه گیاه دارویی کاکوتی با استفاده از روش ANP Fuzzy در حوزه آبخیز سیلان استان اردبیل. *مرتع*، ۱۵(۱): ۱۵۶-۱۶۷.

کلانتری، م.، صادقی اقدم، ف.، کاکي، م.، اسدزاده، ف.، بایزیدی، م.، ۱۴۰۳. بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی دشت دهگلان با روش‌های مختلف بر مبنای تغییرات پوشش گیاهی. *هیدروژئولوژی*، ۹(۱): ۱۴۷-۱۶۳.

Reference

Alikhah Asl, M., Moameri, M., Naseri, D., Meftahi, S., 2021. Land suitability classification for development of *Ziziphora tenuior* using ANP Fuzzy at Ardabil province Iran. *Journal of Rangeland*, 15(1): 156-167. (In persion)

Asigbaase, M., Adusu, D., Anaba, L., Abugre, S., Kang-Milung, S., Acheamfour, S. A., Ackah, D. K., 2023. Conservation and economic benefits of medicinal plants: Insights from forest-fringe communities of Southwestern Ghana. *Trees, Forests and People*, 14: 100462.

Bezdek, J. C., Ehrlich, R., Full, W., 1984. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Comput and Geosci*, 10: 191-203.

Bezdek, J. C., 2013. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. *SSBM*.

Budak, M., Kılıç, M., Günal, H., Çelik, İ., Sırrı, M., 2024. Land suitability assessment for rapeseed potential cultivation in upper Tigris basin of Türkiye comparing fuzzy and boolean logic. *Ind Crops Prod*, 208: 117806.

Golaki, M., Gharehchahi, E., Mahmoudi, N., Rashidi, M., Azhdarpoor, A., 2024. Assessing water quality of kazerun county in southwest Iran: Multi-analytical techniques, deterministic vs. probabilistic water quality index, geospatial analysis, fuzzy C-means clustering, and machine learning. *Groundw. Sustain. Dev.*, 27: 101336.

Das, M., Jain, V., Makhotra, S.K., 2016. Impact of climate change on medicinal and aromatic plants: Review. *Indian J. Agric. Sci.*, 86(11): 1375-1382.

Susceptible Strata for Damask Rose Cultivation (Case Study: Sarab Medicinal and Industrial Plants Seed Production Station), JWSS, 26(1): 197-212. (In persion)

Roopashree, S., Anitha, J., Challa, S., Mahesh, T. R., Venkatesan, V. K., Guluwadi, S., 2024. Mapping of soil suitability for medicinal plants using machine learning methods Sci. Rep., 14(1): 3741.

Sadeghfam, S., Saghayeshi, H., Moazamnia, M., 2024a. Mapping cultivation potential index of rainfed wheat from climatic perspective using Shannon entropy catastrophe scheme. COMPUT ELECTRON AGR, 217: 108616.

Sadeghfam, S., Rahmani, M. S., Moazamnia, M., Morshedloo, M. R., 2024b. Mapping climate suitability index for rainfed cultivation of medicinal plants by developing an AI-based probabilistic framework. Sci. Rep., 14: 20413.

Sheikhzadeh, A., Nakhaei, M., Ahmadi, A., 2024. Suggested solutions for sustainable management of groundwater at the national level. Hydrogeology, 8(2): 115-136. (In persion)

Shen, T., Yu, H., Wang, Y. Z., 2021. Assessing the impacts of climate change and habitat suitability on the distribution and quality of medicinal plant using multiple information integration: Take *Gentiana rigescens* as an example. Ecological Indicators, 123: 107376.

Suganya, R., Shanthi, R., 2012. Fuzzy c-means algorithm-a review. Int J Sci Res, 2(11): 1.

Taghizadeh, S., Navid, H., fellegari, R., Fakheri fard, A., 2013. Changing of Optimum Cropping Pattern Analysis Considering Risk Factor and New Limitations of Kurdistan Regional Water Company (Case study: 200 Hectares of Farm Area in Dehgolan Field). J. Agric. Sci. Sust. Prod., 23(1): 71-84. (In persion)

Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., Pereira, P., 2022. Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. Sci. Total Environ., 806: 150718.

Zhang, L., Cao, B., Bai, C., 2016. Predicting suitable cultivation regions of medicinal plants with Maxent modeling and fuzzy logics: a case study of *Scutellaria baicalensis* in China. Environ. Earth Sci., 75: 361.

Zadeh, L. A., 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets Syst, 1(1): 3-28.

Zhong, L., Wu, X., Ding, R., Wang, C., Li, L., Zhang, J., Zhong, S., 2025. Perspectives on the application of remote sensing technology in the cultivation of medicinal plants. International Journal of Remote Sensing, 1-34.

ارزیابی کیفی آب‌های سطحی با استفاده از شاخص‌های (NSFWQI) و (IRWQIsc) در رودخانه کشکان لرستان

نرگس قلاوند^۱، آرتیمس قاسمی دهنوی^{۲*}، زینب احمدنژاد^۳

۱- کارشناسی ارشد زیست محیطی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران.

۲- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران.

۳- دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران.

* نویسنده مسئول Ghasemi.a@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

چکیده

رودخانه‌ها در صورت رها شدن پساب‌های شهری، صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی از جمله آسیب‌پذیرترین منابع آبی می‌توانند باشند. یکی از روش‌های بررسی کیفیت آب‌های سطحی، استفاده از شاخص‌های کیفی و آلودگی، به صورت یک عدد منفرد و بدون بعد است و هر عدد تفسیر مشخصه‌هایی از کیفیت آب می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه کشکان در استان لرستان، سرچشمه اصلی رودخانه کرخه است. در این تحقیق برای بررسی آلودگی رودخانه کشکان از نظر کیفی در سه نوبت (فصول تر و فصل خشک) نمونه‌برداری انجام گرفت. پارامترهای فیزیکی شامل کلی فرم مدفوعی (توتال و فکال) و شیمیایی شامل (BOD, EC, pH, P, NO₃, PO₄, COD, NTU) در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج توسط شاخص‌های IRWQI, NSFWQI و روش‌های آماری بررسی شدند. نتایج شاخص NSF نشان داد در سه دوره نمونه‌برداری غالب ایستگاه‌ها در رده متوسط (با عدد بین ۵۰-۷۰) قرار دارد. همچنین نتایج شاخص IRWQI نشانگر این است که ایستگاه‌های نمونه‌برداری در بازه نسبتاً خوب تا نسبتاً بد (با عدد بین ۳۰ تا ۷۰) قرار گرفته و اغلب در وضعیت خوب و متوسط قرار دارند. نتایج بیانگر این است که آب رودخانه کشکان برای کشاورزی مناسب بوده و در برخی ایستگاه‌ها از نظر میزان فسفات در شرایط نامناسب قرار دارد. فاکتورهای تعیین شده توسط تحلیل عاملی نشان‌دهنده وجود آلودگی با منشأ زمین‌زاد و انسان‌زاد در منطقه بوده که لازم است تدابیر کافی به منظور کنترل بهتر کیفیت آب رودخانه صورت پذیرد.

کلیدواژه: آب‌های سطحی، آلودگی، شاخص، کشکان.

مقدمه

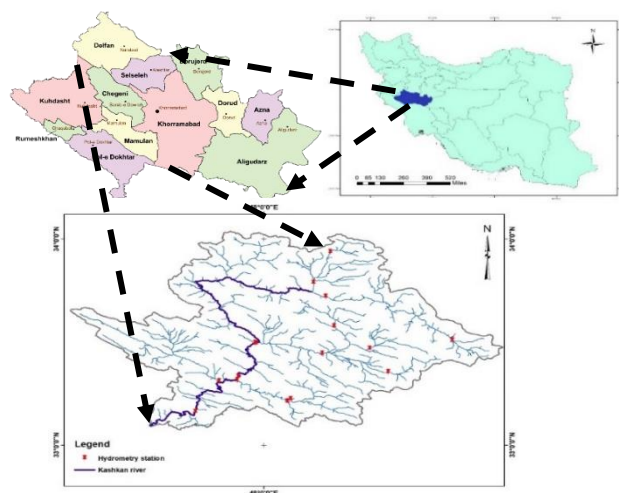
محبی، ۱۳۹۵؛ ندیری و صدقی، ۱۳۹۸)، از آن میان استفاده از «استانداردها و شاخص‌های کیفی آب‌های سطحی» یکی از پرکاربردترین و ساده‌ترین روش‌ها است (اسداله فردی و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلانتری، ۱۴۰۳). بهره‌گیری از شاخص‌های کیفی آب یکی از ابزارهای مهم برای تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب می‌باشد (حسین‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). با استفاده از شاخص‌های کیفی حجم زیاد اطلاعات نمونه‌برداری شده، از اندازه‌گیری‌های کیفی آب به صورت یک عدد منفرد و بدون بعد تبدیل می‌شود که این عدد در یک مقیاس درجه‌بندی شده،

رودخانه‌ها به عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده آب برای انسان و سایر موجودات به شمار می‌روند (جعفری و همکاران، ۲۰۱۰) و همچنین مهم‌ترین منابع حیاتی تأمین آب دریاها، دریاچه‌ها و در اکثر موارد اصلی‌ترین شریان‌های انتقال و توزیع آب بخش‌های صنعت، کشاورزی و شهری محسوب می‌شوند (رفیعی و همکاران، ۲۰۲۰). روش‌های مختلفی برای تحلیل اطلاعات کیفی آب‌های سطحی و پهنه‌بندی کیفی آن‌ها در سطح دنیا مورد مطالعه قرار گرفته است (اصغری مقدم و

شاخص NSFQI و IRWQISc و مقایسه دو شاخص با یکدیگر، پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه کشکان با استفاده از شاخص‌های کیفی و آلودگی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS.

موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز

حوضه‌ی آبریز کشکان از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده‌ی ۴۷ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی، در بخش میانی سلسه جبال زاگرس واقع شده و حدود یک سوم خاک لرستان را در بر می‌گیرد (لشنی زند، ۱۳۷۶) (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز رودخانه کشکان.

Figure 1- Geographical location of the Kashkan River basin.

نوبت به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد (انتخاب این دوره‌ها به‌دلیل اثر دوره‌های تر و خشک و یا به‌عبارتی اثر دوره‌های کم آبی و پرآبی رودخانه است). نمونه‌برداری دور اول در فروردین (فصل تر)، نمونه‌برداری دوم در آبان (فصل خشک) ۱۴۰۱ و نمونه‌برداری سوم (فصل تر) در خرداد ۱۴۰۲ انجام گرفت. در شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری و ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه کشکان نشان داده شده است.

پس از نمونه‌برداری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز شاخص‌های کیفی مورد آزمایش قرار گرفت. این پارامترها شامل: فاکتور اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)، فسفات (PO_4)، نیترات (NO_3)، کدورت (NTU)، کل جامدات محلول

دارای مفهوم و تعریف کیفی تفسیر شده‌ای است (جعفری سلیم، ۲۰۱۰). درمورد شاخص‌های کیفی مطالعاتی در سایر نقاط کشور صورت گرفته است از آن جمله می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲)، ظهراپی و همکاران در سال ۱۳۹۳، یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) و امین‌پور شینانی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره نمود.

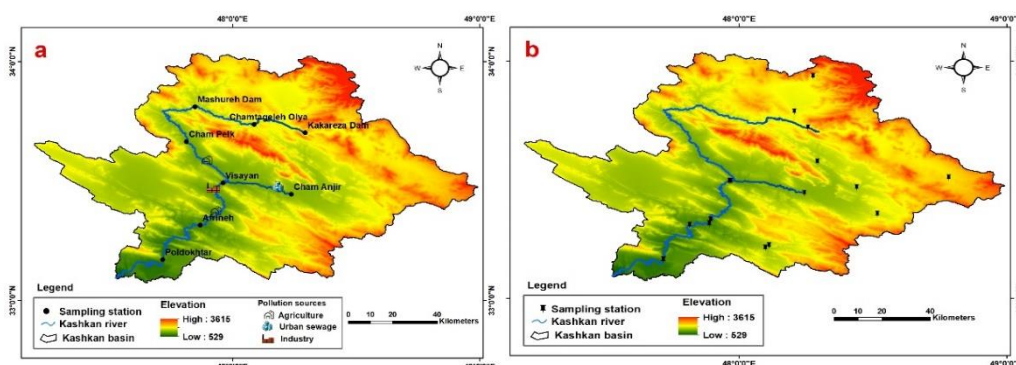
هدف از این پژوهش بررسی کیفی رودخانه کشکان با استفاده از شاخص‌های کیفی و استانداردهای موجود است. اهداف جزئی این پژوهش شامل موارد زیر است: اندازه‌گیری برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کیفیت آب در حوزه‌آبریز کشکان، بررسی روند پارامترهای کیفی در حوزه آبریز کشکان، مشخص شدن شاخص کیفیت آب رودخانه با دو

مواد و روش‌ها

در این مطالعه به‌منظور بررسی وضعیت کیفی رودخانه کشکان (بررسی شاخص‌های کیفی - آلودگی) تعدادی ایستگاه نمونه‌برداری بر روی رودخانه انتخاب گردید. ایستگاه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تأثیر منابع آلاینده در منطقه و کیفیت آب در کل مسیر را به‌خوبی بازگو کنند. انتخاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری بر اساس مطالعات پیشین، وضعیت خروجی زیرحوضه‌ها، امکان دسترسی، توزیع مناسب و نظر کارشناسان آب منطقه‌ای و لزوم نمونه‌برداری از برخی نقاط خاص صورت گرفت. نمونه‌برداری در عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. تعداد نمونه‌برداری‌ها در سه نوبت صورت گرفت که یک

معرف اریوکروم بلک تی، سختی آب اندازه‌گیری شد (روش استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب، ۲۱۱۲). برای اندازه‌گیری BOD مقدار ۳۰۰ میلی‌لیتر نمونه داخل ظرف‌های مخصوص دستگاه BOD سنج قرار داده شد و دستگاه برای ۵ روز تنظیم گردید. سپس به هر ویال ۴ سی‌سی نمونه + ۱/۵ سی‌سی محلول هضم + ۳/۵ سی‌سی اسید COD اضافه گردید، و نمونه‌ها در دستگاه الکتروترمال (۱۵۰ درجه به مدت ۲ ساعت) قرار گرفتند. در نهایت طول موج نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۶۰۰ nm قرائت شد. در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل نتایج از روش‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel استفاده شد. طبقه‌بندی کیفی آب رودخانه بر اساس روش شاخص‌های IRWQIsc و NSFQI ارزیابی شد. همچنین اقدام به پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه کشکان با استفاده از شاخص‌های کیفی و آلودگی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS گردید.

(TDS)، دما، pH، کلیفرم کل (C.F) و هدایت الکتریکی (EC) در ایستگاه‌های نمونه‌برداری مورد سنجش بودند. پارامترهای دبی (توسط دستگاه مولینه) و T در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد و دیگر پارامترها جهت سنجش به آزمایشگاه منتقل شدند. برای انجام آزمایش پارامترهای فیزیکی (ساخت توتال و فکال) از محیط کشت لوریل سولفات برات استفاده شد. نمونه‌برداری و تمام آزمایشات فیزیکی و شیمیایی براساس روش‌های استاندارد ارائه شده در کتاب استاندارد متد انجام گرفت. کدورت نیز توسط کدورت‌سنج مدل HACH ۲۱۰۰ اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری یون فسفات و نیترات از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل LAMBDA ۴۵ ساخت شرکت ELMER PERKIN انگلستان استفاده شد. نیترات به روش مشتق و فسفات به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری گردید و کل جامدات محلول نیز به روش تعیین جامدات محلول در ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. روش کمپلکسومتری برای اندازه‌گیری سختی کل به کار برده شد. در این روش با استفاده از محلول استاندارد EDTA و تامپون و همچنین



شکل ۲- الف) موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری به همراه موقعیت برخی از منابع آلودگی و ب) ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه کشکان (بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۴۷).

Figure 2- A) Location of sampling stations and some pollution sources, B) Hydrometric stations of the Kashkan basin (Time period 1968-2019).

هر کدام وزنی داده خواهد شد، که این وزندهی از عدد ۰/۱۷ برای غلظت اکسیژن محلول تا ۰/۰۷ برای غلظت کل جامدات محلول تغییر می‌کند. این شاخص از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n I_i W_i \quad (1)$$

در رابطه I_i مقدار شاخص مربوط به پارامترهای کیفی از منحنی رتبه بندی‌شان و W_i ضریب وزنی مربوط به آن پارامتر است. برای محاسبه‌ی میزان ارزش کیفی اکسیژن محلول اول باید درصد اشباع اکسیژن محلول را محاسبه کرد، لذا میزان اکسیژن اندازه‌گیری شده را به ماکزیمم اکسیژن محلول در

شاخص NSFQI

شاخص شاخص کیفیت آب مؤسسه بهداشت ملی هست و یک ابزار ریاضی برای تبدیل اطلاعات شاخصه‌بندی آب به یک عدد ساده بدون واحد است که این عدد نشان‌دهنده سطح کیفیت آب است. این شاخص ۹ پارامتر کیفیت آب را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ این ۹ پارامتر شامل اکسیژن محلول (DO)، کلیفرم مدفوعی (Coliform Fecal)، pH، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD5)، تغییرات دما (ΔT)، فسفات کل (Phosphate)، نیترات (NO₃)، کدورت (Turbidity)، کل جامدات محلول (TDS) است. براساس اهمیت پارامترها به

$$\gamma = \sum_{i=1}^n W_i \quad (3)$$

کیفیت آب رودخانه یا دریاچه با شاخص IRWQISC دو گروه بیشتر از شاخص NSFQWI یعنی به هفت محدوده‌ی بسیار خوب، خوب، نسبتاً خوب، متوسط، نسبتاً بد، بد و بسیار بد طبقه‌بندی می‌شود (آقایی و همکاران، ۲۰۲۰).

نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی بهتر رودخانه کشکان در نوبت دوم (فصل خشک) و سوم (فصل تر) نمونه‌برداری اقدام به اندازه‌گیری دبی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری با دستگاه مولینه شد. در نمونه-برداری نوبت دوم بیشترین دبی اندازه‌گیری شده مربوط به ایستگاه ویسیان به مقدار ۳/۶۹ مترمکعب بر ثانیه و کمترین مقدار دبی در ایستگاه سد معشوره به مقدار ۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در نمونه‌برداری سوم بیشترین دبی مربوط به ایستگاه ۹ (پلدختر) به مقدار ۲۰/۲ متر مکعب بر ثانیه و کمترین دبی مربوط به ایستگاه ۱ (بندکاکارضا) به مقدار ۴/۲ متر مکعب بر ثانیه بوده است.

داده‌های جدول ۲ بیانگر این مطلب است که دبی نوبت سوم در مقایسه با نوبت دوم افزایش چشم‌گیری داشته است، این امر به‌دلیل افزایش میزان بارندگی در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ نسبت به ۱۴۰۱-۱۴۰۰ می‌باشد. متوسط بارندگی مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبریز کشکان در شکل ۳ نشان داده شده است، با توجه به شکل افزایش میزان بارندگی در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مشخص است. همچنین با توجه به داده‌های جدول ۳ لازم به ذکر است که افزایش بارندگی در نوبت سوم نمونه‌برداری (فصل تر) نسبت به نوبت دوم (فصل خشک) بارز می‌باشد و این افزایش به حدی آشکار بود که نمونه‌برداری آب رودخانه نیز با مشکلاتی همراه شد.

دمای نمونه‌برداری تقسیم و در صد ضرب می‌گردد (پورشانی و همکاران، ۱۳۹۵). کیفیت آب رودخانه یا دریاچه با شاخص NSFQWI به پنج محدوده عالی، خوب، متوسط، بد و بسیار بد (جدول ۱) طبقه‌بندی می‌شود.

جدول ۱- طبقه‌بندی کیفیت آب رودخانه یا دریاچه با شاخص NSFQWI

Table 1- Classification of river or lake water quality with NSFQWI index.

Water quality	Index range	Group
Excellent	90-100	1
Good	70-90	2
Moderate	50-70	3
Bad	25-50	4
Very bad	0-25	5

شاخص IRWQI

شاخص پارامترهای متداول کیفیت منابع آب سطحی ایران IRWQISC از ۱۱ پارامتر برای تعیین شاخص استفاده می‌کند. ۷ پارامتر آن همانند روش مؤسسه بهداشت ملی است (NTU pH, PO₄, DO, NO₃, BOD, C.F (Coliform), Turbidity) و پارامترهای آمونیوم (NH₄)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Demand Oxygen Chemical)، سختی کل (Total Hardness) و هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity) اضافه شده‌اند. در این شاخص نیز هر پارامتر وزن خاصی دارد و مقدار هر شاخص برای هر پارامتر با استفاده از منحنی رتبه‌بندی‌اش به‌دست می‌آید. این شاخص از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شد.

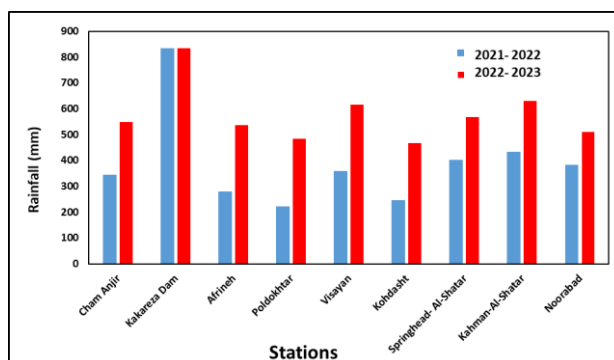
$$IRWQISC = [\prod_{i=1}^n I_i W_i]^{1/\gamma} \quad (2)$$

که در آن n تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی و W_i وزن پارامتر i ام می‌باشد و γ از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

جدول ۲- دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نوبت دوم (فصل خشک) و نوبت سوم (فصل تر).

Table 2- Measured discharge of stations in the second (dry season) and third (wet season) periods.

Number	Station	Second Discharge (m ³ /s)	Third Discharge (m ³ /s)
1	Kakareza Dam	0.40	4.2
2	Chamtageleh Olya	0.46	7.5
3	Mashureh Dam	0.12	7
4	Cham Pelk	0.41	8.2
5	Cham Anjir	0.57	4.5
6	Visayan Doab	2.75	15.3
7	Visayan	3.69	16.3
8	Afrineh	0.49	17.2
9	Poldokhtar	0.67	20.2



شکل ۳- میانگین آمار بارندگی در ایستگاه‌های هواشناسی سال‌های آبی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲.

Table 3- Average rainfall of meteorological stations for the water years 2021-2022 and 2022-2023.

جدول ۳- میانگین آمار بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی در فصل خشک سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و فصل تر سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲.

Table 3- Average rainfall of meteorological stations in the dry season of 2021-2022 and the wet season of 2022-2023.

Station	2021-2022			2022-2023		
	June	July	August	March	April	May
Noorabad	0	0	0	113.5	44	6.5
Kahman-Al-Shatar	0	1	0	150	38.5	2.5
Springhead- Al-Shatar	0	0	0	156	25	10
Kakareza Dam	200	36	7	159	133	8
Khorramabad- Cham Anjir	0	0	0	119	27	1
Visayan	0	0	0	150	27	0
Poldokhtar	0	0	0	139	15	1
Afrineh	0	1.5	0	142	16.5	0
Kohdasht	0	0	0	130.5	37.5	2
Average rainfall (mm)	22.22	4.28	0.78	139.89	40.39	3.44

عددی شاخص کیفیت آب که در بازه ۷۰-۵۰ قرار گرفته‌اند لذا کیفیت آب در رده متوسط و با رنگ زرد نشان داده شده است. قرار گرفتن آب در این رده نشان‌دهنده این مطلب است که در صورت استفاده از این آب جهت تأمین آب شرب نیازمند تصفیه پیشرفته است. از طرف دیگر این آب مناسب برای پرورش شیلات و گونه‌های مقاوم آبی و نیز مناسب برای شرب حیوانات اهلی می‌باشد.

به‌منظور تعیین کیفیت آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری بر اساس شاخص NSF با استفاده از سایت مؤسسه تحقیقات آب به‌صورت آنلاین به آدرس زیر اقدام به محاسبه هر زیر شاخص و در نهایت محاسبه شاخص کل گردید (<https://www.water-research.net/watrqualindex/index.htm>). در جدول ۴ محاسبه هر زیر شاخص برای هر نمونه در نوبت اول نشان داده شده است وضعیت آب در ایستگاه‌های موجود بر اساس شاخص NSF اراده گردیده است. در همه ایستگاه‌ها با توجه به مقدار

جدول ۴- مقادیر زیر شاخص NSFQI هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص NSFQI در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نوبت اول.

Table 4 - NSFQI sub-index values for each parameter and numerical values of the NSFQI index at the first sampling stations.

Station	pH	NTU	BOD (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	C.F (Coliform) -	T (°C)	TDS (mg/l)	NSF
1	92	43	67	95	27	54	67	44	62
2	92	87	56	56	7	63	36	63	57
3	93	82	61	59	49	60	31	62	62
4	93	83	67	56	61	60	31	61	64
5	92	79	56	66	19	52	29	20	53
6	92	84	95	64	7	49	26	20	56
7	93	83	80	56	58	51	20	20	59
8	93	84	80	86	7	54	20	20	57
Weights	0.11	0.08	0.11	0.1	0.1	0.16	0.1	0.07	-

جدول ۵- مقادیر زیر شاخص NSFQWI هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص NSFQWI در ایستگاه‌های نمونه‌برداری دوم.

Table 4 - NSFQWI sub-index values for each parameter and numerical values of the NSFQWI index at the second sampling stations.

Station	pH	NTU	BOD (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	C.F (Coliform)	T (°C)	TDS (mg/l)	NSF
1	92	89	56	96	60	22	40	63	78
2	92	73	56	96	52	17	40	61	58
3	93	76	95	97	57	34	27	58	65
4	93	80	61	97	53	34	27	56	61
5	89	85	20	95	21	17	27	20	45
6	88	88	9	95	10	17	29	20	42
7	92	90	5	96	28	37	26	20	48
8	90	76	34	96	24	37	24	20	50
9	92	66	42	97	51	37	22	20	53
Weights	0.11	0.08	0.11	0.1	0.1	0.16	0.1	0.07	-

با توجه به جدول ۵ طبقه‌بندی کیفی آب از نظر شاخص کیفی و پلدختر در رده متوسط و ایستگاه‌های چمنجیر، دوآب NSFQWI، رودخانه کشکان در ایستگاه بندکاکارضا در رده ویسیان و ویسیان در رده بد قرار دارند. خوب، ایستگاه‌های چمنکله‌علیا، سدمعشوره، چمن پلک، آفرینه

جدول ۶-مقادیر زیر شاخص NSFQWI هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص NSFQWI در ایستگاه‌های نمونه‌برداری سوم.

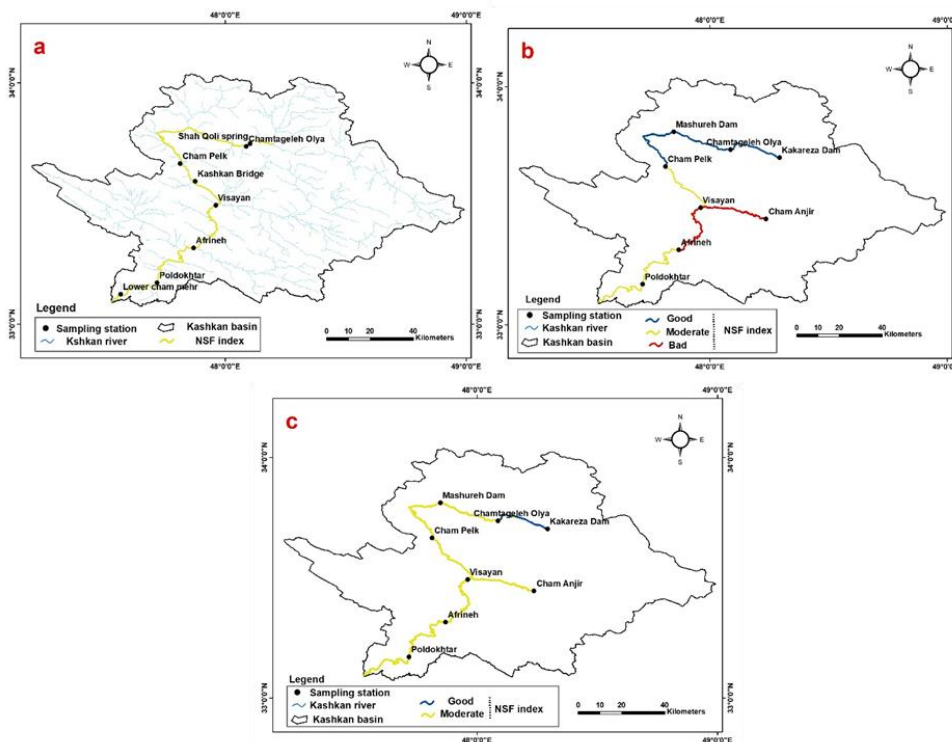
Table 4 - NSFQWI sub-index values for each parameter and numerical values of the NSFQWI index at the third sampling stations.

Station	pH	NTU	BOD (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	C.F (Coliform)	T (°C)	TDS (mg/l)	NSF
1	80	44	80	97	26	60	26	65	73.47
2	72	47	54	52	9	63	25	67	63.93
3	70	95	56	96.5	41	63.2	17	70	67.12
4	55	69	56.5	96.3	42	63.1	17	58	62.67
5	93	94	55	80	28	56.1	23	50	69.97
6	87	93.5	51	82	12	54	16	56	60.52
7	88	76	78	84	26.2	58	16	20	61.96
8	88	62	80	98	28	56	16	20	62.3
9	90	52	79	98.2	17	55	16	20	60.37
Weights	0.11	0.08	0.11	0.1	0.1	0.16	0.1	0.07	-

باتوجه به جدول ۶، کیفیت آب از نظر شاخص NSFQWI در ایستگاه اول (بندکاکارضا) در وضعیت خوب و در بقیه ایستگاه‌های نمونه‌برداری در وضعیت متوسط قرار دارد. کیفیت آب در ایستگاه ۵ (چمن انجیر) متوسط نزدیک به خوب است.

پهنه‌بندی رودخانه کشکان با استفاده از شاخص NSFQWI

با توجه به طبقه‌بندی رودخانه بر اساس میزان آلودگی توسط شاخص NSFQWI، نقشه‌های پهنه‌بندی رودخانه کشکان توسط نرم‌افزار GIS ترسیم شد (شکل ۴). با توجه به پهنه‌بندی صورت گرفته مشاهده می‌گردد که به‌طور کلی در فصول تر (نوبت اول و سوم) کیفیت آب در حد متوسط بوده و در فصل خشک کیفیت در رده‌های خوب تا بد قرار گرفته است.



شکل ۴- مقایسه پهنه‌بندی رودخانه کشکان بر اساس شاخص NSF ایستگاه‌های نمونه‌برداری الف) نوبت اول (فصل تر)، ب) نوبت دوم (فصل خشک) و ج) نوبت سوم (فصل تر).

Figure 4- Comparison of the zoning of the Kashkan River based on the NSF index of sampling stations A) First period (wet season), B) Second period (dry season) and C) Third period (wet season).

شاخص IRWQIsc

جدول ۷- مقادیر زیر شاخص برای هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص IRWQIsc در ایستگاه‌های نمونه‌برداری اول.

Table 7 - Sub-index values for each parameter and numerical values of the IRWQIsc index at the first sampling stations.

Station	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	EC (μs/cm)	NTU	pH	C.F	TDS (mg/l)	IRWQI
1	27	95	67	85	65	43	92	54	44	60.09
2	7	56	56	84	82	87	92	63	63	53.93
3	49	59	61	82	80	82	93	60	62	66.43
4	69	56	67	85	79	83	93	60	61	69.53
5	19	66	56	80	60	79	92	52	20	51.95
6	7	64	95	90	54	84	92	49	20	49.94
7	58	56	80	89	55	83	93	51	20	60.47
8	7	86	80	88	50	84	93	54	20	50.69
Weights	0.087	0.108	0.117	0.093	0.096	0.062	0.051	0.140	0.059	-

جدول ۷ نشان‌دهنده‌ی این است که از نظر شاخص IRWQIsc ایستگاه‌های نمونه‌برداری ۱، ۳، ۴ و ۷ (چشمه شاه قلی، چم پلک، پل کشکان و پلدختر) در وضعیت نسبتاً خوب و ایستگاه‌های ۲، ۵، ۶ و ۸ (چمتکله علیا، ویسیان، آفرینه و چم‌مهر پایین) در وضعیت متوسط قرار دارند.

جدول ۸- مقادیر زیر شاخص برای هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص IRWQIsc در ایستگاه‌های نمونه‌برداری دوم.

Table 7 - Sub-index values for each parameter and numerical values of the IRWQIsc index at the second sampling stations.

Station	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	EC (μs/cm)	NTU	pH	C.F	TDS (mg/l)	IRWQI
1	60	96	56	81	83	89	92	63	22	60.77
2	52	96	56	82	80	73	92	61	17	56.09
3	57	97	95	90	78	76	93	58	34	69.50
4	53	97	61	87	75	80	93	56	34	64.24
5	21	95	20	50	67	85	89	20	17	37.77

6	10	95	9	26	53	88	88	20	17	28.12
7	7	96	5	18	56	90	92	20	37	27.60
8	24	96	34	62	43	76	90	20	37	45.69
9	51	97	42	72	39	66	92	20	37	50.93
Weights	0.087	0.108	0.117	0.093	0.096	0.062	0.051	0.059	0.140	-

جدول ۸ بیانگر این است که کیفیت آب از نظر شاخص IRWQIsc در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ (بندکاکارضا، چمتکله علیا، سدمعشوره و چم پلک) در وضعیت نسبتاً خوب، ایستگاه‌های ۸ و ۹ (آفرینه و پلدختر) در وضعیت متوسط، ایستگاه ۵ (چم انجیر) در وضعیت نسبتاً بد و ایستگاه‌های ۶ و ۷ (دوآب و یسیان و ویسیان) در وضعیت بد قرار دارند.

جدول ۹-مقادیر زیر شاخص برای هر پارامتر و مقادیر عددی شاخص IRWQIsc در ایستگاه‌های نمونه‌برداری سوم.

Table 7 - Sub-index values for each parameter and numerical values of the IRWQIsc index at the third sampling stations.

Station	PO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	EC (μs/cm)	NTU	pH	C.F	TDS (mg/l)	IRWQI
1	9	58	77	87	81	47	43	84	70	56.27
2	4	10	57	85	84	50	38	87.5	68	39.25
3	23	64	60	82	86	84	36	87	66	62.99
4	24.5	64.2	68	85.5	77	66	33	87.2	64	62.44
5	10.2	36	59	79	70	83.2	56	80	63	52.34
6	5	41	54	81	75	83	51	77.2	63.5	48.68
7	8.5	44	75	90.2	53	67	52	79	40	50.67
8	10	75	77	90	12	58	52	81	24	44.61
9	6	75.2	74	91	10	52	52.2	77	23	40.36
Weights	0.087	0.108	0.117	0.093	0.096	0.062	0.051	0.140	0.059	-

با توجه به جدول ۹ در نمونه‌برداری نوبت سوم کیفیت آب براساس شاخص IRWQI در سه رده قرار گرفته است. در ایستگاه‌های ۱، ۳ و ۴ (بندکاکارضا، سدمعشوره و چم پلک) آب از نظر کیفیت در وضعیت نسبتاً خوبی قرار دارد و در ایستگاه‌های ۵، ۶ و ۷ (چم انجیر، دوآب و یسیان و ویسیان) وضعیت کیفی آب متوسط است. در ایستگاه‌های ۲، ۸ و ۹ (چمتکله علیا، آفرینه و پلدختر) وضعیت کیفی آب از نظر شاخص IRWQI در حالت نسبتاً بد قرار دارد.

بررسی استانداردهای کیفی آب

به‌منظور بررسی وضعیت آب رودخانه کشکان در این مرحله، نتایج آنالیز صورت گرفته در نوبت اول، دوم و سوم با استانداردهای موجود مقایسه گردید (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- نتایج آنالیز پارامترهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری (نوبت اول، دوم و سوم) با استانداردهای کیفی.

Table 10 - Results of parameters measured at sampling stations (first, second and third periods) with quality standards.

Station	PO ₄ (mg/l)			NO ₃ (mg/l)			BOD (mg/l)			NTU			pH			C.F			TDS (mg/l)		
	Period			Period			Period			Period			Period			Period			Period		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.99	0.5	2.1	2.10	0.53	2	3	5	3.4	43.40	3.66	43	7.51	7.21	6.7	4.3	1100	38	418.6	275.6	271.05
2	8.76	0.66	6.4	7.90	0.6	8	5	5	5.9	4.44	11.7	37	7.59	7.19	6.53	20	2400	20	270.4	286.65	258.05
3	0.73	0.56	0.97	6.30	0.4	1.57	4	1	5.1	6.89	10.17	2	7.40	7.32	6.4	26	290	23	283.4	309.4	236.6
4	0.42	0.65	0.8	7.80	0.46	1.4	3	4	4	6.68	7.84	14	7.39	7.37	6.1	27	290	22	286	328.9	319.8
5	3.60	2.95	1.84	4.80	1.52	3.8	5	15	5.7	8.59	5.26	3	7.52	7.07	7.3	53	2400	41	505.05	559.65	371.15
6	9.60	6.1	4.97	5.20	1.62	3.1	1	23	6	6.21	3.9	3.5	7.58	7.02	7	64	2400	45	648.7	638.3	337.35
7	0.54	7.82	1.95	7.60	1.37	2.9	2	46	3	6.40	2.95	11	7.45	7.19	7.1	54	210	48	637	585.65	601.25
8	8.34	2.58	1.8	3.20	0.73	1.3	2	10	3.4	5.85	9.98	20	7.41	7.12	7.1	44	210	40	744.9	988.65	1042.6
9	-	0.68	4.1	-	0.32	1.2	-	8	2.9	-	15.7	32	-	7.26	7.2	-	210	46	-	1123.2	1117.35

۱-آلودگی باکتریایی که از طریق ضدعفونی کردن برطرف می‌شود (۰-۲۰ میلی‌لیتر).

۱-کلی‌فرم مدفوعی

با توجه به استانداردهای موجود، تقسیم‌بندی آلودگی

۲-آلودگی باکتریایی که نیاز به روش‌های تصفیه پی در پی (انعقاد، صاف کردن و ضدعفونی) دارد (۲۰-۲۰۰۰ میلی‌لیتر).

باکتریایی آب‌های خام در ۴ رده صورت گرفته است.

در حد مجاز استاندارد ملی ایران قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که ایستگاه‌های نمونه‌برداری سوم (فصل تر) از نظر کدورت بر اساس استاندارد کیفی WHO، ایستگاه‌های سدمعشوره و چمانجیر در حد مجاز قرار دارند و سایر ایستگاه‌ها دارای مقادیر بیش از حد مجاز هستند. از دیدگاه کشاورزی همه نمونه‌ها در حد مجاز استاندارد ملی ایران قرار دارند (جدول ۱۰).

۳- pH

نتایج مقایسه پارامتر pH بر اساس استاندارد ملی و WHO (حد مجاز استاندارد ملی ایران برای کشاورزی ۸/۵-۶، برای شرب ۸/۵-۶/۵ و استاندارد WHO برابر ۸/۵-۷ است) نشان می‌دهد که از دیدگاه استاندارد WHO، شرب و کشاورزی همه نمونه‌ها در نوبت اول دارای pH کمتر از ۸/۵ هستند و لذا در حدود مجاز تعیین شده قرار دارند. نتایج نوبت دوم بیان می‌کند که از دیدگاه استاندارد WHO، شرب و کشاورزی همه نمونه‌ها دارای pH کمتر از ۸/۵ هستند و لذا در حدود مجاز تعیین شده قرار دارند. در نوبت سوم (فصل تر) بررسی نتایج حاصل از آنالیز pH، از دیدگاه استاندارد WHO، شرب و کشاورزی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان‌دهنده‌ی این است که همه نمونه‌ها دارای pH کمتر از ۸/۵ هستند و همه‌ی نمونه‌ها در حد مجاز تعیین شده قرار دارند.

۴- کل جامدات محلول

بررسی TDS در منطقه و نقاط اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که از نظر استاندارد ملی آب ایران برای شرب (۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) همه نمونه‌ها در حدود مجاز تعیین شده (کمتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) قرار گرفته‌اند. در نوبت دوم بررسی TDS در منطقه و نقاط اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد همه نمونه‌ها در حدود مجاز تعیین شده (کمتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) قرار دارند. همچنین در نوبت سوم (فصل تر) با توجه به جدول ۱۰ همه نمونه‌ها از نظر TDS در محدوده مجاز (کمتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) هستند.

۵- BOD

مقایسه مقادیر BOD نشان‌دهنده این مطلب است که بر اساس استاندارد WHO (۶ میلی‌گرم بر لیتر) در همه نمونه‌ها مقدار اکسیژن بیوشیمیایی در حد مجاز (کمتر از ۶ میلی‌گرم

۳- آلودگی زیاد که با روش‌های پرهزینه برطرف می‌شود (۲۰۰۰-۲۰۰۰۰ میلی‌لیتر).

۴- آلودگی خیلی بالای آب که غیرقابل قبول است (بیشتر از ۲۰۰۰۰ میلی‌لیتر).

براساس (جدول ۱۰) نتایج آنالیز کلی‌فرم مدفوعی بیانگر این مطلب است که در نمونه‌برداری اول نمونه چمتکله علیا در رده ۱ قرار دارد که نشان می‌دهد آلودگی باکتریایی در این منطقه از طریق ضدعفونی کردن برطرف می‌شود. سایر نمونه‌ها (نمونه‌های چشمه شاه قلی، چم پلک، پل کشکان، ویسیان، آفرینه، پلدختر و چم مهر پایین) در رده ۲ قرار می‌گیرند، لذا آلودگی باکتریایی در این مناطق نیاز به روش تصفیه پی در پی (انعقاد، صاف کردن و ضدعفونی) دارد. در نوبت دوم نتایج آنالیز کلی‌فرم مدفوعی بیانگر این مطلب است که نمونه‌های ایستگاه‌های بند کاکارضا، سدمعشوره، چم پلک، ویسیان، آفرینه و پلدختر در رده ۲ قرار دارد که نشان می‌دهد آلودگی باکتریایی در این مناطق نیاز به روش تصفیه پی در پی (انعقاد، صاف کردن و ضدعفونی) دارد. سایر نمونه‌ها (نمونه‌های چمتکله علیا، چمانجیر و دوآب ویسیان) در رده ۳ قرار می‌گیرند، و دارای کلونی‌های باکتریایی بیش از ۲۰۰۰ در میلی‌لیتر هستند که نشانگر آلودگی زیاد موجود در منطقه است که با روش‌های پرهزینه برطرف می‌شود. در نوبت سوم (فصل تر) کلیفرم مدفوعی بیانگر این مطلب است که نمونه‌های همه ایستگاه‌ها در رده دوم قرار دارند که آلودگی باکتریایی در این مناطق به روش تصفیه پی در پی (انعقاد، صاف کردن و ضدعفونی) از بین می‌رود (جدول ۱۰).

۲- کدورت

نتایج مقایسه پارامتر کدورت بر اساس استاندارد ملی و WHO (حد مجاز استاندارد ملی ایران برای کشاورزی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، حد مجاز استاندارد ملی ایران برای شرب حداکثر ۵ میلی‌گرم بر لیتر است و استاندارد WHO نیز ۵ میلی‌گرم بر لیتر است) بیان می‌کند که از نظر کدورت در نوبت اول نمونه چمتکله علیا در حد مجاز قرار دارد و سایر نمونه‌ها دارای مقادیر کدورت بیش از این مقدار هستند. از دیدگاه کشاورزی همه نمونه‌ها در حد مجاز استاندارد ملی ایران قرار گرفته‌اند. در نوبت دوم همه‌ی نمونه‌ها دارای مقادیر کدورت بیش از حد مجاز هستند و از دیدگاه کشاورزی همه نمونه‌ها

بالا در نواحی پایین حوضه کشکان احتمالاً به دلیل وجود سازندهای حاوی فسیل، مصرف کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات مختلف در اراضی حواشی رودخانه و نیز فاضلابهای ناشی از مصارف شویندهها در مناطق مسکونی می باشد. در نوبت دوم نمونه های ایستگاههای بندکاکارضا، چمتکله علیا، سدمعشوره و چمپلک دارای مقدار فسفات کمتر از ۰/۷ میلی- گرم بر لیتر هستند و از لحاظ پارامتر فسفات شرایط مناسبی دارند. در سایر ایستگاههای حوضه مقدار فسفات بیشتر از ۰/۷ میلی گرم بر لیتر است و از نظر این پارامتر دارای شرایط نامناسبی هستند. در نوبت سوم (فصل تر) نتایج حاصل از آنالیز فسفات بیانگر این مطلب است که مقدار فسفات در همه ایستگاههای نمونه برداری بیشتر از حد مجاز (۰/۷ میلی گرم بر لیتر) است و ایستگاههای نمونه برداری از نظر پارامتر فسفات در شرایط نامناسبی قرار دارند.

بررسی آماری

نتایج جدول ۱۱، مربوط به نمونه برداری اول بیانگر این مطلب است که چند عامل شیمیایی کیفیت آب را کنترل می- کند و از بین این عوامل کدام عامل دارای اهمیت بیشتری است. در واقع واریانس کل اهمیت و مهم بودن فاکتورها را بیان می کند. نتایج حاصل از تحلیل عاملی نشان می دهد که ۳ فاکتور دارای اهمیت بالا هستند، این فاکتورها حدود ۸۴/۸۸٪ از کل میزان اشتراک را در بر دارند. به طوری که از این مقدار فاکتور اول ۴۶/۸۱٪ و فاکتور دوم ۱۹/۲۵٪ و فاکتور سوم ۱۸/۸۰٪ است. این ۳ فاکتور دارای واریانس بالا و اهمیت بالایی هستند، که مقادیر ویژه مؤلفه ۱ تا ۳ به ترتیب ۵/۶۱۸، ۲/۳۱۱ و ۲/۲۵۷ و بیشتر از یک می باشد.

بر لیتر) قرار گرفته است. در نوبت دوم نتایج نشان دهنده این مطلب است که بر اساس استاندارد WHO نمونه های ایستگاه- های چمانجیر، دو آب ویسیان، ویسیان، آفرینه و پلدختر بالاتر از حد مجاز (بیشتر از ۶ میلی گرم بر لیتر) و اکسیژن بیوشیمیایی در نمونه بقیه ای ایستگاهها، در حد مجاز (کمتر از ۶ میلی گرم بر لیتر) قرار گرفته است. در نوبت سوم (فصل تر) مقایسه مقادیر BOD براساس استاندارد WHO نشان می دهد، فقط ایستگاه دو آب ویسیان بالاتر از حد مجاز است یعنی بیشتر از ۶ میلی گرم بر لیتر و بقیه ایستگاهها دارای مقادیر کمتر از ۶ میلی گرم بر لیتر هستند و در وضعیت مجاز قرار دارند (جدول ۱۰).

۶-نیتрат

با توجه به نتایج جدول ۱۰، نیترات در ایستگاههای نمونه- برداری نوبت اول بر اساس استاندارد WHO (۵۰ میلی گرم بر لیتر) در حد مجاز کمتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر قرار دارد و از نظر نیترات در این نواحی کیفیت آب مورد قبول است. در نوبت دوم نیترات در ایستگاههای نمونه برداری در حد مجاز کمتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر قرار دارد و از نظر نیترات در این نواحی کیفیت آب مورد قبول است. در نوبت سوم نیترات در ایستگاه- های نمونه برداری در حد مجاز یعنی کمتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر است و از نظر نیترات کیفیت آب در ایستگاههای نمونه- برداری مورد قبول است.

۷-فسفات

نتایج جدول ۱۰ با توجه به استاندارد کیفیت آب رودخانه- ها برای فسفات (مقادیر بیشتر از ۰/۷ میلی گرم بر لیتر نشانگر آبهایی هستند که تقریباً شرایط نامناسبی دارند، کلاس 1A با مقادیر بیشتر از ۰/۴ بیان کننده آبهایی هستند با ارزش کیفی بسیار خوب و شرایط سخت گیرانه ای نسبت به بقیه کلاسها دارند، و کلاس 1B با مقادیر بین ۰/۴-۰/۷ شامل آبهایی با ارزش کیفی خوب ولی کمی پایین تر از کلاس 1A هستند) بیانگر این نکته است که نمونه های چمپلک و پلدختر دارای مقدار فسفات کمتر از ۰/۷ میلی گرم بر لیتر هستند و از لحاظ پارامتر فسفات شرایط مناسبی دارند. در سایر نواحی حوضه مقدار فسفات بیشتر از ۰/۷ میلی گرم بر لیتر است و از نظر این پارامتر دارای شرایط نامناسبی هستند. وجود فسفات

جدول ۱۱-جدول مقادیر ویژه برای تعیین تعداد عامل‌های رودخانه کشکان (فصل تر).

Table 11 - Table of eigenvalues for determining the number of factors of the Kashkan River (wet season).

Component	Cumulative %	Initial eigenvalues	
		% of Variance	Total
1	46.815	46.815	5.618
2	66.072	19.257	2.311
3	84.880	18.808	2.257
4	92.211	7.332	.880
5	98.946	6.735	.808
6	99.965	1.019	.122
7	100.000	.035	.004
8	100.000	1.563E-14	1.876E-15
9	100.000	5.281E-15	6.337E-16
10	100.000	7.784E-16	9.341E-17
11	100.000	1.899E-16	2.279E-17
12	100.000	-4.194E-15	-5.033E-16

جدول ۱۲-نتایج مدل عاملی و تفکیک عامل‌ها رودخانه کشکان (فصل تر).

Table 12- Results of the factor model and factor separation for the Kashkan River (wet season).

Component	Component		
	1	2	3
pH		.825	
TURB			-.959
EC	.950		
COD	-.786		
BOD	-.836		
NO ₃			.764
PO ₄		.940	
P		.940	
FC	.879		
Total	.879		
T	.622		.745
TDS	.950		

اولین قدم در تعیین کیفیت آب رودخانه‌ها، کسب آگاهی از تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها در ابعاد زمان و مکان و همچنین مشخص نمودن منابع اصلی و انواع آلوده‌کننده‌های آب می‌باشد. در این راستا بررسی کیفی رودخانه کشکان با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های آماری نشان داد که به‌طور کلی کیفیت آب رودخانه در رده متوسط قرار دارد و بیانگر این مطلب است که در فصل تر و با افزایش حجم بارش کیفیت رودخانه به‌دلیل کاهش املاح و مواد معلق نسبت به حجم کل رودخانه در وضعیت بهتری قرار دارد. در فصل خشک کاهش دبی و افزایش فعالیت‌های کشاورزی و نیز افزایش میزان املاح نسبت به حجم آب رودخانه سبب کاهش کیفیت آب رودخانه می‌گردد. تأثیر فرآیند انحلال و هوازدگی سازندهای کربناته و وجود سازندهای حاوی فسفات، در منطقه بیانگر تأثیر عوامل زمین‌زاد بر روی کیفیت آب رودخانه کشکان است. علاوه‌براین مصرف کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات مختلف در اراضی حواشی رودخانه و نیز فاضلاب‌های ناشی از مصارف شوینده‌ها

نتایج بارهای عاملی به‌دست آمده در سه مؤلفه پس از چرخش، در جدول ۱۱ ارائه شده است. به‌منظور جلوگیری از شلوغی جدول، بارهای عاملی کمتر از ۰/۵ نمایش داده نشده است، فاکتور ۱ شامل EC، FC، توتال، T، TDS است که همبستگی بالایی باهم دارند و این پارامترها دارای بار عاملی بالایی هستند و همبستگی معکوسی با COD و BOD دارند و در فاکتور ۲ بار عاملی pH، PO₄، TDS بالا است و این فاکتورها با هم همبستگی دارند. در فاکتور ۳، دما و NO₃ با هم همبستگی و ارتباط قوی دارند و با NTU همبستگی معکوسی را نشان می‌دهند. با توجه به فاکتورهای تعیین شده و وجود هم بستگی بالا با FC، توتال، T، TDS در فاکتور اول و PO₄، P در فاکتور دوم و نیز نیترات در فاکتور سوم می‌تواند بیانگر وجود آلودگی با منشأ انسان‌زاد در منطقه باشد.

نتیجه‌گیری

حسینزاده، ا.، خرسندی، ح.، رحیمی، ن.، حسینزاده، س.، علیپور، م.، ۲۰۱۳. ارزیابی کیفیت آب رودخانه آیدوغموش با استفاده از شاخص کیفیت NSFQI و شاخص آلودگی Liou. مجله مطالعات علوم پزشکی، ۲۴(۲)، ۱۵۶-۱۶۲.

رضایی، ا.، شاهی‌نژاد، ب.، یونسی، ح.، ۲۰۱۹. ارزیابی مدل‌های هوشمند در برآورد میزان مواد جامد محلول در آب رودخانه کشکان، استان لرستان. مهندسی و مدیریت آب، ۱۱(۱)، ۱۴۷-۱۶۵.

رفیعی، ن.، آذری، آ.، ۲۰۲۰. ارزیابی اثرات احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و کشاورزی بر بهبود روند کیفی و آلودگی رودخانه دز. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۵۰(۹۸)، ۳۳-۴۱.

رهنما، س.، سیاری، ن.، ۱۳۹۵. معرفی شاخص‌های کیفی آب جهت طبقه‌بندی و مصارف آب‌های نامتعارف در بخش‌های مختلف.

کلانتری، ن.، زروش، ن.، علیجانی، ف.، دانشیان، ح.، باشتی، م.، ۱۴۰۳. بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی با تأکید بر منشأ و تعیین شاخص آلودگی نیترا با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و تکنیک‌های آماری چند متغیره در بخش جنوبی آبخوان بهبهان استان خوزستان. مجله هیدروژئولوژی دانشگاه تبریز، ۹(۱)، ۴۰-۵۶.

مرادی هرنجی، ع.، شکوهی، ع.، ۱۳۹۷. ارزیابی و پهنه‌بندی کیفی رودخانه‌ها با استفاده از شاخص آب (NSFWQI) و مقایسه آن با شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران IRWQIsc. کارشناسی ارشد. دانشگاه بین‌المللی خمینی.

ندیری، ع.، صدقی، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های چندگانه با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS. مجله هیدروژئولوژی دانشگاه تبریز، ۲(۴)، ۱۷۱-۱۸۶.

یعقوبزاده، ص.، ۲۰۱۵. بررسی میزان آلودگی میکروبی آب‌های سطحی رودخانه هراز. مجله پژوهش‌های سلولی و مولکولی (مجله زیست‌شناسی ایران) (علمی)، ۲۸(۱)، ۱۳۶-۱۴۴.

Reference

Aghaei, M., Heshmatpour, Q., Seydian, S.M., 2020. Investigating the water quality of the Chehelchay River using the IRWQIsc index. Quarterly Journal of

در مناطق مسکونی سبب تأثیر عامل انسان‌زاد بر کیفیت رودخانه بوده که لازم است تدابیر لازم در راستای کنترل این آلودگی‌ها صورت پذیرد. همچنین کیفیت آب رودخانه کشکان از نظر آلودگی باکتریایی نیاز به روش‌های ضدعفونی کردن و تصفیه پی در پی (انعقاد، صاف کردن و ضدعفونی) دارد لذا در تصمیم‌گیری به‌منظور اهداف خاص باید این مهم در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

این پروژه با حمایت گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای لرستان تحت قرارداد شماره 25/10/0011699 با شناسه ملی طرح LOSE 1-00009 و همچنین با پشتیبانی و حمایت دبیرخانه شورای عالی، تحقیقات و فناوری به انجام رسیده است، بدین‌وسیله مراحل سپاس و قدردانی را از حمایت ایشان داریم.

منابع

اسداله فردی، غ.، افشار، ع.، شیخستانی، ن.، ۲۰۰۴. مروری بر روش شاخص‌های کیفی آب‌های سطحی و کاربرد آن در پهنه‌بندی قسمتی از رودخانه کارون. مهندسی عمران، ۲۷(۷۷-۸۷).

اصغری مقدم، ا.، محبی، ی.، ۱۳۹۵. ارزیابی عوامل موثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت کهز با استفاده از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. هیدروژئولوژی، ۱(۱)، ۷۶-۹۲.

آقایی، م.، حشمت‌پور، ق.، سیدیان، س.م.، ۲۰۲۰. بررسی کیفیت آب رودخانه چهل‌چای با استفاده از شاخص IRWQIsc. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۵)، ۱۵۳-۱۶۶.

امین پورشیانی، س.، محمدی، م.، خالدیان، م.ر.، میرروشندل، ا.ا.، ۱۳۹۵. ارزیابی کیفیت آب رودخانه گازرودبار با استفاده از شاخص کیفیت NSFQI و شاخص آلودگی Liou.

جعفری مقدم، ا.، حشمت‌پور، ع.، فتح‌آبادی، ع.، اکبری، ر.، ۱۳۹۶. بررسی کیفیت آب رودخانه باقرآباد با استفاده از شاخص IRWQIsc. کارشناسی ارشد، دانشگاه گنبد کاووس.

جعفری، س.، نبی بیدهندی، ب.، طاهریون، س.، اردستانی، م.، ۲۰۱۰. بررسی کیفیت آب رودخانه قشلاق با استفاده از شاخص‌های کیفی آب. فصلنامه علوم محیطی، ۷(۲).

- Rafiei, N., Azari, A., 2020. Evaluation of the effects of constructing urban and agricultural wastewater treatment plants on improving the quality and pollution of the Dez River. *Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz*, 50(98), 33-41. [In Persian].
- Rahnama, S., Sayari, N., 2016. Introducing water quality indices for the classification and use of unconventional waters in different parts [In Persian].
- Rezaei, A., Shahinejad, B., Younesi, H., 2019. Evaluation of intelligent models in estimating the amount of dissolved solids in the water of Kashkan River, Lorestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 147-165. [In Persian].
- Yaghoubzadeh, P., 2015. Investigation of the level of microbial contamination of surface waters of the Haraz River. *Journal of Cellular and Molecular Research (Iranian Journal of Biology) (Scientific)*, 28(1), 136-144. [In Persian].
- Yousefi, H., Mohammadi, A., Noorollahi, Y., 2019. Analyzing the water quality of Babaheydar Dam in Farsan using NSFQI analytical method. *J. Watersh Manage. Res.*, 9(18), 1-11.
- Environmental Science and Technology. 22(5), 153-166 [In Persian].
- Amin Pourshiani, S., Mohammadi, M., Khaledian, M.R., Mirroshandel, A.A., 2016. Assessment of water quality of the Gazrudbar River using the NSFQI quality index and the Liou pollution index. [In Persian].
- Asadollah Fardi, G., Afshar, A., Sheikhistani, N., 2004. A review of the surface water quality index method and its application in zoning of the Karun River part. *Civil Engineering*, (27) 77-87. [In Persian].
- Asghari Moghadam, A., Mohebi, Y., 2016. Evaluation of factors affecting the chemical quality of groundwater in the Kahriz plain using statistical and hydrochemical methods. *Journal of Hydrogeology, University of Tabriz*, 1 (1), 76-92. [In Persian].
- Hoseinzadeh, E., Khorsandi, H., Wei, C., Alipour, M., 2015. Evaluation of Aydoz River water quality using the national sanitation foundation water quality index (NSFWQI), river pollution index (RPI), and forestry water quality index (FWQI). *Desal. Water Treat*, 54(11), 2994-3002.
- Hosseinzadeh, A., Khorsandi, H., Rahimi, N., Hosseinzadeh, S., Alipour, M., 2013. Evaluation of water quality of Aydoz River using NSFQI quality index and Liou pollution index. *Journal of Medical Sciences Studies*, 24(2), 156-162. [In Persian].
- Jafari Moghadam, A., Heshmatpour, A., Fathabadi, A., Akbari, R., 2017. Studying the water quality of Bagherabad River using the IRWQIsc index. Master's degree, Gonbad Kavous University. [In Persian].
- Jafari, S., Nabi Bidhendi, B., Taheriyoun, S., Ardestani, M., 2010. Investigation of water quality of Qeshlaq River using water quality indices. *Quarterly Journal of Environmental Sciences*, 7(2). [In Persian].
- Kalantari, N., Zarroush, N., Alijani, F., Daneshian, H., Bashti, M., 2014. Investigation of the quality of groundwater resources with emphasis on the origin and determination of nitrate pollution index using hydrochemical methods and multivariate statistical techniques in the southern part of Behbahan aquifer, Khuzestan province. *Journal of Hydrogeology, University of Tabriz*, 9 (1), 40-56. [In Persian].
- Mahrooyan, F., Taghavi, L., Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., 2018. Water quality assessment of Qazvin River using NSFQI Index for water quality Classification. *J. Ecobio.*, 12(1), 99-112.
- Moradi Haranji, A., Shokoohi, A., 2018. Evaluation and zoning of river quality using the water index (NSFWQI) and its comparison with the Iranian surface water quality index IRWQIsc. Master's degree. Khomeini International University. [In Persian].
- Nadiri, A., Sedghi, Z., 2019. Vulnerability assessment of multiple aquifers using DRASTIC, SINTACS methods. *Journal of Hydrogeology, University of Tabriz*, 2 (4), 171-186. [In Persian].

برآورد فرونشست دشت قروه با استفاده از روش GARDLIF-SD و تداخل سنجی راداری

مینا رحیمی^۱، مهری کاکلی^۲، فرخ اسدزاده^۳، وحید رضوردی نژاد^{۴*}

- ۱- دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲- کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- استاد گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
* نویسنده مسئول: v.verdinejad@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱۲

چکیده

دشت قروه در منطقه خشک و نیمه خشک کشور واقع شده است و به دلیل کمبود منابع آب سطحی، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. استفاده بی رویه از منابع آب زیرزمینی، وقوع پدیده فرونشست را به دنبال دارد. در این مطالعه، به ارزیابی آسیب پذیری دشت قروه نسبت به فرونشست با استفاده از روش GARDLIF-SD پرداخته شده است. برای این منظور از نه پارامتر موثر شامل افت سطح آب زیرزمینی (G)، محیط آبخوان (A)، تغذیه خالص (R)، مقدار پمپاژ (D)، کاربری اراضی (L)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F)، شیب (S) و فاصله از رودخانه (D) استفاده و نقشه فرونشست در محیط ArcGIS 10.8 تهیه و در سه کلاس متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی شد. نتایج نشان داد که ۶۱/۵۸ درصد از مساحت دشت قروه در معرض آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد نسبت به فرونشست قرار دارد. بررسی داده های راداری ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳، فرونشست هایی در بازه ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی متر را آشکار کرد. بازده های میدانی نیز وقوع پدیده فرونشست در اطراف پیرومترهای قروه، سریش آباد و آب بند ویهج را تأیید کرد. بررسی ها نشان داد که علت اصلی وقوع پدیده فرونشست در دشت قروه، برداشت بی رویه آب از منابع زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است. لذا، مدیریت بهینه و توجه به نحوه مصرف آب از این منابع ارزشمند امری ضروری است.

واژه های کلیدی: آب زیرزمینی، آسیب پذیری، تداخل سنجی راداری، سنتینل-۱، فرونشست.

مقدمه

مناطق جهان، از منابع آب زیرزمینی برای مصارف مختلف نظیر کشاورزی، شرب و صنعت استفاده می شود. در سال های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران، برداشت آب از منابع زیرزمینی از میزان تغذیه سالیانه آن ها بیشتر بوده است. این امر به معنای استخراج و استفاده از آبی است که در طول هزاران سال در لایه های آب دار زمین ذخیره شده است. از فرونشست به عنوان زلزله خاموش که یک خطر زمین شناسی است یاد می شود که تحت تأثیر عوامل مختلف ایجاد می شود (Park et al., 2014). با افت تراز آب زیرزمینی و متراکم شدن لایه های زمین، نفوذ پذیری و ضریب ذخیره آبخوان کاهش می یابد. بنابراین مهم ترین دلیل ایجاد فرونشست در مناطق

امروزه آب به عنوان یک منبع حیات بخش، بیش از هر زمان دیگری مورد توجه است و حفظ و صیانت از این منابع، بهره برداری بهینه، اقتصادی و عادلانه از آن چالشی فراگیر است (شایان و همکاران، ۱۳۹۵). محدودیت در منابع آب، افزایش جمعیت، کاهش بارندگی، افزایش مصرف آب، افزایش خشکسالی و کاهش کیفیت منابع آب از جمله چالش های موجود در رابطه با آب است و توجه به منابع آب در کشورهایی مانند ایران که در منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده اند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸). به دلیل عدم دسترسی به آب های سطحی در بیشتر

و اردن، با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی مختلف را با استفاده از مدل MODFLOW مدل‌سازی و نرخ فرونشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی را برآورد نمودند. در این مطالعه، نرخ فرونشست برآورد شده با میزان فرونشست به‌دست آمده از تصاویر راداری (DInSAR) از ماهواره سنتیل-۱ ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که میزان فرونشست با کاهش سطح آب زیرزمینی همبستگی معنی‌داری نداشته است و الزاماً بیشترین میزان فرونشست در مناطقی که بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی رخ داده، همراه نبوده است. عمادالدین و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به بررسی فرونشست دشت فسا طی دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۲۰ پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در مناطقی که افت سطح آب زیرزمینی در بیشترین میزان قرار دارد، خطر فرونشست نیز بیشتر می‌باشد. (Ghasemi et al. (2023 نقشه پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان استان همدان را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و استفاده از دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان تهیه نمودند. لایه‌های ورودی در این مطالعه شامل مدل رقومی ارتفاعی، شیب، جهت شیب، پلان و انحنا، پروفیل، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی، بافت خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، سازندهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی و افت سطح آب زیرزمینی می‌باشند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد دقت مدل SVM و RF به ترتیب ۸۹ درصد و ۹۶ درصد بوده و کارایی مدل RF در تعیین پتانسیل فرونشست بیشتر است. داداشی و همکاران (۱۳۹۹) آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۶ را با استفاده از ALPRIFT بررسی نمودند. لایه‌های ورودی در این مطالعه شامل محیط آبخوان، کاربری اراضی، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت تراز آب زیرزمینی می‌باشند. مطابق نتایج حاصله، مناطق جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی دشت در برابر فرونشست آسیب‌پذیر هستند و متوسط فرونشست در این دشت برابر با ۲ سانتی‌متر است. نادری و همکاران (۱۳۹۷) برای شناسایی و تعیین مناطق مستعد فرونشست در آبخوان دشت سلماس از روش GARDLIF استفاده نمودند. بر اساس نتایج حاصله، بیش‌ترین احتمال وقوع فرونشست مربوط به مناطق اطراف قره‌قشلاق که در شمال‌شرق دشت سلماس واقع

خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه آب از این منابع است. خطر فرونشست زمین در جهان بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ و همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی در نقاط مختلف جهان شروع شده است. میزان فرونشست زمین معمولاً به اندازه ۱ تا ۱۰ سانتی-متر به ازای هر متر افت سطح آب زیرزمینی است (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸). در سال‌های اخیر، پدیده فرونشست، در دشت‌های زیادی از کشور که از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی استفاده می‌نمایند افزایش یافته است. از جمله این دشت‌ها می‌توان به دشت‌های کاشمر (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۷)، سمنان (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸)، مرند (داداشی و همکاران، ۱۳۹۹)، اردبیل (خلیفی و همکاران، ۱۴۰۰)، فسا (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۲) و سلماس (نجفی ایگدیر و همکاران، ۱۴۰۳) اشاره نمود.

مطالعه لشکری‌پور و همکاران (۱۳۸۷) در دشت کاشمر نشان داد که وقوع پدیده فرونشست و شکاف‌های زمین عمدتاً ناشی از افت شدید سطح آب زیرزمینی بر اثر برداشت‌های بی‌رویه، در کنار ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان از جمله بافت ریزدانه و تراکم‌پذیر آن است؛ عواملی که موجب افزایش پتانسیل فشردگی و در نهایت نشست زمین می‌گردند. اکبری اریمی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای پیرامون پدیده فرونشست در دشت سمنان به این نتیجه دست یافتند که طی یک دوره آماری ۲۴ ساله (۱۳۷۲ تا ۱۳۹۶)، برداشت مستمر از منابع آب زیرزمینی منجر به افت ۹/۱۸ متری سطح آب زیرزمینی شده و تحکیم لایه‌های رسی و بروز فرونشست زمین را به دنبال داشته است. نجفی ایگدیر و همکاران (۱۴۰۳) برای برآورد فرونشست دشت سلماس از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با درجه مصنوعی طی سال‌های آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸ استفاده نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد میانگین سرعت جابجایی ناشی از فرونشست، ۵ سانتی‌متر است. بررسی تغییرات منابع آب زیرزمینی نیز نشانگر روند کاهشی در این منابع است. این محققان در مطالعه خود علت اصلی ایجاد فرونشست در دشت سلماس را نیز تخلیه آب‌های زیرزمینی دانسته‌اند. (Elci et al. (2023 جریان آب زیرزمینی چهار حوضه واقع در کشورهای ایتالیا، اسپانیا، ترکیه

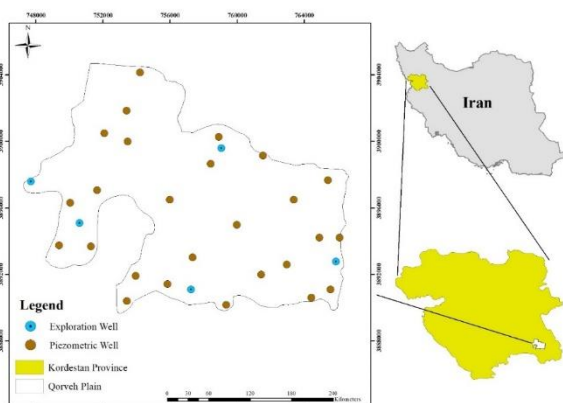
شده است، می‌باشد. این محققان برای تعیین میزان تأثیرپذیری هر کدام از پارامترهای ورودی از روش تحلیل حساسیت با حذف نقشه استفاده نمودند. نتایج نشان داد پارامترهای پمپاژ و کاربری اراضی دارای بیشترین تأثیر و فاصله از گسل کم‌ترین تأثیر بر شاخص GARDLIF را دارد.

با توجه به اهمیت پدیده فرونشست برای بسیاری از مناطق دنیا و به خصوص دشت‌های کشور ایران، شناسایی مناطق مستعد فرونشست و برنامه‌ریزی جهت مدیریت صحیح آبخوان و جلوگیری از وقوع فرونشست و یا درنظر گرفتن تمهیدات خاص برای کاهش تأثیرات آن امری ضروری است. دشت قروه از جمله دشت‌های ممنوعه کشور است که در شرق استان کردستان واقع شده است. به دلیل برداشت بی‌رویه و کاهش بارندگی‌ها در حوضه آبریز، بیلان منابع آب زیرزمینی این دشت از سال ۱۳۹۴ منفی بوده است و میزان تغذیه، با وجود تمهیدات اخذ شده از سوی مدیران ذیربط، تاکنون افزایشی نداشته است. بنابراین؛ در این پژوهش، آسیب‌پذیری فرونشست دشت قروه با اصلاح شاخص GARDLIF و افزودن پارامترهای مهم و موثر بر آن شامل شیب و فاصله از رودخانه برآورد گردید.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی، دشت قروه با ۱۰۶۵/۳۱ کیلومترمربع مساحت در شرق استان کردستان و با طول جغرافیایی ۳۰° ۴۷' تا ۰۰° ۴۸' و عرض‌های جغرافیایی ۳۰° ۳۵' تا ۵۰° ۳۴' می‌باشد (شکل ۱). دشت قروه، در محدوده بلندی‌های کوه سیاه به ارتفاع ۲۲۸۷ متر، کوه قراول به ارتفاع ۲۱۰۰ متر با جهت شمالی تا کوه پیروسیف به ارتفاع ۲۰۰۰ متر در جهت غربی و در امتداد خط‌الراس تا کوه قرقیه به ارتفاع ۱۹۰۰ متر و با جهت جنوب غربی تا روستای شادی‌آباد به ارتفاع ۱۷۰۰ متر قرار دارد. این محدوده، در جنوب به ارتفاعات بلند نظیر کوه دروازه با ارتفاع ۳۱۶۲ متر، ابراهیم عطار با ارتفاع ۲۷۹۳ متر و دره‌های پرشیب نظیر دره اوریه و ویهج محدود است که از این دو دره، دو آبراهه اوریه و ویهج وارد دشت شده و در شمال شرقی منطقه به رودخانه دائمی چم‌شور وارد می‌شوند (مقیمی و همکاران، ۱۴۰۱). در سطح دشت قروه، مقدار متوسط بارش سالانه طی سال‌های اخیر کاهشی بوده است به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۵، مقدار متوسط بارش سالانه ۳۰۷



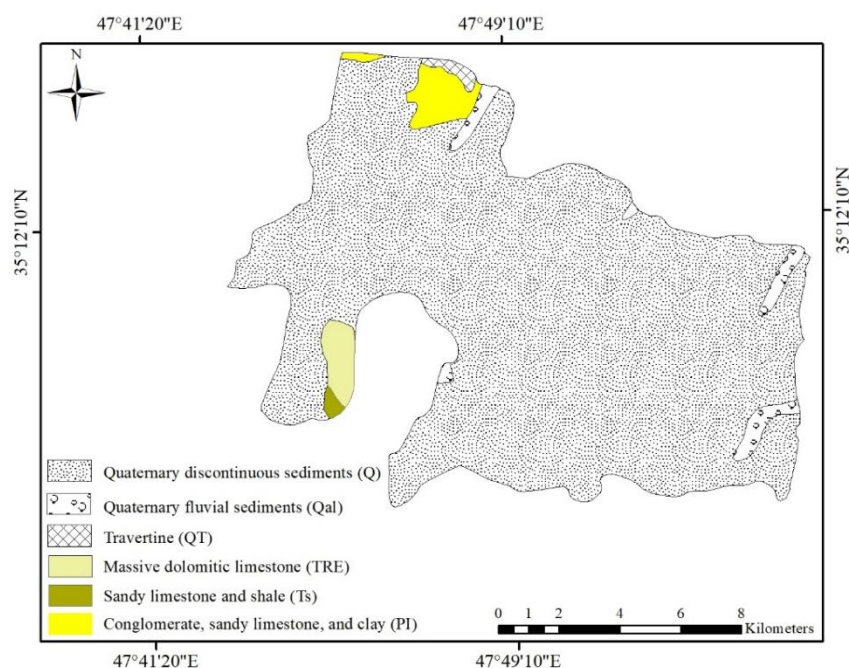
شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز قروه در استان کردستان و ایران.

Figure 1- Location of Ghorveh watershed at Kordestan province and Iran.

دشت قروه دارای مجموعه سنگ‌های آذرین و رسوبی (دگرگون شده) و کوه‌هایی با فعالیت آتشفشانی مربوط به قبل از سنوزوئیک و اوایل کواترنری می‌باشد که در نیمه جنوبی علاوه بر ماگماتیزم، پدیده دگرگونی نیز تغییرات زیادی را به وجود آورده است. ارتفاعات اطراف دشت، غالباً از سنگ‌های آذرین بیرونی و بیشتر از نوع آندزیتیک، سنگ‌های آذرین درونی از نوع گرانیت، دیوریت و سنگ‌های دگرگونی از نوع میکاشیست و گنیاس می‌باشند. شمال منطقه از مورفولوژی آرامی برخوردار است. چشمه‌های باباگوگور از جمله معروف‌ترین چشمه‌های

از رسوبات اتوسن-الیگومیوسن بوده و از آهک، آهک‌های رسی سفید رنگ، مارن و ماسه سنگ و گنگومرا و در بعضی نقاط با رس آهکی تشکیل شده‌اند. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی در شکل ۲ ارائه شده است (گزارش زمین‌شناسی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷).

آهک‌ساز در شمال شرقی دشت می‌باشند که در اطراف این چشمه‌ها، تداوم رسوب‌گذاری ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی آب‌های زیرزمینی را می‌توان مشاهده کرد. در همین ناحیه، چندین تپه به اشکال گنبدی و طولی وجود دارد که بلندترین آن‌ها تپه‌ای است که از دهای بابا گورگور نام دارد. سری‌های ترشیری در شمال این دشت تا بیجار، مشتمل بر مجموعه‌ای



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز قروه.

Figure 2- Geological map of Ghorveh watershed.

وزن‌های یک تا پنج برای پارامترهای روش GARDLIF در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای شیب و فاصله از رودخانه از پارامترهای بسیار موثر بر فرونشست می‌باشند. اگر شیب زمین کم باشد، آب جاری شده در سطح زمین فرصت بیشتری برای نفوذ در سطح زمین دارد و اگر شیب زمین زیاد باشد آب جاری شده در زمان کوتاهی از دسترس خارج خواهد شد. رودخانه‌ها از جمله منابع مهم تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌باشند. بدیهی است هرچه فاصله از رودخانه‌ها زیادتر باشد، تغذیه منابع آب زیرزمینی کمتر خواهد بود و برعکس. با توجه به اهمیت این دو پارامتر مهم بر منابع آب زیرزمینی، برای بهبود دقت روش GARDLIF، در این مطالعه، پارامترهای شیب و فاصله از رودخانه به عنوان ورودی‌های این روش در نظر گرفته شده و روشی جدید تحت عنوان GARDLIF-SD برای تعیین آسیب‌پذیری فرونشست دشت قروه مورد استفاده قرار گرفت. شاخص روش GARDLIF-SD براساس وزن‌دهی به مجموع

روش آسیب‌پذیری فرونشست GARDLIF-SD

فرونشست زمین متأثر از پارامترهای مختلفی از جمله فعالیت‌های انسانی و پارامترهای زمین‌شناسی است (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). روش GARDLIF از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی (G)، محیط آبخوان (A)، تغذیه خالص (R)، مقدار تخلیه یا پمپاژ (D)، کاربری اراضی (L)، ضخامت آبخوان (I) و فاصله از گسل (F) تشکیل شده است (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). در این روش، ابتدا اطلاعات مربوط به پارامترها به صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شده و سپس در محیط ArcGIS پردازش می‌شوند. در این روش، هر پارامتر دارای یک رتبه و یک وزن برحسب اهمیت آن پارامتر می‌باشد. رتبه پارامترهای GARDLIF بین یک تا ۱۰ متغیر است. رتبه یک به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای فرونشست زمین می‌باشد. با توجه به اهمیت نسبی هر پارامتر نسبت به پارامتر دیگر،

آسیب‌پذیری فرونشست می‌باشد. اسدی و همکاران (۱۴۰۰) محدودیت دسترسی به منابع آب سطحی که منجر به بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی شده و افت شدید تراز آب زیرزمینی را به‌دنبال داشته است را عامل اصلی وقوع پدیده فرونشست برشمرده‌اند.

محیط آبخوان (A)

محیط آبخوان به خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع نظیر میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات بستگی دارد. خاک‌های ریزدانه، بسیار بیشتر از ماسه و سنگریزه‌ها قابلیت تراکم دارند. بنابراین فرونشست شدید در مکان‌هایی که رسوبات رسی ضخیمی وجود داشته و یا لایه‌های آبدار، میان لایه‌های رس و سیلت قرار گرفته باشند، رخ می‌دهد. در خاک-های ریزدانه، به‌علت نفوذپذیری کم، نشست زمین به تدریج و طی سالیان طولانی صورت می‌گیرد. بیشترین مقدار فرونشست در خاک‌های آلی، به‌علت ضریب تراکم‌پذیری زیاد این نوع مصالح می‌باشد (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). مطابق با وزن‌های ارائه شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود که این پارامتر، وزن ۴ را به خود اختصاص داده است که نشان از اهمیت بالای آن است.

مقدار تغذیه خالص (R)

تغذیه خالص عبارت است از میزان آبی که از طریق منطقه غیراشباع خاک و توسط عوامل مختلفی نظیر بارش به آب زیرزمینی می‌رسد. بدیهی است که هرچه در منطقه‌ای، تغذیه آبخوان بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی افزایش یافته و احتمال وقوع فرونشست کمتر خواهد بود (Chatsimab et al., 2020). بنابراین در رتبه‌بندی این پارامتر برای تعیین مناطق مستعد فرونشست، به مناطقی که میزان تغذیه در آن‌ها بیشتر است رتبه کمتری اختصاص خواهد یافت. روش‌های مختلفی برای محاسبه مقدار تغذیه خالص وجود دارد که در این مطالعه، از روش اسکالن و همکاران استفاده شد (Scanlon et al., 2002). در این روش، تغذیه براساس تغییرات سطح آب بین دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از ضریب ذخیره آبخوان و براساس رابطه ۲ میزان تغذیه محاسبه می‌گردد.

$$R = S_y \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2)$$

پارامترها محاسبه می‌شود (رابطه ۱) (نادری و همکاران، ۱۳۹۷):

$$GI = G_r G_w + A_r A_w + R_r R_w + D_r D_w + L_r L_w + I_r I_w + F_r F_w + S_r S_w + D_r D_w \quad (1)$$

که در آن، GI شاخص آسیب‌پذیری، حروف بزرگ نشان دهنده پارامترهای روش، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. با محاسبه شاخص GI، نواحی مستعد فرونشست آبخوان قابل تشخیص می‌باشد. هرچه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، بیانگر احتمال بیشتر برای وقوع فرونشست است.

جدول ۱- وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای روش

GARDLIF-SD

Table 1- The weights assigned to the parameters of the GARDLIF-SD model.

Parameters	Relative weight
Groundwater level decline (G)	5
Aquifer media (A)	4
Net recharge (R)	2
Aquifer discharge (D)	4
Land use (L)	5
Aquifer thickness (I)	3
Distance from fault (F)	1
Slope (S)	3
Distance from river (D)	3

پارامترهای روش GARDLIF-SD

افت سطح آب زیرزمینی (G)

با کاهش سطح آب در آبخوان‌های آزاد، خاک مرتبط با بخشی که آب خود را از دست داده است، از حالت شناوری خارج می‌شود و با وارد کردن وزن بیشتر به لایه‌های زیرین، تراکم خاک افزایش می‌یابد که افزایش احتمال وقوع فرونشست را به‌دنبال دارد. زمانی که دبی پمپاژ، از دبی قابل اطمینان در آبخوان‌های تحت فشار زیادتر شود، سطح آزاد آب یا سطح پیژومتریک افت می‌یابد (Bouwer, 1993). پایین رفتن سطح پیژومتریک، سبب کاهش فشار بالا آورنده آب شده و افزایش فشار موثر خاک بالای آبخوان را به‌دنبال دارد که این امر سبب متراکم شدن خاک و فرونشست زمین می‌شود (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵). رتبه‌بندی مقادیر مختلف افت سطح آب زیرزمینی و دیگر پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به رتبه‌های ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که این پارامتر دارای بالاترین رتبه می‌باشد که نشانگر اهمیت آن در

که در آن، R: میزان تغذیه، S_y : آبدهی ویژه یا ضریب ذخیره، از تغذیه آبخوان از سطح است و پمپاژی از آبخوان صورت Δh : تغییرات سطح آب و Δt : تغییرات زمان است. در روش نمی‌گیرد. اسکنلن فرض بر این است که تغییرات تراز آب زیرزمینی، ناشی

جدول ۲- بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به پارامترهای روش GARDLIF-SD.

Table 2- Ranges and rates related to parameters in the GARDLIF-SD method.

Aquifer discharge (cm year ⁻¹)		Net recharge (cm year ⁻¹)		Aquifer media		Groundwater level decline (m year ⁻¹)	
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate
0-0.0004	1	0-4	10	Coarse-grained alluvial sediments	3-6	0-0.02	1
0.0004-0.005	2	4-9	9	Clay and silt	9-10	0.02-0.05	2
0.005-0.01	3	9-14	7	Sand with minor amounts of silt and clay	6-8	0.05-0.1	3
0.01-0.5	4	14-19	5	Sandstone and conglomerate	3-5	0.1-0.3	4
0.5-1	5	19-24	3	Karstic limestone	7-9	0.3-0.6	5
1-5	6	>24	1	Igneous or metamorphic rock	1-4	0.6-0.9	6
5-20	7	-	-	Sand and gravel with high silt and clay content	7-9	0.9-1.2	7
20-40	8	-	-	Organic soils (peat and peat-rich materials)	8-10	1.2-1.5	8
40-65	9	-	-	-	-	1.5-2	9
>65	10	-	-	-	-	>2	10
Aquifer thickness (m)		Land use		Distance from fault (km)			
Range	Rate	Range		Rate	Range	Rate	
>25	1	Rainfed agricultural areas		1-3	<1	10	
25-55	2	Rangelands and forest areas		1-3	1-2	8	
55-90	3	Fallow lands and natural areas		1-3	2-3	6	
90-130	4	Urban areas, dam construction sites, airports, ports, and industrial zones		4-8	3-4	4	
130-175	5	Cultivation of perennial crops such as orchards and vineyards		6-8	4-5	2	
175-225	6	Mining and extraction of mineral resources such as coal		5-9	>5	1	
225-280	7	Oil fields and oil and gas extraction sites		8-10	-	-	
280-340	8	Irrigated areas (annual crops)		8-10	-	-	
340-405	9	-		-	-	-	
>405	10	-		-	-	-	
		Distance from river (m)		Slope (%)			
		Range		Rate	Range	Rate	
		0-152		1	0-2	10	
		152-320		2	2-5	9	
		320-524		3	5-7	8	
		524-725		4	7-12	6	
		725-1000		5	12-15	5	
		1000-1220		6	15-20	4	
		1220-1440		7	20-30	3	
		1440-1660		8	>30	1	
		1660-1880		9	-	-	
		>1880		10	-	-	

کاربری اراضی (L)

کاربری‌های مختلف زمین می‌توانند اثرات مختلفی بر فرونشست داشته باشند. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی که با استخراج آب از منابع آب زیرزمینی همراه هستند، سبب افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست در یک منطقه می‌شوند. به علاوه معدن‌کاری، احداث فرودگاه و توسعه مناطق مسکونی نیز بر فرونشست زمین موثر است. در این گونه مناطق که تراکم‌پذیری خاک زیاد است نشست زمین صورت می‌گیرد.

مقدار تخلیه از آبخوان (D)

استخراج بیش از حد مایعات از آبخوان، فرونشست قابل توجه زمین را به دنبال دارد. پمپاژ از آبخوان، عملکردی برعکس تغذیه آبخوان دارد. اگر در منطقه‌ای پمپاژ بیشتر باشد، احتمال وقوع فرونشست هم بیشتر خواهد بود (خلیفی و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، مطابق جدول ۲، برای مناطقی با تخلیه بیشتر، رتبه بیشتر و برای مناطقی با تخلیه کمتر، رتبه کمتری اختصاص می‌یابد.

هیدروژئولوژیکی و حرکت آب زیرزمینی می‌توانند متفاوت باشند و نرخ فرونشست را کاهش دهند (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). برای تهیه نقشه شیب، از خطوط توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شده است.

فاصله از رودخانه (D)

وجود رودخانه‌ها در محدوده‌های آبخوان، باعث تغذیه آن می‌شوند. جریان آب رودخانه‌ها در مناطقی که پست و دارای شیب کمی هستند به کندی صورت می‌گیرد و این امر امکان نفوذ آب به اعماق زمین را به‌دنبال دارد. رابطه فرونشست با فاصله از رودخانه در حوضه‌های آبریز آبخوان‌ها مستقیم بوده و با افزایش فاصله از رودخانه‌ها، احتمال وقوع فرونشست بیشتر می‌شود (شایان و همکاران، ۱۳۹۵).

روش همپوشانی وزن‌دار

روش همپوشانی وزن‌دار در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نقشه-ای متشکل از چندین لایه رستری با وزن دادن به هر لایه برحسب اهمیت آن‌ها توسعه داده شد (Saati, 1990). با توجه به ارائه نتایج قابل اعتماد توسط این روش در مطالعات مختلف، در این مطالعه نیز از روش همپوشانی وزن‌دار در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد.

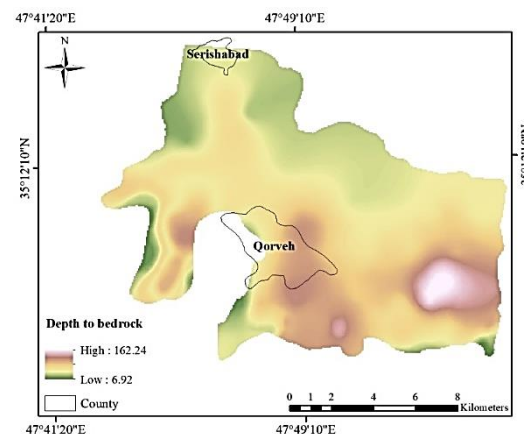
تداخل سنجی راداری

در این تحقیق برای تعیین میزان فرونشست منطقه، از تصاویر راداری سنتینل ۱- استفاده شد. برای این منظور از ۸ تصویر در دوره زمانی ۱۵ آبان ۱۳۹۶ (۲۰۱۷) تا یکم مهر ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) که از باند C ماهواره سنتینل A1- استخراج شده بود، استفاده و مراحل پردازش تداخل سنجی راداری در نرم‌افزار SNAP 9 انجام شد. در این پژوهش، تداخل نماها بر مبنای روش SBAS تشکیل شده‌اند، به این صورت که تنها زوج تصاویری که دارای طول خط مبنای مکانی و همچنین زمانی کوتاه بودند برای انجام پردازش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در این روش، از بروز خطای توپوگرافی و نویزها نیز جلوگیری می‌شود. خروجی میزان فرونشست در دشت قروه با پردازش خودکار با استفاده از تصویر پایه با اسکریپت‌های بسته متن باز پایتون نرم‌افزار اسنپ تهیه شد و نتایج حاصل از آن با نتایج با نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست حاصل از روش GARDLIF-SD مقایسه شد.

با توجه به اهمیت بالای این پارامتر بر فرونشست زمین، بالاترین وزن نیز برای آن در نظر گرفته شده است.

ضخامت آبخوان (I)

با کاهش هرچه بیشتر سطح آزاد آب در آبخوان‌ها، که ناشی از برداشت بی‌رویه آب از این منابع است، احتمال وقوع فرونشست در لایه‌های آبدار و لایه‌های ریزدانه که ضخامت بیشتری دارند، افزایش می‌یابد. زیرا با خالی شدن منافذ از آب، فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی، فشردگی لایه‌های زیرین را به‌دنبال خواهد داشت. بنابراین، در مکان‌هایی که ضخامت لایه آبدار بیشتر است، امکان وقوع فرونشست بیشتر بوده و رتبه اختصاصی نیز نسبت به مناطقی با ضخامت کم، بیشتر خواهد بود (Bouwer, 1993). نقشه هم‌عمق سنگ کف در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نقشه هم‌عمق سنگ کف دشت قروه.

Figure 3 - Bedrock depth contour map of the Ghorveh Plain.

فاصله از گسل (F)

عوامل ساختمانی و تکتونیکی مانند گسل و درزها، از عوامل تأثیرگذار بر فرونشست هستند. هرچه فاصله از گسل زیادتر باشد، تأثیر آن بر فرونشست کم‌تر خواهد بود. بنابراین در این روش، برای مناطقی که به‌ترتیب بیشتر از پنج کیلومتر و کمتر از یک کیلومتر از گسل فاصله دارند به‌ترتیب رتبه‌های ۱ و ۱۰ اختصاص داده می‌شود (نادری و همکاران، ۱۳۹۷).

شیب (S)

شیب زمین می‌تواند توزیع تنش و حرکت زیرسطحی را تغییر دهد. معمولاً مناطق با شیب کمتر مستعد فرونشست بیشتری هستند، زیرا تجمع رسوبات و کاهش نفوذپذیری خاک در این مناطق بیشتر است. در شیب‌های تند، فرایندهای

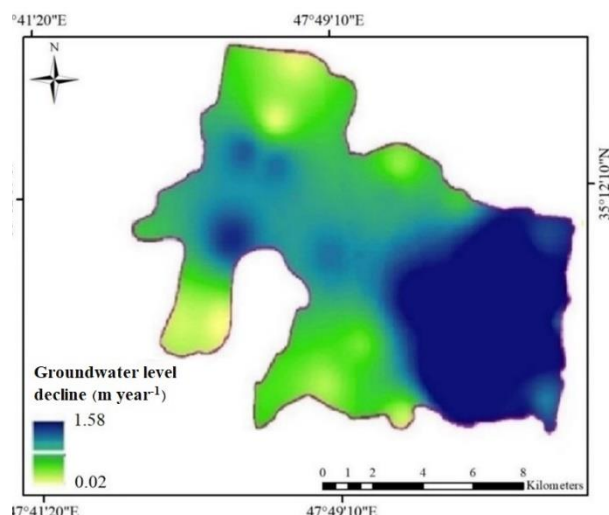
امکان پذیر نیست و در عمل بخشی از آبخوان برای همیشه تحکیم یافته و قابل احیا نخواهد بود.

نقشه محیط آبخوان در شکل ۵-b ارائه شده است. بررسی جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان دشت قروه نشان می‌دهد که اکثر مناطق این دشت حاوی رس و ماسه هستند، در حالی که مواد تشکیل دهنده مناطق شمال غربی و شرقی دشت ترکیبی از آهک، بازالت و سنگ آهک نولومیتی است.

با توجه به اینکه هرچه جنس مواد سازنده یک آبخوان رسی تر باشد، احتمال وقوع فرونشست بیشتر است، برای این مناطق رتبه ۸ و برای سایر مناطق رتبه‌های ۶ و ۷ در نظر گرفته شد. در تحقیقی که آزمون و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص فرونشست در اصفهان انجام داده‌اند، مشخص شده که در مناطقی با خاک ریزدانه، برداشت بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی باعث افزایش فرونشست می‌شود. در حالی که در مناطقی با خاک درشت‌دانه، کاهش سطح آب زیرزمینی با نرخ کمتری موجب فرونشست خواهد شد.

در دشت قروه، تخلیه آبخوان بین ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. براین اساس، مطابق با بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، تخلیه آبخوان در یک کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۵-d). بررسی میزان تخلیه آبخوان در این دشت نشان می‌دهد که میزان تخلیه در مناطق شرقی بیشتر از سایر نواحی است. این امر به دلیل تجمع اراضی کشاورزی در بخش شرقی دشت می‌باشد. خلیفی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای که به بررسی فرونشست در دشت اردبیل پرداخته‌اند، گزارش کرده‌اند که اگر میزان تخلیه از آبخوان بیشتر از میزان تغذیه آبخوان باشد و آبخوان نتواند آب خارج شده را جبران کند، سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست افزایش می‌یابد.

نقشه کاربری اراضی دشت قروه در شکل ۵-e نمایش داده شده است. بر اساس بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، مشاهده می‌شود که اراضی کشاورزی آبی، باغات و مناطق مسکونی بیشترین تأثیر را در احتمال وقوع فرونشست دارند. در نتیجه، مناطق شرقی، مرکزی و غربی دشت قروه که شامل اراضی کشاورزی، باغات و مناطق مسکونی هستند، رتبه‌های پنج تا ده را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که مناطق شمالی دشت که عمدتاً شامل اراضی دیم و بایر هستند، رتبه ۴ را دارند. گنجائیان و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی که به بررسی وضعیت فرونشست در محدوده شهری همدان پرداخته‌اند، به این نتیجه رسیدند که توسعه فیزیکی شهرها، فشار بیشتری بر سازه‌های انسانی



شکل ۴- میزان افت سطح آب زیرزمینی در دشت قروه.

Figure 4- Groundwater level down map in Ghorveh plain.

نتایج و بحث

وزن‌دهی به لایه‌ها

نتایج تحلیل داده‌های ۲۶ حلقه چاه پیرومتری در دشت قروه طی ۳۳ سال گذشته نشان می‌دهد که میزان افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه بین ۰/۰۲ تا ۱/۵۸ متر در سال متغیر بوده است. به‌طور متوسط، افت سطح آب زیرزمینی در این دشت سالانه حدود ۰/۷ متر بوده است.

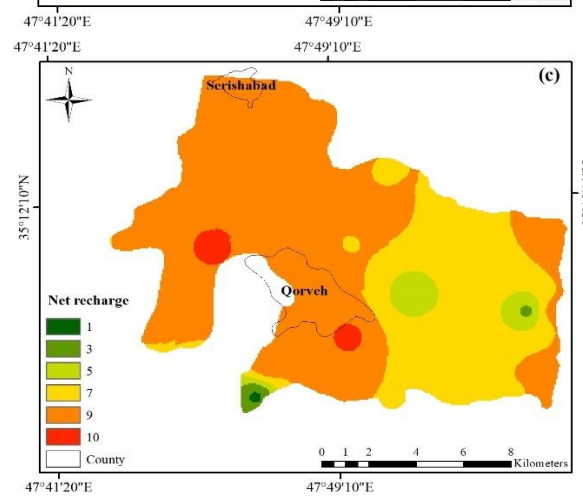
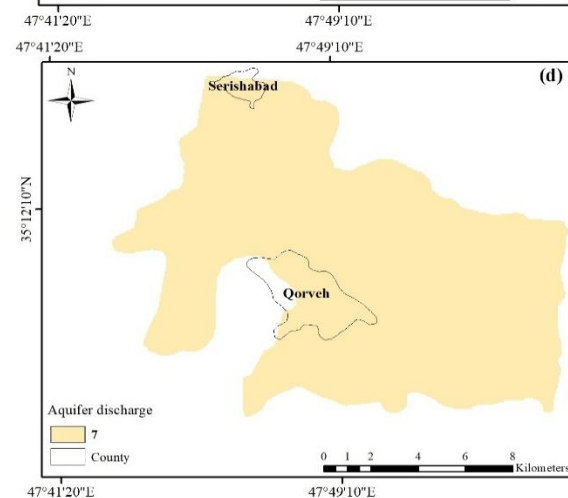
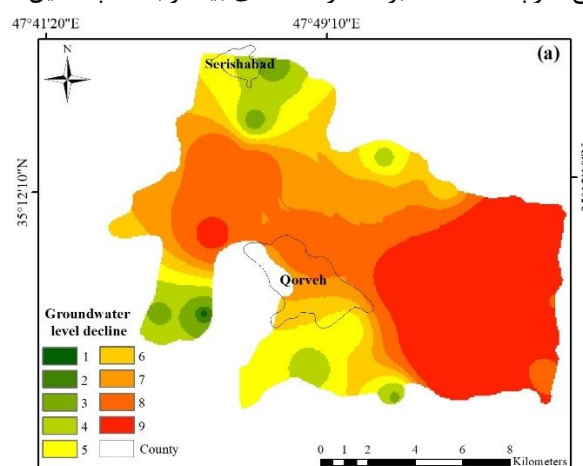
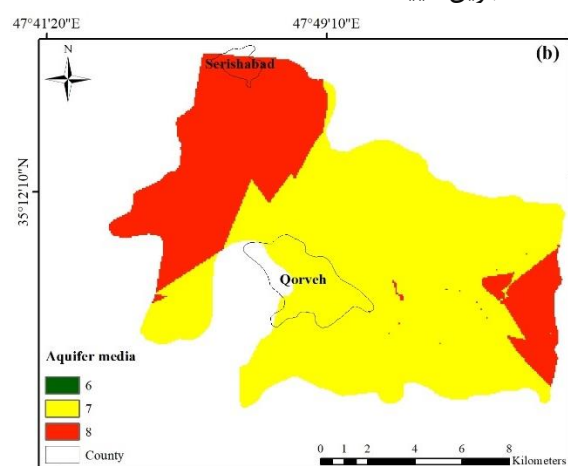
پارامتر افت سطح آب زیرزمینی طبق بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، در نه کلاس طبقه‌بندی شده است. همانطور که در شکل ۵-a مشاهده می‌شود، بیشتر مناطق دشت در کلاس‌های پنج و شش قرار دارند. علاوه‌براین، بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در نواحی شرقی و مرکزی دشت، که عمدتاً شامل اراضی کشاورزی است، مشاهده شده است. کاهش بلندمدت سطح آب زیرزمینی در اثر آبیاری، به‌ویژه در آبخوان‌هایی با لایه‌های سیلت و رس نیمه‌تحکیم یافته، موجب رهاسازی ناگهانی آب از آبخوان‌ها و فشرده شدن آن می‌شود که در نهایت به‌صورت فرونشست در سطح زمین نمایان می‌شود (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵). این پارامتر یکی از موثرترین عوامل در تعیین آسیب‌پذیری فرونشست است و بالاترین وزن را در مدل دارد. ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی فرونشست دشت عباس ایلام با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به این نتیجه رسیدند که افت سطح آب زیرزمینی علت اصلی فرونشست در این دشت می‌باشد که حتی در صورت جبران افت آب زیرزمینی رخ داده، جبران کامل فرونشست رخ داده

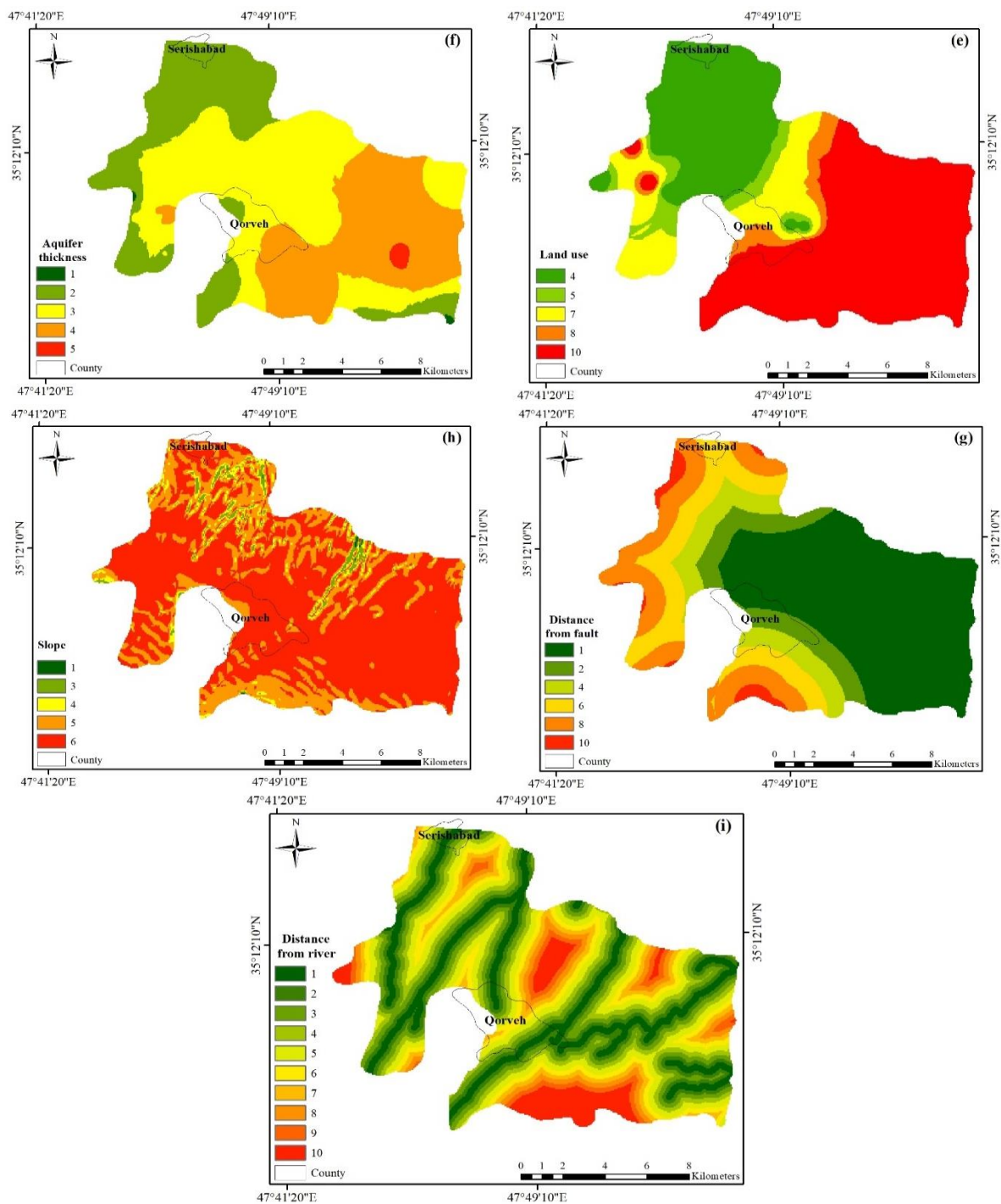
وارد می‌آورد که موجب تشدید میزان فرونشست می‌شود. علاوه بر این، افت منابع آب زیرزمینی در همدان، علت اصلی فرونشست در این منطقه بوده است. در دشت قروه، به دلیل نبود موانع ژئومورفولوژیکی، شرایط برای توسعه اراضی کشاورزی مساعد بوده است. بنابراین، توسعه اراضی کشاورزی و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث افزایش میزان افت سطح آب زیرزمینی شده و به دنبال آن، وقوع پدیده فرونشست در این دشت قابل پیش‌بینی است.

اطلاعات مربوط به ضخامت رسوبات آبرفتی آبخوان دشت قروه از تحلیل داده‌های حاصل از مقاطع ژئوالکتریک به دست آمده است. براساس شکل ۵-f، ضخامت رسوبات بین ۶/۹۲ تا ۱۶۲/۲۴ متر متغیر بوده و بخش عمده‌ای از منطقه در کلاس ضخامت ۵۵ تا ۹۰ متر قرار دارد. در روستاهای خرپله، قاسم، شکوه‌آباد، سنگین‌آباد و جعفرآباد ضخامت رسوبات در بازه ۹۰ تا ۱۳۰ متر مشاهده می‌شود، در حالی که در نواحی شمالی دشت، ضخامت رسوبات به حداقل مقدار خود می‌رسد. به طور کلی، هرچه ضخامت آبرفت در منطقه‌ای بیشتر باشد، پتانسیل

وقوع فرونشست در آن بیشتر خواهد بود. این یافته با نتایج مطالعه شایان و همکاران (۱۳۹۵) که افزایش ضخامت رسوبات آبرفتی با افزایش احتمال فرونشست را گزارش نموده‌اند، هم‌راستا است. خلیفی و همکاران (۱۴۰۰) نیز تأکید کرده‌اند که هرچه ضخامت آبرفت بیشتر باشد، فرونشست زمین نیز شدت بیشتری خواهد داشت.

یکی از عوامل مؤثر در شدت فرونشست، فاصله از گسل‌ها است (شکل ۵-g). نتایج نشان می‌دهد که نواحی جنوبی، مرکزی و شرقی دشت قروه در مجاورت نزدیک‌تری با گسل‌ها قرار دارند و به همین دلیل رتبه‌های بالاتر (۱۰ تا ۶) را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که نواحی غربی و شمال‌شرقی که فاصله بیشتری از گسل‌ها دارند، در کلاس‌هایی با رتبه پایین‌تر قرار گرفته‌اند. به طور کلی، با افزایش فاصله از گسل‌ها احتمال وقوع فرونشست کاهش می‌یابد و بالعکس. این الگو با نتایج پژوهش فرزین‌کیا و همکاران (۱۳۹۷) نیز مطابقت دارد که در آن تأثیر نزدیکی گسل‌های اصلی و فرعی بر افزایش میزان فرونشست در دشت جوبین تأیید شده است.





شکل ۵- لایه‌های ورودی روش GARDLIF-SD.

Figure 5- Input Layers of GARDLIF-SD Method.

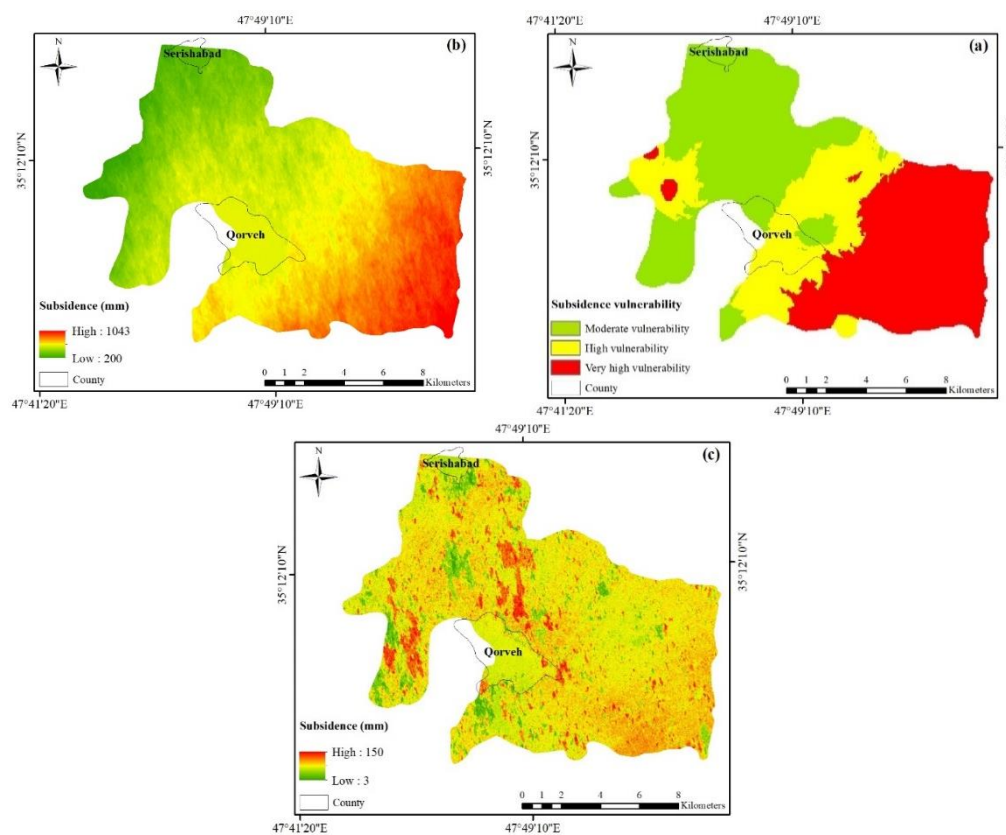
طبقه‌بندی شده و به آن‌ها رتبه‌هایی از یک تا شش اختصاص داده شده است. طبقه‌بندی مذکور نقش مؤثری در تحلیل خطرپذیری فرونشست دارد، چرا که شیب زمین می‌تواند بر نحوه تجمع و حرکت آب در زیرسطح و همچنین الگوهای بهره‌برداری از منابع آب تأثیرگذار باشد.

نقشه شیب دشت قروه در شکل ۵-h ارائه شده است. تحلیل نقشه درصد شیب نشان می‌دهد که بخش اعظم سطح دشت دارای شیب کم بوده و تنها نواحی حاشیه‌ای آبخوان و مناطق مرتفع پیرامونی دارای شیب‌های بالاتر هستند. میانگین شیب در سطح دشت برابر با ۱/۷ درصد برآورد شده است. با توجه به الگوی توزیع شیب، این پارامتر در پنج کلاس مختلف

فرونشست در مجاورت آن کمتر بوده است. همچنین، شایان و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای پیرامون پهنه‌بندی فرونشست در حوزه آبخیز قره‌چای همدان نشان دادند که فاصله زیاد از منابع آب سطحی یکی از عوامل مؤثر در افزایش برداشت از چاه‌ها و در نتیجه، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش احتمال فرونشست است. این نتایج با یافته‌های حاضر نیز تطابق کامل دارند.

با بهره‌گیری از روش GARDLIF-SD و با در نظر گرفتن وزن‌های معیارها مطابق جدول ۱، فرآیند تلفیق لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه 10.8، به کمک تکنیک همپوشانی وزنی انجام شد. در نهایت، نقشه نهایی آسیب‌پذیری فرونشست دشت قروه تهیه گردید (شکل ۶-ا). علاوه بر این، نتایج حاصل از محاسبه میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در شکل ۶-ب و برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در شکل ۶-ج نمایش داده شده است.

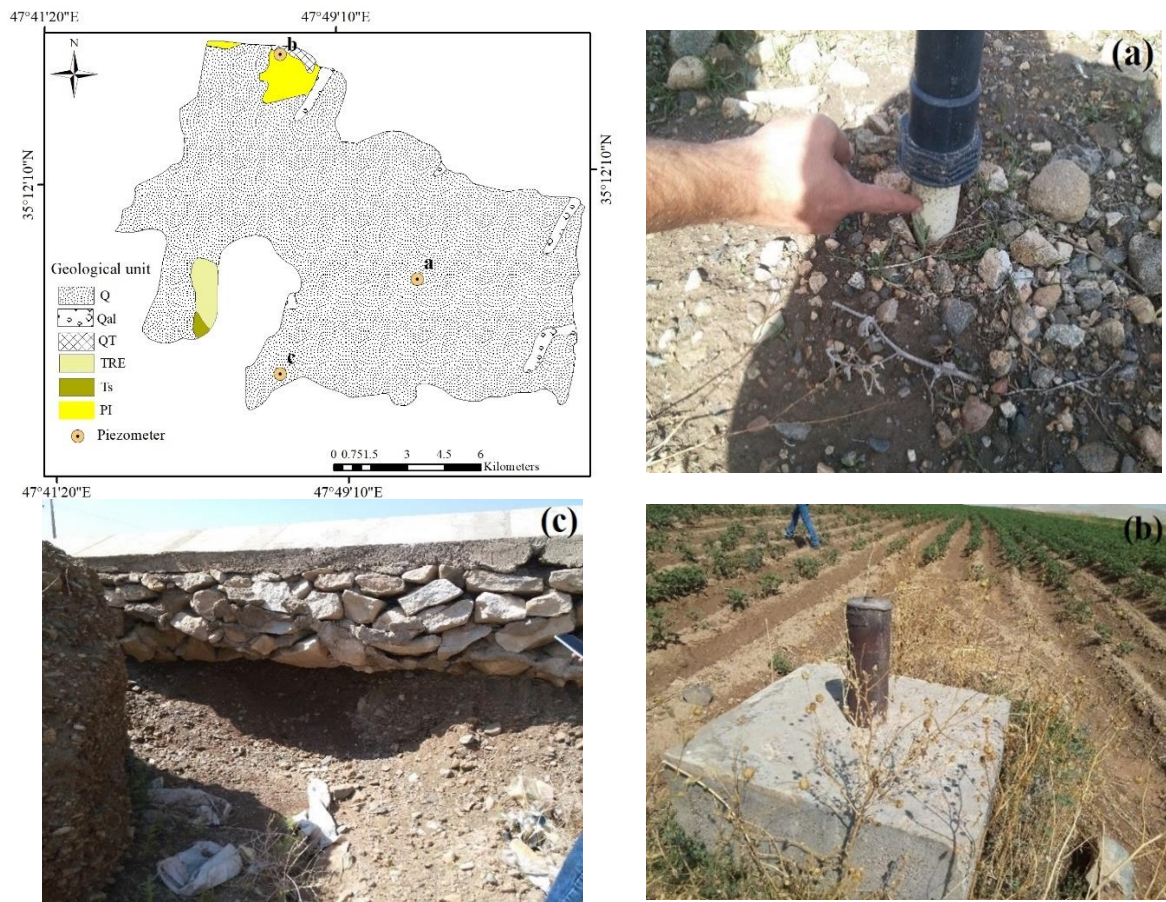
در دشت قروه، سه رودخانه قزل‌اوزن، شور و تلوار جریان دارند که به عنوان مهم‌ترین منابع تغذیه آب سطحی در این منطقه شناخته می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۵-ا نمایش داده شده است، آبخوان در نواحی مرکزی و شرقی دشت به این رودخانه‌ها نزدیک‌تر بوده و در نتیجه، میزان تغذیه آب زیرزمینی در این بخش‌ها نسبت به سایر مناطق بیشتر است. به طور کلی، هرچه فاصله یک منطقه از رودخانه‌های سطحی افزایش یابد، احتمال وقوع پدیده فرونشست نیز بیشتر می‌شود. براین اساس، در طبقه‌بندی نواحی دشت قروه، مناطق نزدیک به رودخانه‌ها رتبه‌های پایین‌تری (نشان‌دهنده احتمال کمتر فرونشست) و مناطق دورتر، رتبه‌های بالاتری (نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر) دریافت کرده‌اند. مطالعات پیشین نیز این روند را تأیید می‌کنند. به عنوان نمونه، فرزین‌کیا و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود پیرامون فرونشست دشت جوبین، گزارش کردند که رودخانه کالشور، به عنوان رودخانه اصلی این دشت، با جریان سالیانه خود و وقوع سیلاب‌ها، نقش مؤثری در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی ایفا کرده و در نتیجه، میزان



شکل ۶-ا- آسیب‌پذیری فرونشست با روش GARDLIF-SD، ب- مقدار فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (۲۰۱۷-۲۰۲۳) و ج- مقدار فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (۲۰۱۷-۲۰۱۸).

Figure 6 a- Subsidence vulnerability via GARDLIF-SD method, b- Subsidence using Radar Interferometry method (2017-2023), and c- Subsidence using Radar Interferometry method (2017-2018).

نقشه تهیه شده در سه کلاس متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه بندی شد. براساس نتایج حاصل از این نقشه، ۳۸/۴۲ درصد از محدوده در کلاس متوسط، ۲۴/۷۸ درصد در کلاس زیاد و ۳۶/۸۰ درصد نیز در کلاس بسیار زیاد آسیب پذیری نسبت به فرونشست قرار دارند. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، بخش های شمالی تا مرکزی دشت قروه در کلاس متوسط و مناطق شرقی و بخشی از نواحی جنوبی در کلاس بسیار زیاد قرار دارند. همچنین، نواحی غربی دشت در کلاس های زیاد و بسیار زیاد جای گرفته اند. وجود اراضی وسیع کشاورزی در این مناطق، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی به ویژه برای مصارف کشاورزی و ماهیت رسی مواد سازنده آبخوان، از جمله عوامل اصلی آسیب پذیری بالای این مناطق نسبت به پدیده فرونشست هستند. فیجانی و زارعی (۱۴۰۳) نیز در مطالعه خود که به بررسی فرونشست در آبخوان هومند-آبسر پرداخته اند، نشان دادند که بیشترین میزان فرونشست در بخش هایی رخ داده است که بیشترین برداشت و افت آب زیرزمینی را داشته اند. بازدیدهای میدانی نیز این موضوع را تأیید می کند؛ به طوری که در اطراف پیزومترهای دیوزند و سریش آباد (شکل ۷-الف و ب) و نیز پیرامون آب بند ویج (شکل ۷-ج)، آثار قابل مشاهده ای از فرونشست زمین گزارش شده است. مطابق نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری، میزان فرونشست در دشت قروه طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در بازه ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی متر بوده است که با مناطق دارای آسیب پذیری بالا در روش پیشنهادی نیز مطابقت دارد. همچنین، میزان فرونشست طی بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در حدود ۳ تا ۱۵۰ میلی متر اندازه گیری شده است (شکل ۶-ج). بررسی مطالعات پیشین نیز مؤید فعال بودن پدیده فرونشست در دشت قروه است. اصغری سراسکانرود و فتح الهی (۱۴۰۱) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، نرخ فرونشست زمین در بخشی از دشت قروه را طی سال های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ بررسی کرده و گزارش داده اند که فرونشست سالانه به ۱۲ سانتی متر می رسد. همچنین، محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ طی سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ به بررسی اثر افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست دشت قروه پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که میزان فرونشست در این بازه بین ۶۱ تا ۲۱۶ میلی متر بوده و بیشترین



شکل ۷- موقعیت چاه‌های پیزومتری (a) دیوزند، (b) سریش‌آباد و (c) آب‌بند ویه‌ج.
Figure 7- Location of Piezometric Wells at a) Divzand, b) Serishabad, c) Vei haj Dike.

نتیجه‌گیری

(۲۰۲۳) به میزان ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی‌متر گزارش شده است که رقم قابل توجهی محسوب می‌شود و در صورت تداوم می‌تواند منجر به تخریب تأسیسات، بناها، آب‌بندهای تغذیه مصنوعی، و اراضی کشاورزی شده و خسارات جبران‌ناپذیری به منطقه وارد نماید. تبدیل دشت قروه به یکی از دشت‌های ممنوعه کشور و منفی شدن بیلان منابع آب در این منطقه نیز گواهی بر بحرانی بودن وضعیت منابع آب زیرزمینی آن است. بازدیدهای میدانی نیز صحت نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش پیشنهادی را تأیید نموده‌اند؛ به‌طوری‌که شکاف‌های مشاهده‌شده در آب‌بندها و نشست پیزومترها، بروز پدیده فرونشست را اثبات می‌کنند.

به‌طور کلی، مطابق با نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و روش GARDLIF-SD، بیشترین میزان فرونشست در مناطق شرقی، جنوبی و غربی دشت و نیز در اطراف پیزومترهای قروه، سریش‌آباد و آب‌بند محدوده ویه‌ج مشاهده شده است. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین میزان فرونشست، منطبق بر اراضی کشاورزی آبی دشت قروه است. بنابراین، می‌توان عامل

دشت قروه از نظر اقلیمی در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده و به‌دلیل میانگین بارش اندک و عدم دسترسی به منابع آب سطحی، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. در واقع، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، منابع آب زیرزمینی است. در پژوهش حاضر، به‌منظور تعیین و شناسایی مناطق مستعد فرونشست در آبخوان دشت قروه، از روش GARDLIF-SD با استفاده از نه پارامتر مؤثر شامل: افت سطح ایستابی، تغذیه خالص، کاربری اراضی، محیط آبخوان، مقادیر تخلیه از آبخوان، ضخامت آبخوان، شیب، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل استفاده شد. نتایج حاصل از این روش نشان داد که ۶۱/۵۸ درصد از مساحت دشت قروه دارای آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد نسبت به پدیده فرونشست است. براساس تحلیل‌های انجام‌شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای، میزان فرونشست در این دشت طی دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در بازه‌ای بین ۳ تا ۱۵۰ میلی‌متر برآورد شد. همچنین، مقادیر فرونشست در بازه بلندمدت‌تر (۲۰۱۷ تا

خلیفی، پ.، ندیری، ع.، نوین‌پور، ا.ع.، قره‌خانی، م.، ۱۴۰۰. ارائه چهارچوب عملی برای تعیین پتانسیل فرونشست زمین (مطالعه موردی: دشت اردبیل). نشریه دانش آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۱۱-۲۳.

داداشی، ث.، صادق فام، س.، ندیری، ع.، محبی، ی.، ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی. مهندسی عمران شریف، ۲۶ (۱)، ۸۵-۶۹. رهنما، ح.، میراثی، س.، ۱۳۹۵. تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر فرونشست زمین. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۶ (۱)، ۵۳-۴۵.

شایان، س.، یمانی، م.، یادگاری، م.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. هیدروژئومورفولوژی، ۹، ۱۳۹-۱۵۸.

شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷. گزارش مطالعات منابع آب دشت‌های قروه-دهگلان.

شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷. گزارش زمین‌شناسی دشت‌های قروه-دهگلان.

عمادالدین، س.، قاسمی، م.، قریشی، د.، ۱۴۰۲. بررسی فرونشست زمین به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت فسا. مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۷ (۴)، ۷۶۷-۷۷۸.

عابدینی، م.، آقایی، ل.، اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). جغرافیا و مخاطرات طبیعی، ۱۱ (۴۴)، ۴۳-۶۸.

فرزین کیا، ر.، امیراحمدی، ا.، زنگنه اسدی، م.، زندی، ر.، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوی با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای-فازی. فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، ۷۶ (۲۱)، ۵۱-۷۱.

فیجانی، ا.، زارعی، پ.، ۱۴۰۳. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان هومند-آب‌سرد با استفاده از روش‌های سنجش

اصلی بروز پدیده فرونشست در این دشت را توسعه اراضی کشاورزی آبی و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی دانست. در نتیجه، پیشنهاد می‌گردد که مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه آب، با در نظر گرفتن تدابیری نظیر نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌ها، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و کف‌شکنی‌های غیرقانونی، تهیه گزارش جامع از وضعیت اراضی کشاورزی دیم و آبی و شناسایی محصولات مناسب و کم‌مصرف آب برای کشت در منطقه، در جهت حفظ منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از گسترش پدیده فرونشست اقدام نمایند.

منابع

آزرم، ز.، مهرابی، ح.، نادری، س.، ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴۴ (۱۱)، ۱۷۳-۱۹۱.

ابراهیمی، ش.، رضایی، ا.، موسوی، ز.، ۱۴۰۲. بررسی فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام در دو دوره افت و خیز تراز آب زیرزمینی به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری. هیدروژئولوژی، ۸ (۲)، ۱۶۹-۱۵۸.

اسدی، م.، گنجائیان، ح.، جاودانی، م.، قادری حسب، م.، ۱۴۰۰. ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. هیدروژئولوژی، ۶ (۱)، ۲۲-۱۳.

اسدزاده، ف.، کاکي، م.، شکيبا، س.، راعي، ب.، ۱۳۹۵. تأثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت قروه و چهاردولی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲ (۳)، ۱۵۳-۱۶۵.

اکبری اریمی، ح.، مومنی، ع.، خراسانی، ا.، ۱۳۹۸. بررسی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت آب زیرزمینی. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۳ (۲۶)، ۹۶-۱۱۰.

اصغری سراسکانرود، ص.، فتح‌الهی، آ.، ۱۴۰۱. برآورد فرونشست سطح زمین در بخشی از دشت قروه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری. نهمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی. ۱۰ اسفند، تهران.

Asadi, M., Ganjaeian, H., Javdani, M., Ghaderi Heso, M., 2021. Assessing the Relationship between Natural Factors and the Rate of Subsidence in the Ivanki Plain using Radar Images. *Hydrogeology*, 6(1), 13-22. [In Persian]

Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S., Raei, B., 2016. The Impact of Drought on the Quality and Level of Groundwater in the Ghorveh and Chahardoli Plain. *Iranian Water Resources Research*, 12(3), 153-165. [In Persian]

Asghari Saraskanroud, S., Fathollahi, A., 2022. Estimation of Land Surface Subsidence in a Part of Ghorveh Plain using Radar Interferometry Technique. The 9th National Conference of the Iranian Geomorphology Association. 1st March, Tehran. [In Persian]

Bouwer, H., 1993. *Groundwater Hydrology*. translated by: Lotfi-Sadigh A. 13. Tabriz: Sahand University of Technology Press. [In Persian].

Chatrsimab, Z., Alesheikh, A., Vosoghi, B., Behzadi, S., Modiri, M., 2020. Land Subsidence Modelling Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar. *ECOPERSIA*, 8(2): 77-87.

Dadashi, S., Sadeghfam, S., Nadiri, A., Mohebbi, Y., 2020. Vulnerability Analysis of the Marand Plain Aquifer using the ALPRIFT Method due to Over-exploitation of Groundwater Resources. *Sharif Civil Engineering Journal*, 26(1), 69-85. [In Persian]

Ebrahimi, Sh., Rezaei, A., Mousavi, Z., 2023. Investigation of Land Subsidence in the Abbas Plain Aquifer of Ilam during Two Periods of Groundwater Level Decline and Rise using Radar Interferometry Technique. *Hydrogeology*, 8(2), 158-169. [In Persian]

Elci, A., Meisina, C., Guardiola-Albert, C., Tomas, R., 2023. Groundwater Flow Modeling for Investigation of Exploitation Induced Land Subsidence. Conference: 50. Worldwide Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH) At: Cape Town, South Africa.

Emadodin, S., Ghasemi, M. M., Ghorayshi, D., 2023. Investigation of Land Subsidence due to Over-exploitation of Groundwater Resources using Radar Interferometry Technique in the Fasa Plain. *Territorial Geography Engineering*, 7(4), 767-778. [In Persian]

Farzinkia, R., Amirahmadi, A., Zangeneh Asadi, M., Zandi, R., 2021. Zoning of Land Subsidence Hazard in the Jovein Plain using Fuzzy-Network Analysis Model. *Geographical Space Scientific Quarterly*, 21(76), 51-71. [In Persian]

از دور و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۹ (۱)، ۱-۱۵.

گنجائیان، ح.، اسدی، م.، منبری، ف.، ابراهیمی، ع.، ۱۴۰۱. تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۴۴ (۱۱)، ۲۳۶-۲۲۱.

نجفی ایگدیر، ا.، چوبین، ب.، شیرانی، ک.، ۱۴۰۳. برآورد فرونشست دشت سلماس با استفاده از دستورالعمل تداخل-سنجی تفاضلی راداری با دریچه مصنوعی. *پژوهش‌های آب‌خیزداری*، ۳۷ (۱۱)، ۹۸-۱۱۳.

لشکری‌پور، غ. ر.، غفوری، م.، رستمی بارانی، ح.، ۱۳۸۷. بررسی علل تشکیل شکافها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر. *مطالعات زمین‌شناسی*، ۱ (۱)، ۹۵-۱۱۱.

مقیم، ه.، محمدزاده، آ.، عباس‌نویں‌پور، ا.، امینی، س.، ۱۴۰۱. ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قروه، استان کردستان). *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، ۱۶ (۳۱)، ۳۱-۱۳.

محمدخان، ش.، گنجائیان، ح.، گروسی، ل.، زنگنه تبار، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ (محدوده مورد مطالعه: دشت قروه). *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*، ۲۸ (۱۱۲): ۲۱۹-۲۲۹.

نادری، ک.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا.، کرد، م.، ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). *اکوهیدرولوژی*، ۵ (۱)، ۸۵-۹۷.

Reference

Abedini, M., Aghayari, L., Asghari Saraskanroud, S., 2022. Assessment and Zoning of Subsidence Risk using the Adaptive MABAC Algorithm and ANP (Case Study: Ardabil Plain). *Geography and Natural Hazards*, 11(44), 43-68. [In Persian]

Akbari Arimi, H., Momeni, A., Khorasani, A., 2019. Investigation of Land Subsidence in the Semnan Plain due to Groundwater Extraction. *New Findings in Applied Geology*, 13(26), 96-110. [In Persian]

- Park, I., Lee, J., Lee, S., 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Center of Eur J Geoscience*, 6(2): 207–218.
- Rahnama, H., Mirassi, S., 2016. Analysis and Evaluation of Parameters Affecting Land Subsidence. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(1), 45-53. [In Persian]
- Scanlon, B., Healy, R., Cook, P., 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Journal of Hydrology*, 10(1): 18-39.
- Shayan, S., Yamani, M., Yadgari, M., 2016. Zoning of Land Subsidence in the Qarachay Basin of Hamadan. *Hydrogeomorphology*, 9, 139-158. [In Persian]
- Zarm, Z., Mehrabi, H., Nadi, S., 2022. Investigation of the Correlation between Land Subsidence and Groundwater Level Changes Using Time Series Analysis of Radar Interferometry (Case Study: Isfahan). *Geography and Environmental Hazards*, 44(11), 173-191. [In Persian]
- Fijani, E., Zarei, P., 2024. Assessment of Land Subsidence Potential in the Hommand-Absard Aquifer using Remote Sensing Methods and its Relation to Groundwater Extraction. *Hydrogeology*, 9(1), 1-15. [In Persian]
- Ganjaeian, H., Asadi, M., Manbari, F., Ebrahimi, A., 2022. Analysis of the Land Subsidence Situation in the Urban Area of Hamadan using Radar and Satellite Images. *Geography and Environmental Hazards*, 44(11), 221-236. [In Persian]
- Ghasemi, A., Bahmani, O., Akhavan, S., Pourghasemi, H.R., 2023. Investigation of land-subsidence phenomenon and aquifer vulnerability using machine models and GIS technique. *Natural Hazards*, 118: 1645–1671.
- Khalifi, P., Nadiri, A., Navinpour, A. A., Gharakhani, M., 2021. Presenting an Operational Framework for Determining Land Subsidence Potential (Case Study: Ardabil Plain). *Journal of Water and Soil Science*, 31(4), 11-23. [In Persian]
- Kurdistan Regional Water Company, 2018. Geological Report of Ghorveh-Dehgolan Plains. [In Persian]
- Kurdistan Regional Water Company, 2018. Report of Water Resources Studies of Ghorveh-Dehgolan Plains. [In Persian]
- Lashkaripour, Gh. R., Ghafouri, M., Roustaei Barani, H., 2008. Investigation of the Causes of Fissure Formation and Land Subsidence in the West of Kashmar Plain. *Geological Studies*, 1(1), 95-111. [In Persian]
- Moghimi, H., Mohammadzadeh, A., Abbas Navinpour, A., Amini, S., 2022. Evaluation of Groundwater Level Changes on the Quality of Groundwater Resources (Case Study; Ghorveh Plain, Kurdistan Province). *New Findings in Applied Geology*, 16(31), 13-31. [In Persian]
- Mohammadkhan, Sh., Ganjaeian, H., Gharousi, L., Zangenatabar, Z., 2019. Assessing the Impact of Groundwater Decline on the Rate of Subsidence using Sentinel-1 Radar Images (Study Area: Ghorveh Plain). *Geographical Information Scientific-Research Quarterly*, 28(112), 219-229. [In Persian]
- Naderi, K., Nadiri, A., Asghari Moghaddam, A., Kord, M., 2018. A New Method for Identifying and Determining Areas at Risk of Subsidence (Case Study: Salmas Plain Aquifer). *Ecohydrology*, 5(1), 85-97. [In Persian]
- Najafi Igdaire, A., Choopin, B., Shirani, K., 2024. Estimation of Land Subsidence in the Salmas Plain using Differential Radar Interferometry Guidelines with Synthetic Aperture. *Watershed Management Research*, 37(11), 98-113. [In Persian]

بررسی روش‌های ترفیع تاج سد باطله معدن مس مزرعه اهر و پیشنهاد طرح بهینه

قدرت برزگری^{۱*}، عطاءاله ندیری^۲، امیرحسن رضائی فرعی^۳

۱- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: gbarzegari@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳

چکیده

سدهای باطله، سازه‌های هستند که برای ذخیره‌سازی باطله‌های حاصل از فرآوری مواد معدنی و صنعتی به کار می‌روند. این سدها نقش حیاتی در کنترل آلودگی‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی دارند. عموماً اجرای این سدها تا تراز نهایی به صورت یک جا و در یک مرحله انجام نمی‌گیرد بلکه با روند فرآیند استخراج و به تبع آن تولید باطله، تراز ارتفاعی این سدها به صورت مرحله‌ای افزایش می‌یابد. سد باطله معدن مس مزرعه از نوع سد سنگریزه‌ای با گنجایش مخزن حدود ۵۵۰ هزار مترمکعب در آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۸ کیلومتری شمال شهر اهر و در ضلع شرقی توده‌های نفوذی شیور واقع شده است. تراز کنونی سد باطله پس از احداث اولیه و دو مرحله ترفیع ۲۰۸۵ (متر بالاتر از سطح دریا) و با ارتفاع حدود ۵۰ متر از بستر می‌باشد و در حال حاضر عملیات ترفیع مرحله سوم آن تا تراز ۲۰۹۵ متر در دست طراحی و احداث می‌باشد. ساختگاه این سد از سنگ‌های گرانیت تشکیل شده و هوازدگی توده‌سنگ در سطح و در راستای درزه‌ها در حد کم تا متوسط ارزیابی می‌گردد. شاخص کیفی توده‌سنگ تا عمق ۲۰ متری از سطح زمین در حد خیلی ضعیف تا ضعیف و در اعماق بیشتر در حد متوسط تا عالی است. در این مقاله گزینه‌های ترفیع تراز تاج سد از تراز ۲۰۸۵ تا ۲۰۹۵ متر مورد بررسی قرار گرفته و براساس نتایج به دست آمده و محدودیت‌های موجود، روش بهینه انتخاب شده و با استفاده از نرم‌افزارهای Slope/W، Sigma/W و Plaxis مورد طراحی قرار گرفته است. براساس نتایج به دست آمده استفاده از روش‌های بالادست‌رو روشی اقتصادی ولی خطرپذیر، گزینه پایین‌دست‌رو غیر اقتصادی ولی ایمن و گزینه مرکزرو حالت بینابینی دارد. به دلیل محدودیت‌های موجود و دوره بهره‌برداری کوتاه مدت (حدود ۱۰ سال)، استفاده از روش تلفیقی ۵ متر به صورت مرکزرو و ۵ متر بالادست‌رو به عنوان روش بهینه پیشنهاد گردید. نتایج طراحی نشان می‌دهد شیب شیروانی پایین‌دست در این حالت لازم است از ۱:۱/۶ (عمودی به افقی) در شرایط کنونی، به ۱:۱/۷۵ (عمودی به افقی) کاهش یابد. میزان جابه‌جایی قائم (نشست) پس از انجام ترفیع در حدود ۵۴ تا ۶۰ سانتی‌متر برآورد گردید. برای مرحله بستن و ترک سد باطله مورد مطالعه، کاهش شیب پایین‌دست بدنه سد و انجام تمهیدات لازم برای تحکیم و خشک شدن باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روانگرایی احتمالی) توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بستن سد باطله، سد باطله معدن مس مزرعه، سد سنگریزه‌ای، طراحی سد، مدلسازی عددی.

مقدمه

در صنعت معدن، باطله مخلوطی از ضایعات کانسنگ‌ها و مواد شیمیایی مختلف است که طی فرآیند تغلیظ و فرآوری تولید می‌شود (Burritt and Christ, 2018; Kossoff et al., 2014). هر معدنی برای ذخیره و نگهداری باطله‌های خود به تأسیسات ذخیره سازه باطله ($TSFs^1$) مناسب همچون سد باطله^۲ نیاز دارد. در دهه اخیر، با اتمام معادن پرعیار،

²Tailing Dam

¹Tailing Storage Facilities

سدهای پایین‌دسترو و مرکزرو پایداری بهتری دارند (Lyu et al., 2019). روان‌گرایی استاتیکی و لرزه‌ای یکی از علل رایج شکست سدهای باطله، به‌ویژه از نوع بالادسترو می‌باشد (Piciullo et al., 2022; Ormann et al., 2013; Zardari, 2014). البته داده‌های آماری ممکن است گمراه‌کننده باشد چرا که به دلیل نیاز به حجم عملیات کمتر و صرفه اقتصادی شرکت‌های معدنی، تعداد سدهای ساخته‌شده به روش بالادسترو بیش از سایر روش‌ها است. به عنوان مثال بیش از ۹۹ درصد سدهای باطله موجود در اسپانیا از نوع بالادسترو هستند (ICOLD, 2001). طبق داده‌های جامع تاریخی، بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۴، آمار جهانی شکست سدهای باطله از ۱۶۰ مورد فراتر رفته و میانگین سالانه آن بین ۲ تا ۵ مورد است (Zhao et al., 2024; WISE, 2024). این حوادث علاوه بر آسیب‌های زیست‌محیطی شدید، موجب تلفات انسانی قابل توجهی شده‌اند. برخی از فاجعه‌بارترین شکست‌ها به ویژه در مناطقی با فعالیت‌های معدنی زیاد، در دوره ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰ رخ داده است (Yu et al., 2025). هنگامی که سد باطله تخریب می‌شود، خسارات زیادی را به محیط‌زیست، تولیدات کشاورزی، جان و دارایی مردم وارد می‌سازد (Kossoff et al., 2014). در سطح جهانی، صنعت معدن شاهد گسیختگی‌های متعدد سدهای باطله بوده است که منجر به فجایع زیست‌محیطی و انسانی شده و به عنوان یکی از چالش‌های اساسی فرآیند استخراج معادن، نگرانی‌های فرآیندهای ایجاد کرده است. سوابق نشان می‌دهد که هزاران نفر در اثر شکست سدهای باطله جان خود را از دست داده‌اند (WISE, 2012). از سال ۱۹۱۵، در مجموع ۲۵۷ مورد شکست با حدود ۲۶۵۰ مورد مرگ و میر و ۲۵۰ میلیون متر مکعب باطله آلوده‌کننده محیط‌زیست ثبت شده است. تقریباً ۵۰ درصد (۱۱۵ میلیون متر مکعب) از حجم باطله‌های تخلیه شده پس از سال ۲۰۰۰ ثبت شده است که حدود ۶۴۰ مورد مرگ و میر به همراه داشته و حاکی از افزایش چالش ذخیره‌سازی ایمن باطله‌های معدنی از نظر مقیاس و پیچیدگی می‌باشد (GRIDA, 2016). تعداد تأسیسات ذخیره باطله‌ها (TSF) های ساخته‌شده در سراسر جهان حدود ۳۰۰۰۰ مورد گزارش شده است (WMTF, 2020). در ۱۸۰۰۰ معدن گزارش‌شده در سراسر

بهربرداری از معادن کم‌عیار با توجیه اقتصادی کمتر گسترش یافته و تعداد سدهای خطرناک یا مشکل‌دار نیز در حال افزایش است (Nimbalkar et al., 2018). در حال حاضر حجم باطله‌های معدنی در حدود هزاران میلیون تن در سال تخمین زده می‌شود که به اندازه فرآیندهای زمین‌شناسی در سیمای زمین تأثیرگذار هستند. علاوه بر این، با افزایش تقاضا و توجیه اقتصادی بهره‌برداری از ذخایر کم‌عیارتر، پیش‌بینی می‌شود که حجم جهانی باطله‌های معدنی روند افزایشی قابل توجهی داشته باشد. کاهش ذخایر فسیلی و به تبع آن افزایش بهره‌برداری از ذخایر ماسه‌های نفتی قیری، تأثیر جدی بر این روند خواهد داشت (Kasperski and Mikula, 2011).

سدهای باطله جزوه بزرگترین سازه‌های ساخته‌شده توسط مهندسان ژئوتکنیک هستند که در مقیاس جهانی، حوادث مربوط به شکست این سازه‌ها منجر به آلودگی جدی زیست‌محیطی و تلفات جانی شده و هنوز درک کافی از مکانیزم‌های گسیختگی آن‌ها وجود ندارد (Mendoza et al., 2006). هر سد باطله، برای هر مکان خاص، سازه‌ای منحصر به فرد است و به طراحی ویژه نیاز دارد و نمی‌توان از طرح‌های معمولی تپییک و از پیش طراحی‌شده برای احداث این سازه‌ها استفاده نمود (Morgenstern et al., 2016). مصالح مورد استفاده برای احداث سدهای باطله از مصالح طبیعی و سنگدانه‌های متراکم شده حاصل از خاکبرداری روباره معدنی و یا از مصالح استخراج شده از منبع قرضه مشخص تأمین می‌شود. برای احداث سدهای باطله، ابتدا یک سد اولیه به عنوان پاشنه تکیه‌گاه و شروع‌کننده^۱ با ارتفاع مشخص ساخته شده و ارتفاع آن به تدریج در طول بهره‌برداری از معدن، افزایش می‌یابد (Edraki et al., 2014). اساساً دو نوع سازه خاکی برای ذخیره و نگهداری باطله‌ها در معادن مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ سدهای نگهدارنده و خاکریزهای قابل ترفیع. سدهای نگهدارنده عموماً قبل از شروع بهره‌برداری، به طور کامل تا ارتفاع نهایی احداث می‌شوند، در حالی که خاکریزهای مرتفع‌شونده به صورت مرحله‌ای با استفاده از سه روش متداول بالادسترو، پایین‌دسترو یا مرکزرو، همزمان با بهره‌برداری از معدن و براساس نیاز تکمیل می‌شوند (Vick, 1990; EPA, 1994). احتمال آسیب‌دیدن سدهای بالادسترو زیاد است

¹ Starter Dam

گسیختگی هستند و برای کاهش خطر، استفاده از سیستم زهکشی، تحلیل‌های مهندسی، ابزار دقیق، نظارت، بازرسی و مطالعه عملکرد سدهای مشابه لازم است (Stark et al., 2022).

اکثر خرابی سدها با علائم هشدار دهنده‌ای همراه هستند، به جز مواردی که در اثر زلزله یا طوفان‌های بزرگ باشند. بنابراین، برنامه‌های نگهداری و نظارتی جامع، یک الزام اساسی برای مدیریت مؤثر دفع باطله به‌شمار می‌رود (Martin and Davies, 2000). ترک‌خوردگی، نشست سازه و وجود نقاط مرطوب روی سطح بدنه سد، همگی نشانه‌های دیداری کیفی از مشکلات بالقوه هستند. از پی‌زومترها، شیب‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها می‌توان در یک پروتکل نظارتی با طراحی معقول بهره برد (Vandeberg et al., 2011). خطرات ناشی از حوادث تخلیه باطله سدها، در رتبه هجدهم در کنار خطرات ناشی از زلزله، وباء، سیل و انفجار بمب هیدروژنی قرار دارد (Kemper and Sommer, 2002). بیشتر تحقیقات در مورد سدهای باطله بر نشست، تحکیم، پایداری و ویژگی‌های لرزه‌ای آن‌ها تمرکز دارد (Lyu et al., 2019). در حال حاضر، اکثر سدهای باطله به‌صورت خاکریزهای نیمه اشباع تا اشباع ساخته می‌شوند که کنترل نشست و پایداری شیب آن‌ها بسیار مهم است (Shahriari and Aydin, 2017). محدودیت‌های دسترسی به سایت، هزینه زیاد و زمان لازم برای انجام آزمایش‌های میدانی باعث شده که اکثر محققان به شبیه‌سازی‌های عددی همچون روش المان محدود (FEM) روی آورند (et al., 2022). Ledesma (2012) و Ozer and Bromwell، از روش‌های تعادل حدی و المان محدود برای تحلیل‌گذاری نشست سدهای باطله تحت شرایط کاهش بسیار سریع سطح آب و پایداری شیب در آن شرایط استفاده کرده‌اند. Alizadeh and Latifi (2025)، با استفاده از روش المان محدود (FEM) و مدل‌سازی سد باطله بالادست‌رو ژائولی^۱ نتیجه گرفته‌اند که موقعیت دریاچه، مکش ماتریکس و جدایش، بیشترین تأثیر را بر موقعیت خط فریاتیک دارند. خرابی سدهای باطله در اثر زلزله-های شدید به‌ویژه در شیلی و ژاپن، اهمیت تحلیل پایداری لرزه‌ای در دهه‌های گذشته را زیاد کرده است (Penman, 2001). مطالعات کمی در مورد پایداری لرزه‌ای سدهای باطله

جهان، میزان شکست در ۱۰۰ سال گذشته، ۱/۲ درصد تخمین زده شده است. در حالی که میزان شکست سدهای ذخیره آب در حدود ۰/۰۱ درصد است (ICOLD, 2001). نرخ فعلی شکست سدهای باطله بزرگ، حدود دو تا پنج مورد در سال تخمین زده می‌شود، این نرخ بسیار بالاتر از نرخ خرابی سدهای مخزنی آب است که تقریباً یک در ۱۰۰۰۰ است (Davies, 2001). دلایل آسیب‌پذیری بیشتر سدهای باطله نسبت به سایر انواع سازه‌های ذخیره آب، عبارتند از (Rico et al., 2008): (۱) خاکریزهای ساخته‌شده با مصالح خاکی، باطله‌های معدنی و یا مصالح روباره؛ (۲) سدهایی با ذخیره قابل‌توجهی از باطله آبدار (به اضافه آب‌های ناشی از نزولات جوی) که به‌صورت مرحله‌ای مرتفع می‌شوند؛ (۳) فقدان مقررات کافی و استانداردهای طراحی؛ (۴) فقدان الزامات لازم برای حفظ پایداری سدها از جمله نظارت و کنترل مستمر در مراحل احداث و بهره‌برداری؛ (۵) هزینه بالای نگهداری سدهای باطله پس از تعطیلی فعالیت‌های معدنی (فاز بستن و ترک سد) و (۶) با توجه به این که سدهای باطله، منافع اقتصادی مستقیمی برای شرکت بهره‌بردار ندارد لذا اهمیت و تأثیر آن‌ها بر سلامت اقتصادی و زیست‌محیطی نادیده گرفته می‌شود (Niekerk and Viljoen, 2005). حداقل ۳۵۰۰ سد باطله در سراسر جهان وجود دارد (Martin and Davies, 2000) و مساحت این سدها از چند هکتار تا چند هزار هکتار می‌باشد (Davies et al., 2007; Lottermoser, 2000). حدود ۷۶ درصد از حوادث در سراسر جهان مربوط به سدهای باطله بالادست‌رو است، ۵۱ درصد از حوادث گزارش‌شده توسط ICOLD، ناشی از ناپایداری شیروانی سدها به‌دلیل تنش بیش از حد در پی، بدنه سد و افزایش فشار منفذی است (ICOLD, 2001). براساس نتایج به‌دست آمده وقوع سیلاب و تشدید الگوهای بارش، علت اصلی خرابی این تأسیسات می‌باشد.

عوامل ناپایداری سدهای باطله شامل خرابی استاتیکی، نشست (فرسایش داخلی)، سرریز شدن، ناپایداری لرزه‌ای، مشکلات سازه‌ای و فونداسیون و از همه مهم‌تر، موقعیت خط فریاتیک می‌شود (UNEP, 1994). تراز خط فریاتیک نقش اساسی در خرابی‌های ناشی از سرریز شدن و نشست سدها دارند (Lei et al., 2022). پایداری شیب، زلزله و سرریز شدن سه علت اصلی

¹ Zhaoli

احداث شده بود. این حادثه در سال ۱۳۸۹، پس از باران شدید اتفاق افتاد و منجر به تخلیه باطله به رودخانه مزرعه از سرشاخه‌های رودخانه اهر گردید. (Khamseh et al., 2017) اثرات زیست‌محیطی این فاجعه معدنی را بررسی کرده‌اند. در این مقاله ضمن ارائه پیشینه تحقیقات انجام شده در این زمینه و بیان اهمیت موضوع، مزایا و معایب روش‌های مختلف ترفیع تراز تاج سد باطله معدن مس مزرعه در حدود ۱۰ متر بررسی شده و روش بهینه براساس محدودیت‌های پروژه، با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد طراحی قرار گرفته و همچنین توصیه‌هایی برای مرحله خاتمه و بستن سد مذکور ارائه شده است. این تحقیق در نوع خود از مقالات و ادبیات فنی موجود متمایز بوده و از نوع‌آوری لازم برخوردار است. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند در توسعه تجربیات و ارتقای سطح مطالعه و طراحی این نوع سدها تأثیر به‌سزایی داشته باشد.

به روش پایین‌رو انجام یافته و مرحله دوم ترفیع آن در سال ۱۳۹۹ تا تراز ۲۰۸۵ متر به روش بالارو انجام شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸). با توجه به پر شدن مخزن، ترفیع تراز تاج سد برای بار سوم به مقدار ۱۰ متر دیگر و تا تراز ۲۰۹۵ متر در دست طراحی و اجراست. موقعیت جغرافیایی، تصویر هوایی و نیم‌رخ عرضی بدنه سد که مراحل مختلف احداث در آن مشخص شده است به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای احداث بدنه سد باطله مورد مطالعه از مصالح سنگریزه‌ای با دانه‌بندی متفاوت شامل مصالح 3A، 3B و 3B1 (به‌ترتیب درشت دانه به درشت دانه‌تر) و همچنین از مصالح فیلتر (2A) و زهکش (2B) به‌منظور کنترل زهکشی داخل بدنه سد استفاده شده است. توزیع دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

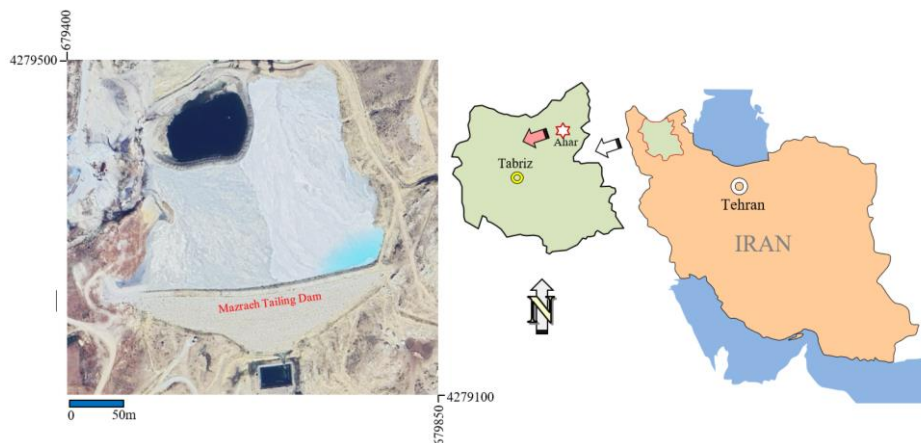
وجود دارد که در آن‌ها نیروهای لرزه‌ای ماهیت شبه‌استاتیکی دارند. (Coulibaly et al., 2017) برای ارزیابی پایداری سد باطله معدن وست وود^۱ از مدل‌سازی عددی با Slope/W به همراه پایش ژئوفیزیکی مبتنی بر روش‌های مقاومت الکتریکی استفاده کرده‌اند. (Jakka and Ramana, 2011) با استفاده از مدل‌های Slope/W و Quake/W، پایداری دینامیکی سدهای باطله ساخته‌شده با مصالح خاکی را ارزیابی نموده و نتیجه گرفتند که سدهای باطله پایین‌دست‌رو عموماً پایدارتر از سدهای بالادست‌رو هستند. (Naeini and Akhtarpour, 2018) رفتار دینامیکی سد باطله معدن سونگون با ارتفاع ۱۷۰ متر با اعمال شرایط نشت، تحکیم و بارگذاری ناشی از ساخت مرحله‌ای به روش مرکرو را با استفاده از نرم‌افزار Sigma/W بررسی کرده‌اند. یکی از مهمترین حوادث مربوط به گسیختگی سدهای باطله در کشور ایران، گسیختگی سد باطله سابق معدن مس مزرعه می‌باشد که با استفاده از خاکریز

مواد و روش‌ها

مشخصات سد باطله معدن مزرعه

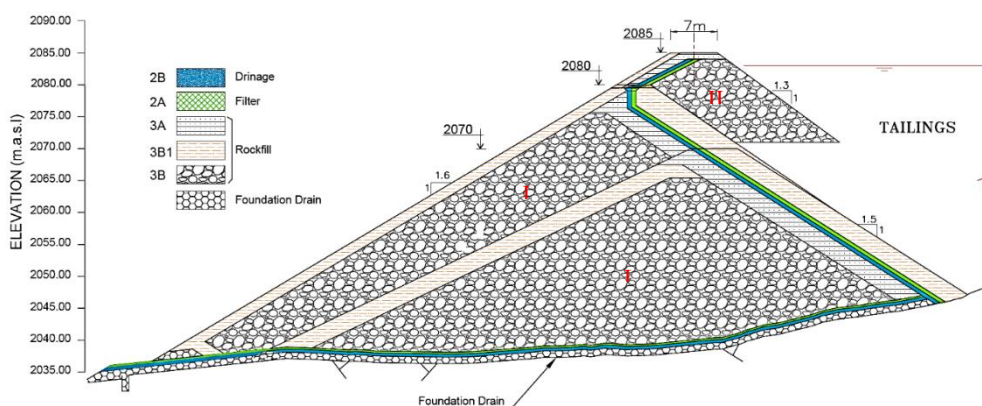
سد باطله معدن مس مزرعه در استان آذربایجان شرقی، در ۱۸ کیلومتری شمال شهر اهر و در دامنه جنوبی کوه‌های شیور قرار گرفته است. هدف از احداث و ترفیع این سد باطله، جمع‌آوری و ذخیره پساب‌ها و باطله‌های کارخانه تغلیظ معدن مس مزرعه و سونگون است. راه دسترسی به سد مورد مطالعه از طریق جاده آسفالت اهر به روستای مزرعه و در ادامه جاده اختصاصی معدن مس مزرعه می‌باشد. این سد باطله در مرحله کنونی با طول تاج حدود ۳۶۰ متر، عرض تاج ۷ متر، ارتفاع حدود ۵۵ متر از پی و دارای گنجایش مخزن ۵۵۰ هزار مترمکعب می‌باشد. احداث این سد باطله تا تراز ۲۰۷۰ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۰ انجام شده است. به‌منظور افزایش گنجایش مخزن، مرحله اول ترفیع در سال ۱۳۹۶ تا تراز ۲۰۸۰

¹ Westwood



شکل ۱- موقعیت و تصویر ماهواره‌ای سد باطله معدن مس مزرعه.

Figure 1- Location and Satellite images of Mazraeh copper mine tailing dam.



شکل ۲- نیمرخ عرضی و مراحل ترفیع سد باطله معدن مس مزرعه اهر (برزگری و همکاران، ۱۴۰۲).

Figure 2- Typical cross-section and raised stages of Mazraeh copper mine tailing dam (Barzegari et al., 2023).

جدول ۱- مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای بدنه سد (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

Table 1- Grain size characteristics of rockfill materials in the study dam body (Toossab consulting company, 2018).

Material type		Grain size distribution limits (mm)			
		% < 2.36	% < 19	D _{max}	D _{min}
Rock fill	3A	15	40	400	-
	3B	10	30	800	-
	3B1	10	30	1000	-
Filter	2A	50	90	19	0.075
Drainage	2B	0	19	210	1

زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد باطله مزرعه

گرانودیوریتی است ولی در ساختگاه سد باطله مزرعه، جنس توده نفوذی از نوع گرانیب است. در شمال ساختگاه سد باطله، توده نفوذی شیورداغ در طی الیگوسن به داخل سنگ‌های رسوبی و ساب‌ولکانیک منطقه نفوذ کرده و موجب اسکارن‌زایی، تبلور مجدد و تولید شیبست‌های لکه‌دار و هورنفلس گردیده است. مهم‌ترین تشکیلات آذرین کواترنری در منطقه، شامل گدازه‌های تراکی‌آندزیتی هستند که البته در ساختگاه سد باطله رخنمون ندارند اما در ارتفاعات شرقی

با توجه به بررسی‌های میدانی و براساس نقشه زمین‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی با سن الیگوسن موسوم به توده نفوذی شیور، قدیمی‌ترین و مهم‌ترین واحد شناخته شده در منطقه است، به‌طوری که ساختگاه سد باطله به‌طور کامل در بخش جنوب شرقی این توده نفوذی واقع شده است. ترکیب سنگ‌شناسی این توده با توجه به حجم و گسترش آن در منطقه متفاوت است، به‌گونه‌ای که در بخش‌های غرب و جنوب غربی کوارتزمونزونیت تا کوارتزمونزودپوریت و گرانیبیت تا

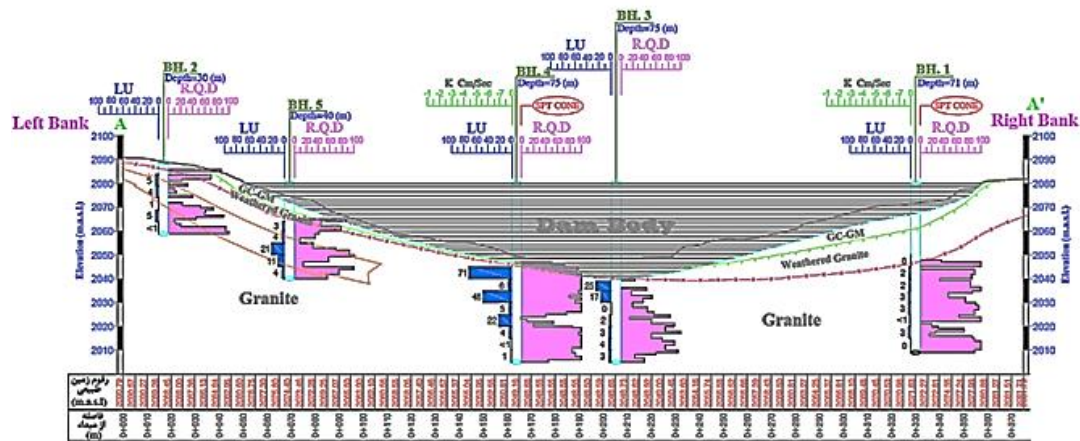
دارد. توده سنگ گرانیتهی در تکیه‌گاه چپ به‌صورت هوازده رنگ برگشته و با درجه درزه‌داری متوسط تا بالا دیده می‌شود، در این تکیه‌گاه سیستم ناپیوستگی‌ها به‌وسیله کلسیت پر شده‌اند. در تکیه‌گاه راست نیز آثار هوازده‌گی درجه پایین تا متوسط در توده‌سنگی گرانیتهی مشهود است.

جوان‌ترین رسوبات محدوده محور سد، شامل رسوبات عهد حاضر است. این رسوبات به‌صورت رسوبات واریزه‌ای ناشی از هوازده‌گی توده‌سنگ‌های دامنه و همچنین رسوبات ناشی از فرسایش و آبشستگی‌ها در مسیر آبراهه‌ها هستند. گسترش وسیع تشکیلات ولکانیکی در منطقه و هوازده‌گی برجای آن‌ها منجر به تشکیل نهشته‌های عهد حاضر با ضخامت متغیر با رنگ خاکستری و مقاومت پایین بر روی واحدهای سنگی قدیمی‌تر بر روی دامنه‌ها و مسیر آبراهه‌ها شده است. این واحد به‌صورت پوشش رسوبی با ضخامت کم بر روی واحدهای سنگ‌بستر قرار گرفته‌اند. ضخامت این واریزه‌ها در ساختگاه سد حداکثر ۵ متر و بعضاً تا ۷ متر تخمین زده می‌شود.

به‌منظور انجام مطالعات زیرسطحی در زمان ترفیع مرحله اول سد باطله، ۵ گمانه اکتشافی در موقعیت محور سد شده است. موقعیت گمانه‌ها و نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی در راستای محور سد باطله در شکل ۳ نمایش داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) در تکیه‌گاه راست با کیفیت بسیار خوب تا عالی ارزیابی شده است. در بستر و تکیه‌گاه چپ، این شاخص تا عمق ۲۰ متری در حد خیلی ضعیف و ضعیف قرار دارد که البته با افزایش عمق، کیفیت آن بهبود یافته و در رده متوسط تا عالی قرار می‌گیرد. طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ به روش ژئومکانیکی (RMR) و Q، به‌ترتیب حاکی از کیفیت نسبتاً مناسب تا مناسب توده‌سنگ و رده پایین تا مناسب توده‌سنگ می‌باشد. شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، واحد گرانیتهی در حد ۵۰-۶۰ است که در مناطق دگرسان شده در حد ۴۵-۳۵ و در زونهای خرد شده و گسلی تا ۲۵-۲۰ کاهش می‌یابد. در شکل ۴ تصاویری از برونزد توده‌سنگ گرانیتهی سنگ بستر در تکیه‌گاه‌های سد نشان داده شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷).

ساختگاه با فاصله حدود ۷۰۰ متر و بر روی توده گرانیتهی-گرانودیوریتی شیور در منطقه به‌صورت سطحی برونزد دارند. ساختگاه سد باطله معدن مس مزرعه بر روی آبراهه اصلی که در پایین‌دست به رودخانه مزرعه‌چای ملحق می‌شود احداث شده است. در پایین‌دست محور سد باطله، در مجاورت بستر آبراهه‌های اصلی و فرعی، رسوبات آواری کواترنری که حاصل فرسایش توده‌سنگ‌های گرانیتهی است، به‌صورت نهشته‌های آبرفتی نابرجا با ضخامت کم ته‌نشست شده است. این رسوبات عمدتاً شامل واریزه‌ها و رسوبات ناشی از فرسایش و آبشستگی-های دامنه‌ای و رسوبات بستر رودخانه‌ای می‌باشد. در بالادست مخزن، بلوک‌های سنگی نابرجا ناشی از سقوط قطعات سنگی در اثر هوازده‌گی و فرسایش توده سنگ‌های موجود قابل مشاهده است.

از ویژگی‌های مهم ریخت‌شناسی این ناحیه، تنوع در اشکال ناهمواری‌ها و چین خوردگی‌ها و بالآمدگی‌ها است که تحت تأثیر تکتونیک منطقه ایجاد شده‌اند. ساختگاه سد باطله مزرعه، شامل دره‌ای با شیب خط‌القدر رو به رودخانه است، شیب دامنه در تکیه‌گاه راست در حدود ۱۵ درجه و در تکیه‌گاه چپ در حدود ۱۳ درجه است. آبراهه موجود در محل مخزن عمدتاً تحت تأثیر عوامل تکتونیک و فرسایشی سنگ بستر تشکیل شده و به‌دلیل عملکرد چند فاز تکتونیک در منطقه، امتداد آبراهه اصلی ساختگاه سد در امتداد یک شکستگی ایجاد شده است. به‌نظر می‌رسد علاوه بر تنش‌های غالب تکتونیک در منطقه، نفوذ توده گرانیتهی-گرانودیوریتی شیور در شمال غرب منطقه مورد مطالعه و وجود نیروهای فشارشی ناشی از تزریق توده ولکانیکی، نقش مهمی در ایجاد سیستم گسل‌ها و درزه‌ها و ناپیوستگی‌های منطقه با راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب داشته است. یکی از بارزترین سیستم شکستگی منطقه مورد مطالعه، گسل‌های با امتداد شمال، شمال‌شرق- جنوب، جنوب غرب است. عملکرد غالب گسل‌ها در محدوده مطالعه غالباً از نوع شیب‌لغز با جابه‌جایی عمودی همراه با مؤلفه امتدادلغز می‌باشد. براساس مطالعات سطحی و زیرسطحی انجام یافته، توده‌سنگ تشکیل‌دهنده کل ساختگاه از سنگ‌های گرانیتهی خاکستری رنگ به سن الیگوسن تشکیل شده‌اند که از بخشی گستره شرقی باتولیت شیور بوده و در منطقه گسترش وسیعی



شکل ۳- نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی و موقعیت گمانه‌ها در راستای محور سد باطله معدن مزرعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

Figure 3- Boreholes location and engineering geological cross-section along the Mazraeh copper mine tailing dam (Toossab consulting company, 2018).



شکل ۴- رخنمون توده سنگ گرانیتی در تکیه گاه چپ (تصویر چپ) با هوازدگی بالا و تکیه گاه راست (تصویر راست) با هوازدگی پایین تا متوسط.

Figure 4- Granitic rockmass outcrop in the left abutment (left) with high weathering and the right abutment (right) with low to moderate weathering.

سطوح طراحی لرزه ای

کنترل شده از آن تخلیه شود. دوره بازگشت MDE معمولاً به میزان قابل ملاحظه‌ای از OBE بیشتر در نظر گرفته می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۴). احتمال رویداد حداکثر زلزله محتمل در طول عمر مفید سازه بسیار کم و بعید است اما غیرممکن نیست. در روش‌های احتمالی دوره بازگشت آن بسیار طولانی و اغلب تا حدود ۱۰۰۰۰ سال و در استاندارد FHWA, (2009)، دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال برای این زمین‌لرزه در نظر گرفته شده است. در صورت وقوع چنین زمین‌لرزه‌ای، انتظار می‌رود آسیب‌های وارد شده به سازه غیرقابل جبران باشد اما نایستی سبب فاجعه اجتماعی شود. سناریوهای لرزه‌ای مهم برای ساختگاه مورد مطالعه شامل فعال شدن گسل‌های قلعه جوق، انجرد، صوفیان، میشو، شمال تبریز با سازوکارهای فشاری و راستالغز است. مهمترین سناریوی

برای بررسی یک زمین‌لرزه از پارامترهایی که توصیف‌کننده جنبش نیرومند زمین باشد، نظیر بیشینه مقادیر شتاب یا سرعت، طیف پاسخ و شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده استفاده می‌شود. برای تحلیل پایداری بدنه سد در برابر بارهای شبه استاتیکی ناشی از زلزله لازم است مشخصات زلزله مبنای بهره‌برداری (OBE^1)، حداکثر زلزله طراحی (MDE^2) و یا حداکثر زلزله محتمل (MCE^3) تعیین گردد. در صورت وقوع زلزله مبنای دوره بهره‌برداری، آسیب‌های وارده محدود و قابل اصلاح بوده و سد باید کماکان قابل بهره‌برداری باشد. اما در حداکثر زلزله طراحی، خرابی‌ها دامنه‌ی وسیع‌تری داشته و بهره‌برداری مختل می‌شود اما در این شرایط هم می‌بایست یکپارچگی سازه‌ای سد حفظ شده و آب یا رسوب به صورت

³ Maximum Credible earthquake

¹ Operating basis earthquake

² Maximum design earthquake

گسیختگی‌ها وجود دارد. در روش بالارو، پس از احداث خاکریز اولیه، مواد باطله از پیرامون تاج آن تخلیه می‌شود سپس بستر عریض بوجود آمده در اثر این تخلیه، به‌عنوان پی برای خاکریز بعدی عمل می‌کند. در این روش باطله‌ها باید شامل ماسه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد. علاوه بر دانه‌بندی باطله، تراز سطح فریاتیک و روان‌گرایی در عملکرد آن‌ها مؤثر هستند. سطح فریاتیک سطح اشباع در ذخیره‌گاه و خاکریز است.

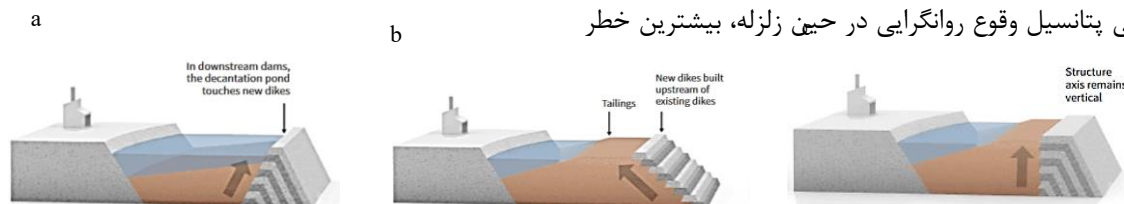
در سدهای پایین‌دست‌رو که برای به حداقل رساندن خطرات گسیختگی ساخته می‌شوند از مصالح سنگریزه‌ای متراکم استفاده می‌شود. برای این منظور می‌توان از ماسه و شن نفوذناپذیر برای پایین آوردن سطح فریاتیک استفاده نمود. مرحله بعدی احداث بر روی شیروانی پایین‌دست قبلی قرار گرفته و تاج سد به سمت پایین‌دست تغییر مکان می‌یابد. این روش نسبت به روش بالادست‌رو به مراتب هزینه و مزیت بیشتری دارد. از مزایای این روش، امکان تعبیه بخش‌های کنترل نشت از قبیل هسته نفوذناپذیر و زهکش داخلی در بدنه سد است. همچنین به علت تراکم مصالح خاکریز، در برابر روان‌گرایی مقاوم هستند. از معایب این روش، حجم زیاد مصالح موردنیاز برای افزایش ارتفاع سد است که این حجم با افزایش ارتفاع خاکریز در هر مرحله به صورت صعودی افزایش می‌یابد. سدهای مرکزرو، روش بینابینی دو روش فوق‌الذکر از نظر هزینه و حجم هستند. در این روش، بدنه سد به‌طور متوالی با قرار دادن مصالح ساختمانی در ساحل بالادست و بر روی شیب پایین دست بدنه قبلی ساخته می‌شود. محور بدنه سد در مراحل احداث و ترفیع بر روی هم منطبق است. این نوع خاکریز زمانی در برابر فعالیت‌های لرزه‌ای پایدار خواهد بود که مصالح به خوبی متراکم شده و زهکش داخلی مناسبی تعبیه شده باشد.

لرزه‌ای گستره طرح مربوط به گسل قلعه جوق با حداکثر پتانسیل لرزه ای ۶/۶ Ms و از نوع فشاری است که در نزدیکی ساختگاه و در فاصله سطحی دو کیلومتری قرار دارد. براساس مطالعات لرزه‌خیزی، حداکثر شتاب افقی زلزله برای سطوح لرزه‌ای OBE با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، MDE با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله و MCE با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله برای محدوده طرح مورد مطالعه، به ترتیب ۰/۱۵g، ۰/۳۵g و ۰/۶۷g تعیین شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷).

روش‌های ترفیع سد باطله

برای احداث سدهای باطله از مصالح طبیعی و سنگدانه‌های متراکم شده حاصل از خاکبرداری روباره معدنی و یا از مصالح استخراج شده از منابع قرضه مشخص استفاده می‌شوند. در این سدها، ابتدا یک سد اولیه به‌عنوان پاشنه تکیه‌گاه و شروع کننده^۱ با ارتفاع مشخص ساخته شده و سپس ارتفاع آن به تدریج در طول بهره‌برداری از معدن افزایش می‌یابد. طرح سد اولیه، هندسه داخلی و خارجی سازه را مشخص می‌کند اگر طراحی سد اولیه شامل آب‌بندها و یا بخش‌های زهکشی باشد، این بخش‌ها باید قبل یا همزمان با ساخت سد اولیه و همچنین با هر افزایش متوالی ارتفاع ادامه یابد.

برای افزایش ارتفاع (ترفیع) این سدها، سه روش مختلف بالادست‌رو، پایین‌دست‌رو و مرکزرو وجود دارد (شکل ۵). انتخاب هر کدام از این روش‌ها به یکسری پارامترهای فنی و اقتصادی بستگی داشته و هرکدام با سطح خطر مشخصی همراه هستند. سدهای بالادست‌رو که به‌عنوان ارزان‌ترین و سریع‌ترین روش ترفیع در نظر گرفته می‌شوند، دردسرسازترین آن‌ها نیز هستند. در این روش، به دلیل احداث بخشی از بدنه سد بروی باطله‌های (تیل‌های) متراکم یافته داخل مخزن و از طرفی پتانسیل وقوع روانگرایی در حین زلزله، بیشترین خطر



شکل ۵- روش‌های مختلف احداث و ترفیع سدهای باطله معدنی (a) پایین‌دست‌رو (b) بالادست‌رو (c) مرکزرو.

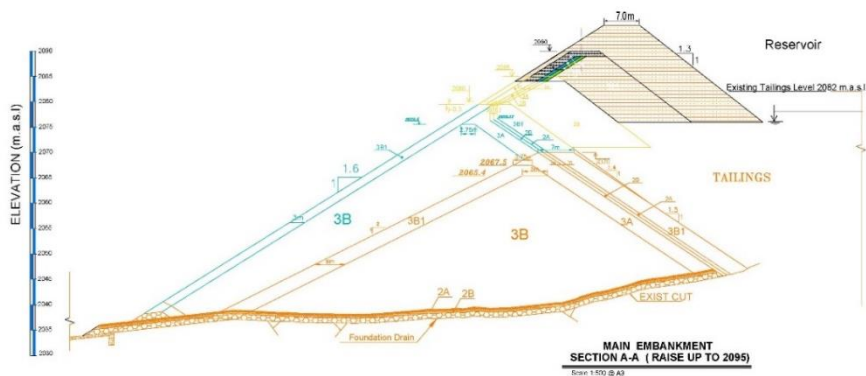
Figure 5- Different methods of constructing and raising of tailings dams a) downstream b) upstream c) centerline.

¹ Starter

نتایج و بحث

روش‌های ترفیع سد باطله مزرعه

همان‌طور که ذکر گردید تراز کنونی سد باطله مورد مطالعه با گنجایش حدود ۵۵۰ هزار متر مکعب، ۲۰۸۵ متر بالاتر از سطح دریاست. با توجه به تداوم عملیات معدنی و تولید باطله معدنی مقرر شده است نسبت به ترفیع تراز تاج سد به مقدار ۱۰ متر دیگر و تا تراز ۲۰۹۵ متر اقدام گردد. با اجرای این مرحله ترفیع، گنجایش مخزن به حدود ۱/۳ میلیون متر مکعب رسیده و تا حدود ۱۰ سال آینده نیاز معدن را برای ذخیره‌سازی باطله‌های معدنی تأمین می‌نماید. برای ترفیع سد باطله معدن مس مزرعه گزینه‌های مختلفی قابل طرح می‌باشد که عبارتند از:



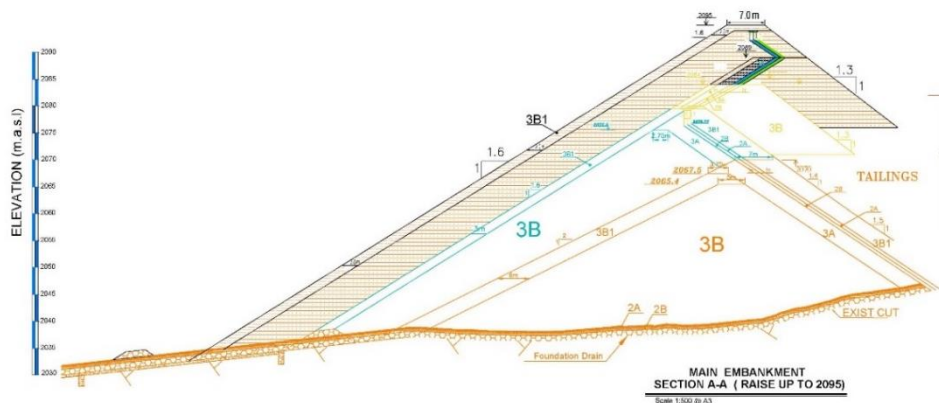
شکل ۶- مقطع عرضی ترفیع سد باطله به روش ۱۰ متر به روش بالادست‌رو.

Figure 6- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m upstream method.

گزینه ۲) ابتدا ۵ متر بالادست‌رو و سپس ۵ متر پایین‌دست‌رو

در این حالت نیز بخشی از بدنه سد بر روی باطله تحکیم یافته مخزن قرار می‌گیرد. اجرای لایه‌های فیلتر و زهکش به دلیل شیب‌دار بودن آن‌ها نیازمند دقت بیشتر است. با فرض حفظ شیب کنونی شیروانی پایین‌دست، پاشنه بدنه سد نسبت

به شرایط کنونی حدود ۲۱ متر به سمت پایین دست (محدوده سامپ ذخیره) قرار می‌گیرد. مقطع عملیات سنگریزی در این حالت حدود ۱۰۷۰ متر مربع برآورد می‌گردد. نیمرخ اولیه این روش در شکل ۷ نشان داده شده است.

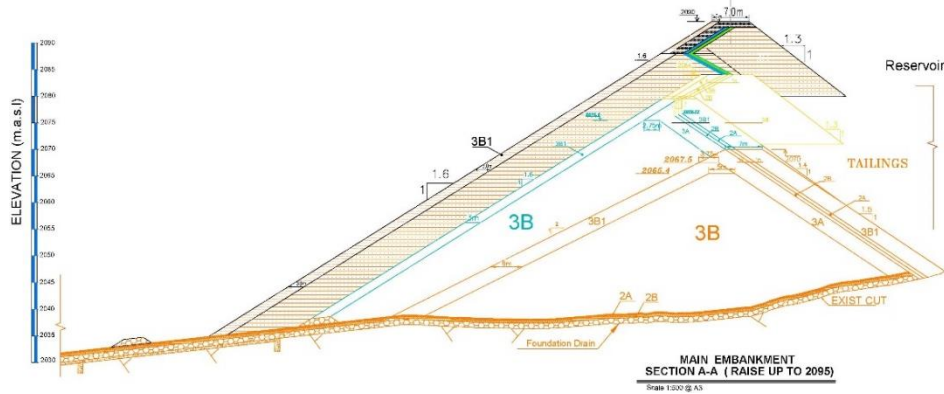


شکل ۷- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر بالادست‌رو و بعد ۵ متر پایین‌دست‌رو.

Figure 7- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m upstream and 5 m downstream method.

پایین دست (محدوده سامپ ذخیره) قرار می گیرد. حجم عملیات سنگریزی نسبت به گزینه ۲ کمتر خواهد بود. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این حالت حدود ۹۳۳ مترمربع برآورد می گردد. نیمرخ اولیه این روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

گزینه ۳) ابتدا ۵ متر پایین دست رو و سپس ۵ متر بالا دست رو
در مقایسه با گزینه ۲، بخش کمتری از بدنه سد بر روی باطله قرار می گیرد. اجرای لایه های فیلتر و زهکش به دلیل شیب دار بودن آن ها نیازمند دقت بیشتر است. پاشنه بدنه سد در پایین دست نسبت به شرایط حاضر حدود ۲۰ متر به سمت

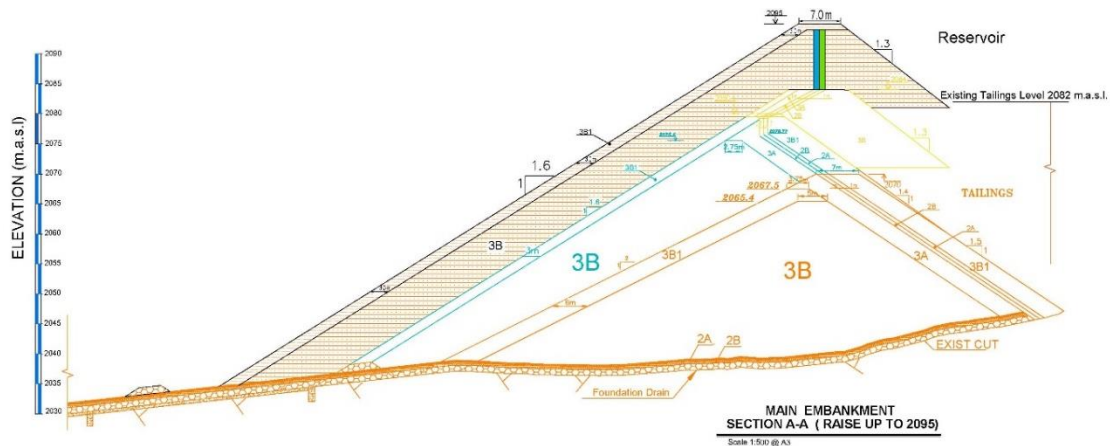


شکل ۸- نیمرخ اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر پایین دست رو و بعد ۵ متر بالادست رو.

Figure 8- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m downstream and 5 m upstream method.

پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می گیرد. روش اجرای راحت تری دارد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش حدود ۱۰۶۵ مترمربع برآورد می گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۹ نشان داده شده است.

گزینه ۴) ۱۰ متر مرکز رو
حجم عملیات سنگریزی نسبت به حالت روش ۲ مقدار جزئی کمتر است ولی نسبت به روش ۳ دارای حجم عملیات بیشتری است. پاشنه سد در این حالت، حدود ۲۳ متر در

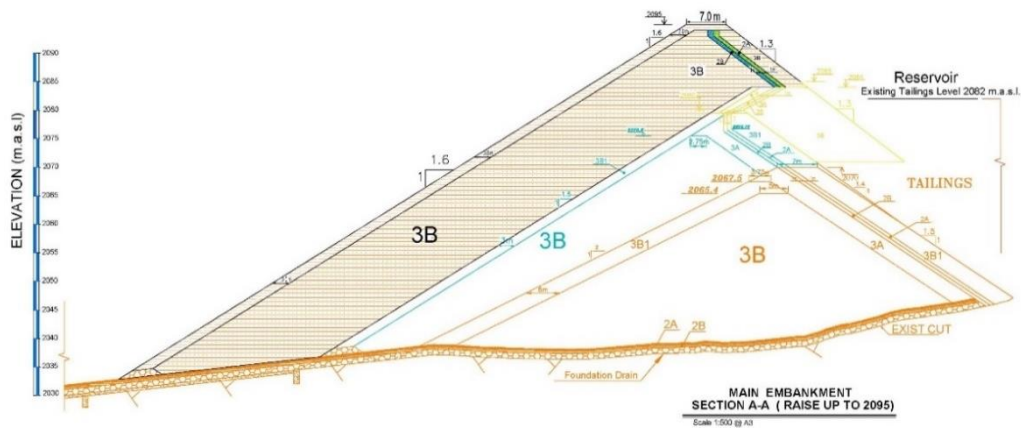


شکل ۹- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ۱۰ متر مرکز رو.

Figure 9- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m centerline method.

بیشتر است. در این روش پاشنه سد حدود ۳۸ متر پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می گیرد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش ۱۶۸۰ مترمربع برآورد می گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

گزینه ۵) ۱۰ متر پایین دست رو
تمامی بخش ترفیع بر روی بدنه سد کنونی و پایین دست قرار می گیرد. روش اجرای راحت تری دارد و پایداری سد بیشتر خواهد داشت. حجم عملیات سنگریزی نسبت به سایر گزینه ها

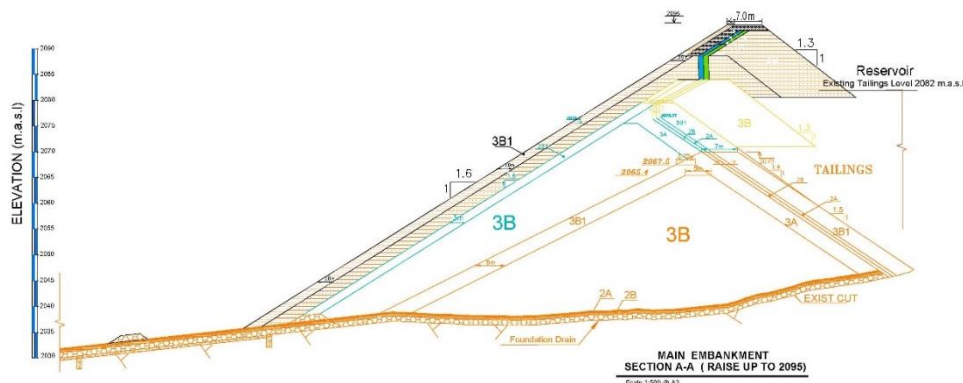


شکل ۱۰- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ۱۰ متر پایین دست‌رو.
Figure 10- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m downstream method.

پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می‌گیرد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش حدود ۶۶۰ متر مربع برآورد می‌گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

گزینه ۶) ۵ متر مرکز رو و ۵ متر بالادست رو

حجم عملیات سنگریزی نسبت به حالت‌های قبل به جز گزینه ۱ (۱۰ متر بالادست‌رو) کمتر است. همچنان بخشی از ترفیع بر روی باطله تحکیم یافته قرار می‌گیرد. روش اجرای نسبتاً راحت‌تری دارد. در این روش پاشنه سد حدود ۱۲ متر



شکل ۱۱- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر مرکز رو و ۵ متر بالارو.
Figure 11- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m centerline and 5 m upstream method.

الف) محدودیت فضای کافی در پایین دست سد: یکی از مهمترین محدودیت‌های موجود برای ترفیع سد باطله مورد مطالعه، نبود فضای کافی متعلق به معدن و همچنین فاصله کم سامپ ذخیره زهاب‌ها با بدنه سد در پایین دست می‌باشد. این سامپ ذخیره مستطیلی با ابعاد ۲۵ × ۴۰ متر برای جمع‌آوری زهاب‌های عبوری از طریق زهکش‌های بستر و داخل بدنه سد و پمپاژ مجدد آن به کارخانه برای مصرف مجدد طراحی و احداث گردیده است. این سامپ در فاصله حدود ۱۴ متری از پاشنه شیروانی پایین دست سد قرار دارد. حفظ این سامپ و جلوگیری از جابه‌جایی آن با توجه به محدودیت فضا، به‌عنوان یکی از ملاک‌های تعیین نحوه ترفیع سد مطرح

محدودیت‌های ویژه طرح مورد مطالعه برای ترفیع

علی‌رغم اینکه در روش پایین دست‌رو، حجم عملیات سنگریزی و به تبع آن هزینه اجرایی و زمان لازم بیشتر می‌باشد ولی این گزینه، روشی مطمئن‌تری برای ترفیع سدهای باطله به‌ویژه در مناطق با لرزه‌خیزی بالاست و به همین علت، این گزینه ترفیع، روش مطلوب و اولویت اول طراحان و مهندسان در این زمینه می‌باشد. با این حال در برخی موارد، به دلیل وجود محدودیت‌های اجرایی، امکان استفاده از این روش وجود ندارد. از جمله این موارد (علاوه بر حجم عملیات و هزینه و زمان اجرایی بالا)، در پروژه مورد مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

گردید (شکل ۱۲). لذا گزینه‌هایی که حداقل جابه‌جایی را در پایین ایجاد نماید در اولویت قرار گرفت.



شکل ۱۲- تصویر ماهواره‌ای سد باطله و سامپ ذخیره زهاب‌های عبوری از سد در پایین دست آن (برگرفته از google earth).
Figure 12- Satellite image of the tailing dam and the sump in the downstream for storing the passing drains (derived from geegle earth).

پرشدن مخزن سد با تیل تا تراز ارتفاع آزاد^۱، محدودیتی در اجرای عملیات سنگریزی در بالادست در مرحله اول وجود دارد که منجر به افزایش تراز تیل و از دست رفتن ارتفاع آزاد منجر می‌گردد. در شکل ۱۳، شرایط کنونی مخزن و تراز تیل در آن نشان داده شده است.

(ب) حجم مخزن: با توجه به حجم محدود مخزن سد، استفاده از واریانت‌های بالارو طبیعتاً با سنگریزی در داخل مخزن همراه بوده و بخشی از فضای مخزن را اشغال می‌نماید در حالی‌که ایجاد حداکثر گنجایش مخزن با انجام عملیات ترفیع یکی از اولویت‌های شرکت‌های معدنی می‌باشد. همچنین با توجه به



شکل ۱۳- وضعیت کنونی و تراز مواد تیل (باطله) در داخل مخزن سد.
Figure 13- Current status and tail elevation inside the dam reservoir.

گزینه بهینه ترفیع سد باطله مزرعه

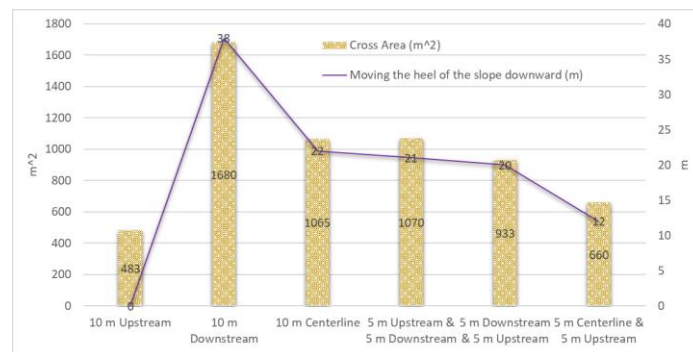
در شکل ۱۴، نمودار تغییرات حجم عملیات سنگریزی واریانت‌های مختلف و همچنین میزان جابه‌جایی پاشنه شیروانی پایین‌دست سد با فرض حفظ شیب کنونی (برای مقایسه نسبی تأثیر آن در موقعیت سامپ) نشان داده شده است. شایان ذکر است چون گزینه‌ها به صورت نسبی مقایسه می‌شوند، اگر چنان‌چه در تحلیل و طراحی در مقدار شیب هر کدام از شیب‌های بالادست و پایین‌دست تغییری ایجاد شود

(ج) حجم عملیات اجرایی: این پارامتر، یکی دیگر از پارامترهایی است که تأثیر مستقیم در هزینه و زمان عملیات اجرایی ترفیع سد دارد. بنابراین انتخاب گزینه‌ای با حجم عملیات اجرایی محدود توجیه اقتصادی بیشتری دارد هر چند که اهمیت آن کمتر از سایر مسائل فنی می‌باشد. با توجه به اینکه عمده حجم عملیات اجرایی ترفیع سد، سنگریزی می‌باشد لذا سطح مقطع عملیات سنگریزی در گزینه‌های مختلف به صورت نسبی برآورد و به منظور مقایسه لحاظ گردید.

¹ Freeboard

ذخیره زهاب و فراهم شدن فضای کافی در پایین دست، توصیه می گردد ضمن کاهش شیب پایین دست بدنه سد از طریق سنگریزی در پای شیروانی تا حد ممکن، حفظ کانال های انحراف آب های بالادست حوضه آبریز سد به خصوص چشمه های انتهایی مخزن، از تحکیم و خشک شدن باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روان گرایی احتمالی) اطمینان حاصل گردد. بسته به نتایج تحلیل و طراحی شیب شیروانی پایین دست تدقیق خواهد شد. نقشه جانمایی اولیه و تصویر هوایی گزینه بهینه برای ترفیع بدنه سد باطله کنونی در شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به اجتناب ناپذیر بودن تداخل بدنه سد با بخشی از سامپ ذخیره پایین دست، امکان جابه جایی سامپ به سمت فضای باقی مانده موجود در پایین دست و تأمین حجم آن با افزایش طول و یا عمق آن قابل جبران خواهد بود.

در اولویت بندی گزینه ها تأثیر چندانی نمی گذارد. بررسی گزینه های مختلف نشان می دهد استفاده از روش بالادست رو برای ترفیع کل ۱۰ متری (واریانت ۱)، حجم عملیات کمتری دارد ولی با توجه به لرزه خیزی منطقه و به منظور حفظ حداکثر ظرفیت مخزن، این گزینه در اولویت اول قرار نمی گیرد. از طرفی دیگر روش پایین دست رو نیز علی رغم اطمینان و ایمنی بالا و گزینه ای مطلوب از لحاظ فنی، به دلیل محدودیت زمین در اختیار کارفرمای پروژه در اولویت قرار نگرفت. لذا استفاده از روش ۵ متر مرکز رو و ۵ متر بالارو، که هم به نسبت حجم عملیات کمتری دارد و هم میزان جابه جایی پاشنه سد به سمت پایین دست کمتر است با لحاظ نمودن محدودیت های موجود و زمان بهره برداری کم (در حد ۱۰ سال) می تواند روش بهینه ای برای ترفیع تراز سد به مقدار ۱۰ متر تا تراز ۲۰۹۵ متر در این مرحله باشد. البته پس از اتمام دوره بهره برداری، برای فاز بستن و ترک سد، به دلیل عدم نیاز به سامپ



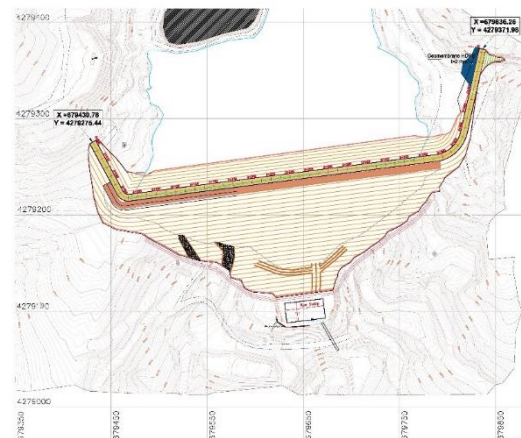
شکل ۱۴- مقایسه سطح مقطع عرضی به عنوان حجم سنگریزی و مقدار جابه جایی پای شیروانی پایین دست در گزینه های مختلف ترفیع.
Figure 14- Comparison of the cross-sectional area of the raising operation (rockfill volume) and the amount of downstream slope foot displacement in different raising variants.



شکل ۱۶- عکس هوایی گزینه بهینه برای ترفیع سد تا تراز ۲۰۹۵.
Figure 16- Aerial image of the dam body area after raising to level 2095 using the optimal method.

طراحی گزینه بهینه برای ترفیع سد

بدنه سد در مقابل بارهای ناشی از فشار هیدرواستاتیک، فشار جانبی مصالح باطله، نیروهای لرزه ای و بارهای ثقلی



شکل ۱۵- جانمایی بدنه سد پس از ترفیع تا تراز ۲۰۹۵ به روش گزینه بهینه.

Figure 15- Layout of the dam body after raising to level 2095 using the optimal method.

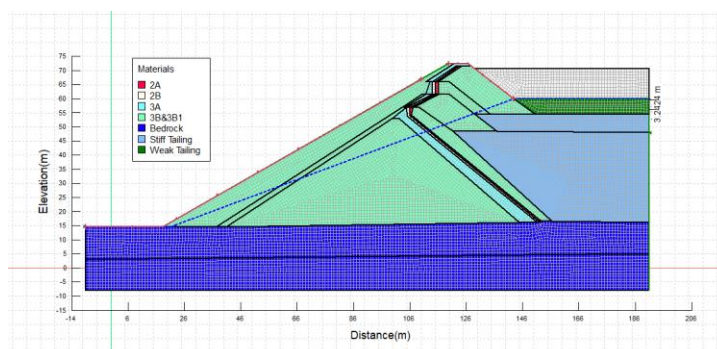
شده و شیب شیب پایین دست ۱:۱/۷۵ (قائم به افقی) تعیین شده است. نتایج تحلیل پایداری نشان داد حداقل ضریب اطمینان شیب‌های بالادست و پایین دست سد در حالت استاتیک، در مراحل مختلف قابل قبول بوده و نشان‌دهنده پایداری مناسب بدنه سد می‌باشد. در تحلیل شبه استاتیک، ضریب اطمینان پایداری شیب سد با اعمال یک ضریب زلزله افقی و یا قائم (در صورت نیاز) بررسی می‌گردد. به عبارتی در این حالت، اثر زلزله به صورت استاتیکی و با اعمال نیروهایی که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افقی و قائم به دست می‌آید، در تحلیل لحاظ می‌شود. براساس توصیه مارکوسن (Marcuson, 1981)، ضریب زلزله مناسب برای طرح لرزه‌ای سدها معادل ۰/۳۳ تا ۰/۵ برابر شتاب حداکثر (PGA) پیشنهاد شده است. همچنین بخش ترابری ایالت واشنگتن (WSDOT (2010)، مقدار ضریب زلزله در جهت افقی را معادل 0.5a و در جهت قائم برابر صفر پیشنهاد نموده است. در این حالت حداقل ضریب اطمینان قابل قبول برابر یک می‌باشد. نتایج تحلیل پایداری با اعمال ضریب زلزله نشان داد شیب‌های بالادست و پایین دست سد باطله در دوره‌های مختلف و در شرایط شبه استاتیکی نیز ضریب اطمینان کافی دارند. در شکل ۱۸، تصاویری از خروجی تحلیل‌های انجام یافته نمایش داده شده است.

طراحی می‌گردد. برای طراحی هندسه بدنه و پی سد باطله مورد مطالعه، شیروانی‌های بالادست و پایین دست سد در شرایط مختلف بارگذاری (استاتیکی و شبه استاتیکی) و عملکردی (پایان عملیات ساخت، دوره بهره‌برداری و خاتمه بهره‌برداری) مدل‌سازی شده و پایداری آن با استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل حدی با بهره‌گیری از مجموعه نرم افزاری GeoStudio – Slope/W مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۱۷). براساس ضابطه شماره ۶۸۲ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، حداقل ضریب اطمینان مجاز برای شرایط استاتیکی ۱/۵۰ و برای شرایط شبه استاتیکی برابر ۱ منظور شده است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه جنس مصالح بدنه سد در مرحله احداث اولیه و مراحل ترفیع بعدی آن به طور غالب سنگریزه‌ای بوده است، برای حفظ یکنواختی بدنه و امکان دسترسی به مصالح مذکور، در این مرحله نیز برای ترفیع تا تراز ۲۰۹۵ متر نیز همین مصالح منظور شده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده برای تحلیل پایداری در جدول ۴ ارائه شده است. شیب شیروانی پایین دست سد در شرایط حاضر برابر ۱:۱/۱۶ و شیب بالادست ۱:۱/۳ (قائم به افقی) می‌باشد. برای تعیین شیب بهینه و پایدار بدنه سد پس از ترفیع تا تراز ۲۰۹۵، براساس نتایج تحلیل‌های تنش-کرنش برای شیب‌های مختلف، ضریب اطمینان و مقادیر جابه‌جایی بررسی

جدول ۴- پارامترهای مهندسی مصالح مورد استفاده در بدنه سد مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

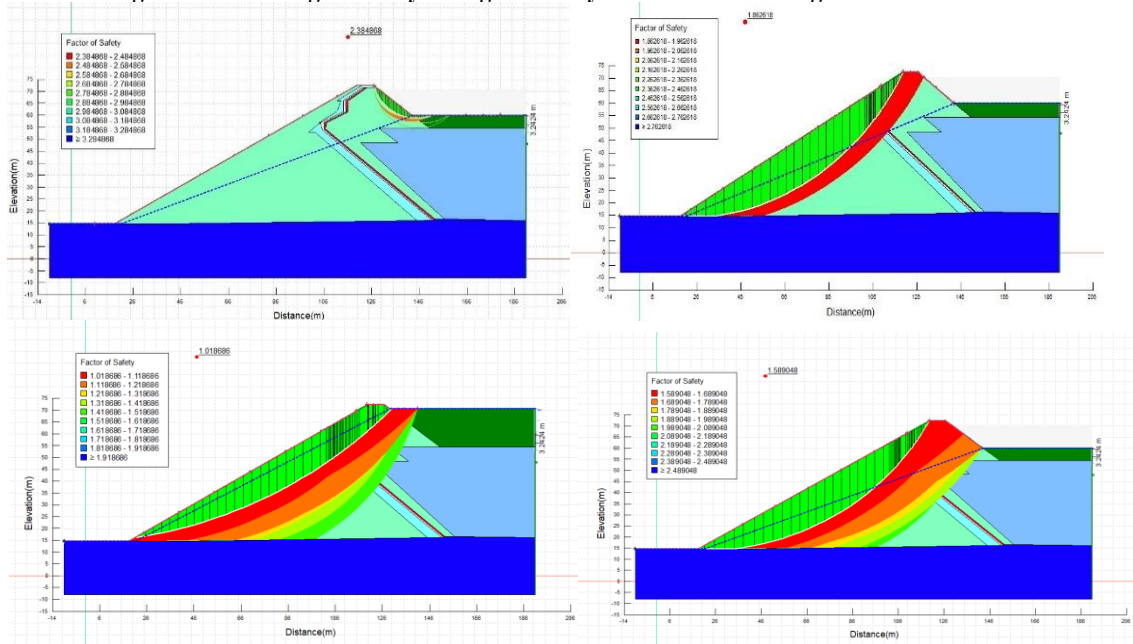
Table 4- Engineering parameters of the materials used in the study dam body (Toosab consulting company, 2018).

Material type	Φ' (degree)	C' (kPa)	γ (kN/m ³)	E (GPa)
Rock fill (3A,3B,3B1)	Normal stress function	22	40	0.30
Filter (2A)	36	0	35	0.33
Drainage (2B)	36	0	30	0.33
Old tail	31	3	19	0.35
New tail	28	3	19	0.45
Bed Rock	Linear Elastic	22	1000	0.20



شکل ۱۷- مدلسازی بدنه و پی سد باطله مورد مطالعه در نرم افزار Geo-Studio.

Figure 17- Modeling the study tailing dam body and foundation using Geo-Studio software.



شکل ۱۸- تصاویری از تحلیل پایداری شیب‌های سد باطله و خروجی آن شامل حداقل ضریب اطمینان و سطح گسیختگی بحرانی.

Figure 18- Images of the tailings dam slopes stability analysis results, including the minimum safety factor and critical failure surface.

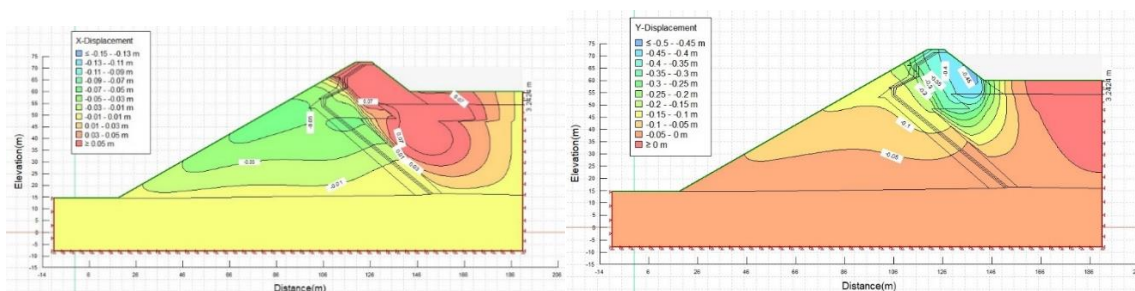
سانتی‌متر برآورد شده است که هم‌خوانی خوبی با نتایج حاصل

از نرم‌افزار Sigma/W دارد (شکل ۲۰).

تحلیل تنش-کرنش

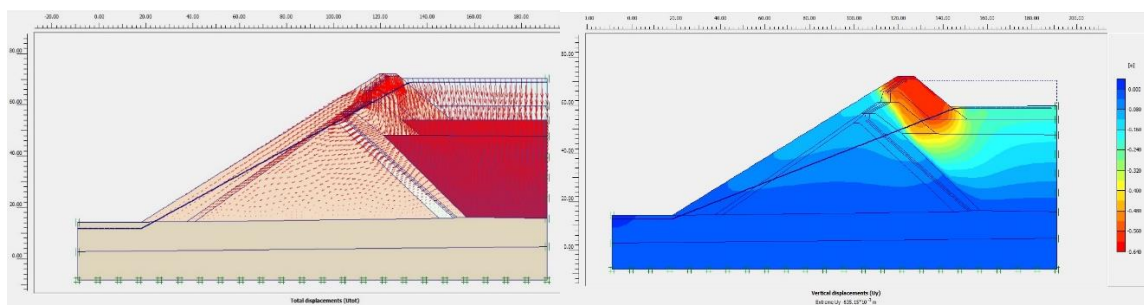
مقادیر جابه‌جایی‌های محتمل در مراحل مختلف ترفیع سد با استفاده از تحلیل تنش - کرنش در نرم افزار Geostudio Sigma/W و Plaxis ارزیابی شده است. مقدار جابه‌جایی قائم و افقی ناشی از ترفیع سد از تراز ۲۰۸۵ تا ۲۰۹۵ متر در مرحله پایان ساخت در تراز تاج سد به‌ترتیب در حدود ۴۳ و ۷ سانتی‌متر برآورد شده است که در سمت بالادست سد ایجاد می‌شود. ضخامت بالا و شکل‌پذیری باطله موجود در مخزن و مدول الاستیک پایین آن، منجر به تمایل جابه‌جایی‌های قائم به‌سمت بالادست بدنه شده است (شکل ۱۹). در حالت بهره‌برداری و پرشدن کامل مخزن تا تراز نرمال با مصالح باطله اشباع سست، جابه‌جایی قائم در تراز تاج سد به‌صورت تجمعی به حدود ۵۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که مجدداً متمایل به سمت بالادست بدنه می‌باشد.

در مدلسازی با استفاده از Plaxis، مدل هندسی سد با فرض حاکم بودن رفتار کرنش صفحه‌ای (Plane Strain) ساخته شده و مدل رفتاری مصالح درشت دانه الاستو پلاستیک موهر-کولمب اعمال شده است. سنگ کف به‌صورت مصالح الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، حداکثر جابه‌جایی ایجاد شده در تراز تاج سد حدود ۶۰



شکل ۱۹- حداکثر جابه‌جایی قائم و افقی ایجاد شده در بدنه سد در مرحله پایان عملیات ترفیع با استفاده از Sigma/W.

Figure 19- Maximum vertical and horizontal displacements generated in the dam body at the end of the raising operation using Sigma/W.



شکل ۲۰- حداکثر جابه‌جایی قائم ایجاد شده در بدنه سد در مرحله عملیات ترفیع با استفاده از Plaxis.

Figure 20- Maximum vertical displacement generated in the dam body during the raising operation stage using Plaxis.

نتیجه‌گیری

و همچنین انجام تحلیل‌های تنش- کرنش با استفاده از نرم‌افزار و Geostudio Sigma/w و Plaxis تعیین شده است. برای حفظ یکپارچگی و یکنواختی، مصالح مورد استفاده برای این مرحله از ترفیع سد به‌طور مشابه با مصالح بدنه سد باطله موجود، انتخاب شده است. کنترل پایداری سد در دو حالت بارگذاری استاتیکی و اعمال نیروی لرزه‌ای (تحلیل شبه استاتیکی) در مراحل مختلف پایان ساخت، دوره بهره‌برداری و خاتمه بهره‌برداری صورت گرفته است. در تحلیل‌های شبه استاتیکی، ضریب متناظر با سطح لرزه‌ای دوره‌های مختلف به بدنه سد اعمال شده و نتایج موجود نشان داد مقادیر ضریب اطمینان کافی برای پایداری بدنه سد تأمین می‌شود. براساس نتایج حاصل، حداکثر جابه‌جایی قائم تجمعی در تراز تاج سد بعد از ترفیع آن تا ۲۰۹۵ متری حدود ۵۴ الی ۶۰ سانتیمتر برآورد گردید. مقایسه نتایج تنش-کرنش بدنه سد با استفاده از نرم‌افزارهای Sigma/W و Plaxis، هم‌خوانی خوبی را نشان دارد.

توصیه می‌گردد برای زمان خاتمه بهره‌برداری و مرحله بستن و ترک سد باطله مورد مطالعه، به‌دلیل عدم نیاز بیشتر به سامپ ذخیره زهاب در پایین‌دست و فراهم شدن فضای کافی، ضمن کاهش شیب پایین‌دست بدنه سد با اجرای سنگریزی تا حد ممکن، با ایجاد تمهیدات لازم و حفظ کانال‌های انحراف آب‌های بالادست حوضه آبریز سد، از تحکیم و خشک شدن

در این تحقیق، به‌منظور افزایش حجم مخزن موجود، ترفیع سد باطله معدن مس مزرعه به ارتفاع ۱۰ متر (تا رسیدن به تراز تاج ۲۰۹۵ متری) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مطالعات پایه ساختگاه اعم از زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و لرزه‌خیری منطقه انجام شده است. سپس گزینه‌های مختلف ترفیع با در نظر گرفتن معیارهای مختلف از جمله محدودیت‌های موجود و نبود فضای کافی در پایین‌دست سد باطله و حجم عملیات سنگریزی مقایسه شده است. علی‌رغم اینکه گزینه بالادست‌رو حجم عملیات و زمان احداث کمی دارد به‌دلیل لرزه‌خیری در منطقه توصیه نمی‌گردد. استفاده از روش پایین‌دست‌رو علی‌رغم اطمینان بیشتر، به‌دلیل محدودیت فضای مربوط به معدن در پایین‌دست سد در اولویت قرار نگرفت و در نهایت، به‌دلیل زمان کوتاه پیش‌بینی شده برای بهره‌برداری (حدود ۱۰ سال)، گزینه ترفیع ترکیبی به‌صورت افزایش ۵ متر به‌صورت مرکز رو و سپس ۵ متر به‌صورت بالادست‌رو پیشنهاد شده است. موضوع فوق نشان می‌دهد مکان‌یابی سد باطله و احداث سازه‌های جانبی آن می‌بایست با منظور نمودن مراحل ترفیع بعدی طراحی و اجرا گردد تا از محدودیت‌ها و یا هزینه‌های مضاعف جلوگیری شود. برای طراحی بدنه سد، با انجام تحلیل‌های پایداری شیب‌های پایین‌دست و بالادست با مدل‌سازی در Geostudio Slope/w

stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, 701–710.

Davies, M. 2001. Impounded mine tailings: What are the failures telling us? *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 94, 53–59.

Davies, M., Martin, T., Lighthall, P., 2000. Mine tailings dams: When things go wrong. In *Tailings Dams 2000: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams*. Las Vegas, Nevada.

Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., Moran, C. J., 2014. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420.

EPA, 1994. Technical Report - Design and Evaluation of Tailings Dams, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington.63

GRIDA, 2016. Mine Tailings Storage: Safety is no Accident. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal.

ICOLD, 2001. Tailings dam-risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.

Jakka, R. S., Ramana, G., & Datta, M., 2011. Seismic slope stability of embankments constructed with pond ash. *Geotechnique Geology Engineering*, 29(5), 821-835.

Kasperski, K.L., Mikula, R.J., 2011. Waste streams of mine oil sands: characteristics and remediation. *Elements*, 7(6), 387-392.

Kemper, T., Sommer, S., 2002. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 36(12), 2742-2747.

Khamseh, A., Shahbazi, F., Oustan, S., et al., 2017. Impact of tailings dam failure on spatial features of copper contamination (Mazraeh mine area, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(244).

Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K.A., 2014. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.

Ledesma, O., Sfriso, A., Manzanal, D., 2022. Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams. *Computers and Geotechnics*, 144, 104632

Lei Y., Dai Q., Zhang B., Kong C., Yang J., 2022. A gradient smoothing technique-based S-FEM for

باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روان‌گرایی احتمالی) اطمینان حاصل گردد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از عوامل محترم شرکت مس مزرعه که در انجام مطالعات و تدوین این تحقیق مساعدت کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

برزگری ق، مشهدی جعفرلو ر، ندیری ع، ۱۴۰۲. بررسی عملکرد سد باطله معدن مس مزرعه اهر از لحاظ پایداری و نشست. *هیدروژئولوژی*، ۸(۱)، ۱۵۶–۱۶۹.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴. راهنمای طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سدهای پسماند. ضابطه شماره ۶۸۲.

شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷. گزارش نهایی زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ترفیع سد باطله مزرعه. شماره گزارش ۷۷۸۱-۴۱۰۴۸۱.

شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷. گزارش لرزه-خیزی، لرزه زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه سد باطله مزرعه. شماره گزارش ۷۷۷۱-۴۱۰۴۸۱.

شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸. گزارش طراحی پی و بدنه سد باطله معدن مس مزرعه (ترفیع تا تراز ۲۰۸۵ متر). شماره گزارش ۷۹۵۴-۴۱۰۴۸۱.

نبوی م. ح، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، ص ۱۰۹.

Reference

Alizadeh, P., Latifi, M., 2025. The study of the factors affecting phreatic line position and stability in upstream tailings dams. *Results in Engineering*, 25, 104092.

Barzegari, G., Mashhadi Jafarloo, R., Nadiri, A., 2023. Investigating the performance of Mazraeh Ahar copper mine tailings dam from stability and seepage aspects. *Hydrogeology*, 8(1), 156–169. [In persian]

Burritt, R. L., Christ, K. L., 2018. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. *Journal of Cleaner Production*, 178, 196–205.

Coulibaly, Y., Belem, T., Cheng, L., 2017. Numerical analysis and geophysical monitoring for

foundation: A case study. *Engineering Geology*, 151, 89–99.

Penman, A.D., (2001). Risk analyses of tailings dam construction. In *Proceedings of the Conference on Safety of Mining Dams Seminar*, Gällivare, Sweden.

Piciullo, L., Storösten, E.B., Liu, Z., Nadim, F., Lacasse, S., 2022. A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657.

Rico, M., Benito, G., Diez-Herrero, A., 2008. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 79–87.

Shahriari, M., Aydin, M. E., 2017. Lessons learned from analysis of Los Frailes tailing dam failure. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, Switzerland.

Stark, T.D., Moya, L. and Lin, J., 2022. Rates and causes of tailings dam failures. *Advances in Civil Engineering*, p.7895880.

Toosab Consulting Engineers, 2018. Final report on geology and engineering geology of the raising of Mazraeh tailings dam. Report No. 7781-410481. [In persian]

Toosab Consulting Engineers, 2018. Seismicity, seismotectonics, and earthquake hazard report of the Mazraeh tailings dam. Report No. 7771-410481. [In persian]

Toosab Consulting Engineers, 2019. Design report of the foundation and body of Mazraeh copper mine tailings dam (raising up to elevation 2085 m). Report No. 7954-410481. [In persian]

United States Environmental Protection Agency (UNEP), 1994. Technical report: Design and evaluation of tailings dams. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 68 p.

Vandeberg, G. S., Martin, C. W., Pierzynski, G. M., 2011. Spatial distribution of trace elements in floodplain alluvium of the upper Blackfoot River, Montana. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1521–1534.

Vick, S.G., 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams. Wiley, New York, 369 p.

Washington State Department of Transportation (WSDOT), 2010. Standard specifications for road, bridge, and municipal construction (M 41-10). Construction Administration Office, Engineering and Regional Operations Division, 220 p.

WISE (World Information Service on Energy), 2024. Chronology of major tailings dam failures. Online since.

WISE (World Information Service on Energy Uranium Project), 2012. Chronology of major tailings dam failures. Online since.

simulating the full impacts of anomalies on seepage solutions and its application in multi-parameter seepage inversion. *Water Resour Manage* 38, 753–773.

Lottermoser, B., 2007. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, Berlin,

Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J., 2019. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*, 4159306.

Marcuson III, W.F., 1981. Moderator's report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 3, 1175.

Martin, T.E., Davies, M.P., 2000. Trends in the stewardship of tailings dams. In *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2000*, 16 May 2002 London.

Management and Planning Organization of Iran, 2015. Guidelines for the design, construction, and operation of tailings dams. Regulation No. 682. [In persian]

Mendoza, O.T., Hernandez, M.A.A., Abundis, J.G., Mundo, N.F., 2006. Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, Southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 28(3), 243–255.

Morgenstern, R., Vick, S.G., Viotti, C.B., Watts, B.D., 2016. Fundão tailings dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam.

Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran. *Geological Survey of Iran*, 109 p. [In persian]

Naeini, M., Akhtarpour, A., 2018. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 179–194.

Niekerk, H.J.V., Viljoen, M.J., 2005. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings dam failures. *Land Degradation & Development*, 16(2), 201–212.

Nimbalkar, S.S., Annareddy, V.S., Pain, A., 2018. A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (6), 1082-1090.

Ormann, L., Zardari, M.A., Mattsson, H., Bjelkevik, A., Knutsson, S., 2013. Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(4), 391–399.

Ozer, A.T., Bromwell, L.G., 2012. Stability assessment of an earth dam on silt/clay tailings

Yu, D., Tang, L., Chen, C., 2019. Three-dimensional numerical simulation of mudflow from a tailings dam failure across complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 727–741.

Yu, H., Zahidi, I., Fai, C.M., Liang, D., Madsen, D.Ø., 2025. Tailings dam failures: A critical evaluation of current policies and practices. *Results in Engineering*, 25, 103973.

Zardari, M.A., Ormann, L., Mattsson, H., Knutsson, S., 2014. Numerical analysis of staged construction of an upstream tailings dam. In *Proceedings of National Conference on Civil Engineering*. Department of Civil Engineering, QUEST Nawabshah, Pakistan.

Zhao, X., Zhang, L., Li, S., 2024. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions. *Computers and Geotechnics*, 176, 106785.

Analysis of changes in time of drought on Groundwater resources of Garveh-Dehgolan plain using GRI and SPI

Document Type: Research Paper

Ebrahim Yousefi Mobarhan¹, Kazem Saber Chenari^{2*}, Samira Zandifar³

1- Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran.

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*Corresponding Author: K.saberchenari@gmail.com

Abstract

Groundwater aquifers are mainly recharged by precipitation or through interaction with surface waters, and the impact of climate change on precipitation and surface water will ultimately affect the groundwater system. The aim of this study is to use groundwater drought indices and standard precipitation to investigate the effect of drought changes on groundwater resources in the Qorveh-Dehgolan plain. For this purpose, the groundwater drought index was calculated and analyzed using groundwater information (piezometric wells) of the study area. The standard precipitation index was also calculated for different time scales using the CHIRPS database. Then, the relationship between the groundwater drought index and the standard precipitation index and annual precipitation was examined. The results showed that the groundwater drought index of the study area has a downward trend towards drought during the statistical period, such that the drought index has become negative since 2011 and the negative values of the index continue until the end of the statistical period. Drought classification with standard precipitation showed that this region is in the near-normal drought category. The results of the correlation between the two indices using linear regression showed that there is no significant correlation between the indices ($P\text{-Value} = 0.053$ and $R^2 = 0.003$), although they are affected by each other, and the low level of correlation between the indices can indicate the important issue that the groundwater drought situation in the Qorveh-Dehgolan plain is not only affected by meteorological drought in the region, and more important factors also affect the groundwater level of the plain, the effects of which on the groundwater level of the plain should be investigated.

Keywords: CHIRPS, Ground water level, GRI, SPI.

Introduction

Drought is an atmospheric phenomenon that can occur in any region and lead to major economic, social and environmental losses. This phenomenon affects various environmental sectors, including groundwater resources, during its duration. So far, the effect of drought on groundwater resources has received less attention (Yousefi Mobarhan and Zandifar, 2023). Drought is a normal and continuous state of the climate. Although many mistakenly consider it a random and rare event. This phenomenon occurs in almost all climatic regions, although its characteristics are completely different from one region to another. Drought is a temporary disturbance and is different from drought, because drought is limited to areas with low rainfall and is a permanent state of the climate (Abasinia et al., 2021).

The impact of meteorological drought on groundwater generally occurs on monthly and annual time scales (Van Lanen et al., 2000; Bhuiyan et al., 2006). Since groundwater aquifers are mainly recharged by precipitation or through interaction with surface water, the impact of climate change on precipitation and surface water will ultimately affect the groundwater system. Groundwater drought also refers to the combination of physical hazard and human vulnerability associated with reduced groundwater

availability and access to drought (Villholth et al., 2013; Yousefi Mobarhan and Karimi Sangchini, 2021).

The reduction of Ground water level and its consequences is one of the current problems of the country. Due to the decreasing changes in the amount of precipitation, the occurrence of recent droughts, the increase in agricultural, animal husbandry and industrial activities, as well as the increase in population, especially in the last 10 years, have caused an increase in water consumption. It has also caused the reduction of Ground water reserves and the negative balance of water tables in the plains of Qarwah-Dehgolan (Abbasi, 2015). Considering the importance of the topic and using the data available in the study area such as: rainfall, Ground water level and temperature, it is tried to evaluate the correlation between the GRI and SPI and their impact on each other.

Rainfall information obtained from rain gauges and rain recorders of meteorological stations is necessary as a basic data in drought studies. However, the cost of establishing and maintaining these stations is high and cannot be constructed in some areas, and this affects the appropriate number and distribution of stations in relation to the needs of regional climate studies. Therefore, the use of remote sensing technologies and the development of open analytical models as alternative data sources is necessary. In recent years, the use of these remote sensing databases in drought studies has expanded. Among the most recent developed precipitation databases, we can mention CHIRPS, which is created from the mathematical combination of infrared satellite data, and one of the important features in its application is the spatial and temporal resolution of these data. The developed precipitation database with a resolution of 0.5 degrees is one of the best precipitation databases in the world in terms of spatial and temporal resolution (Gholami et al., 2023). In this research, data extracted from this algorithm was used to calculate the standard precipitation index.

In general, the purpose of this research is to analyze the temporal changes of the recent droughts on the Ground water resources of Garoveh-Dehgolan plain by using the GRI And SPI in the study area.

Materials and Methods

In this study, the CHIRPS remote sensing precipitation algorithm was used in Google Earth Engine to study meteorological drought, and in order to study groundwater drought in plain, changes in groundwater levels in the Ghorove-Dehgolan plain were analyzed based on water level data from 69 observation wells. A representative aquifer hydrograph was prepared for the Ghorove-Dehgolan aquifer during the statistical period to study long-term changes and fluctuations in groundwater levels, as well as to identify periods of increase and decrease in water levels. Long-term changes and fluctuations in groundwater levels were also plotted in the Excel software environment. Therefore, the SPI index was used to monitor meteorological drought, and the GRI index was used to monitor hydrological drought in studied plain.

Groundwater Resource Index

GRI was proposed as a reliable indicator for monitoring groundwater drought status (Mendicino et al., 2008). GRI indicates the amount of water entering the aquifers and can be used to assess the status of groundwater resources in the study area. The value of this index is calculated using Equation 1:

$$GRI = \frac{D_{y.m} - \mu_{D.m}}{\sigma_{D.m}} \quad (1)$$

Where $D_{y.m}$ is the groundwater level values in year y and month m, $\mu_{D.m}$ and $\sigma_{D.m}$ are the mean and standard deviation of groundwater level values in month m during the statistical period, respectively (Mendicino et al., 2008). The classification of GRI values is shown in Table 1.

Table 1- Classification of drought severity with GRI index.

NO	Drought classes	GRI
1	Very intense fear	≥ 2
2	severe fear	2 -1.5
3	Moderate fear	1.5-1
4	Mild fear	1-0.5

5	normal	0.5- (-0.5)
6	Mild drought	(-0.5)- (-1)
7	Moderate drought	(-1)- (-1.5)
8	severe drought	(-1.5)- (-2)
9	Very intense drought	-2 $\geq$

Standard precipitation index

The standard precipitation index is one of the most widely used indices used in drought monitoring (Yousefi mobarhan et al., 2024). This index is used to quantify precipitation at different time scales for meteorological drought monitoring (Fardmoradinia et al., 2023). The length of this period can vary from one month to several years. Equation 2 is used to calculate the standard precipitation index, which is then classified based on two values shown in a table. In this study, the CHIRPS database was used to calculate this index:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (2)$$

Where P_i : Amount of rainfall in the period, $\bar{P}$: Average rainfall in the desired statistical period SD: Standard deviation of rainfall in the desired statistical period. The classification of SPI values is shown in Table 2.

Table 2- Classification of Drought Values in SPI index.

NO.	Severity of drought	SPI
1	Acute fear	2<
2	severe fear	1.99-1.50
3	Moderate fear	1.49-1
4	normal	0.99-0
5	Mild drought	0- (-0.99)
6	Moderate drought	(-1)- (-1.49)
7	severe drought	(-1.5)- (-1.99)
8	Acute drought	< -2

Results and Discussion

The studied area has been classified as drought based on the period of 1, 3, 6, 9, 12, 24 and 48 months using the SPI. Therefore, time periods 1, 12 and 48 are placed in the moderate class and time periods 3, 6, 9 and 24 are placed in the normal class. The results showed that the GRI during the twenty-year statistical period has a downward trend towards drought, so that since 2011 the drought index has become negative and until the end of the statistical period, the negative values of the index continued, which indicates a decrease in the level of Ground water in the region.

Based on the results, the concentration of wells in the first time period (2001-2008) is more in the areas with negative fall and there are a considerable number of wells in the areas with negative drop. The highest and lowest reduction of the ground water level is equivalent to 2.3 meters and 4.7 meters in the region, respectively. During the second time period (2008-2013), only a limited number of wells remain in positive drop areas. Also, the intensity of the fall is greater than in the first period, so that there is a decrease in the underground water level in all parts, and more than 90% of the plain has a negative fall of 5.7 to 1 meter, which shows that these areas are in a good condition in terms of They do not have an underground water level. During the third time period (2013-2018), except for a very small area in the south of the plain, with a decrease of more than 7 meters, the ground water has increased in most of the region. This increase reaches up to 9 meters in parts of the northwest.

With a more detailed analysis of the correlation chart comparing the SPI and GRI, it was found that during the period under review, the GRI increased along with the severity of the drought. In addition, the relationship between the GRI and the standard precipitation index in a 20-year period was not significant (with P-Value = 0.053 and R^2 value = 0.003), while the trend pattern of the GRI was similar to SPI (Fig.1). The lack of strong correlation between the Groundwater Resources Drought Index (GRI) and the Standard Precipitation Index (SPI) is mainly due to the time lag in the response of groundwater resources to precipitation, the hydrogeological characteristics of the region, the impact of human

activities, the inappropriate spatial and temporal distribution of precipitation, and the different time scales of these indices. Recent studies show that SPI only considers short-term changes in precipitation, while GRI is affected by long-term changes and factors other than precipitation, such as indirect recharge and subsurface flows (Miryaghoubzadeh et al., 2019).

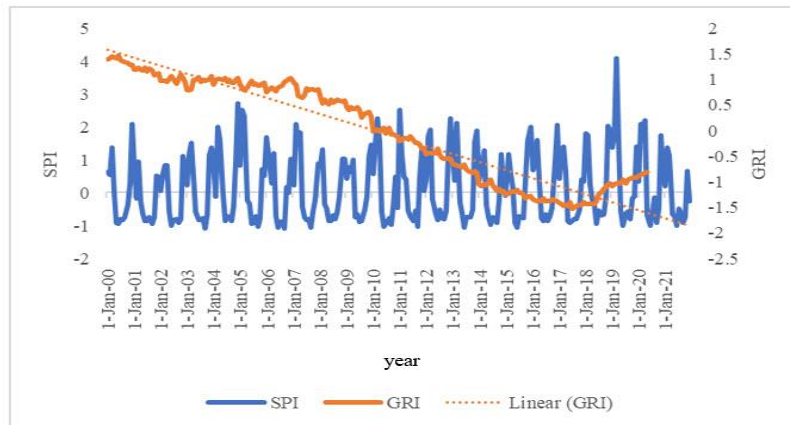


Figure 1- The relationship of changes between GRI and SPI.

Conclusions

In this study, the relationship between the groundwater level and the SPI was investigated in the period from 2000 to 2020, and the following results were obtained: According to the obtained results and the analysis of the standard precipitation index, it showed that the studied area is in normal drought. The results of climate classification in three synoptic stations in the region showed that this region is in the semi-arid climate class. The GRI showed a downward trend towards drought during the twenty-year statistical period, so that since 2010, the drought index has become negative and the negative values of the index continue until the end of the statistical period. Examining the relationship between two indicators showed that these two indicators have no significant relationship with each other. The ground water level of Qorveh-Dehgolan plain has been decreasing in all piezometers. The highest decrease in the ground water level in the period of 2012-2017 is related to the piezometer of Vihej village and the lowest fall in the ground water level is related to the piezometer of Deh Reshi. In the statistical period, the largest fall is related to the water year 2009-2010, which has decreased by 2.85 meters compared to the previous year.

Hydrochemical Processes in the Aquifers of Behbahan, Ramhormoz and Zeidon in Khuzestan Province Using Combined and Isotopic Diagrams

Document Type: Research Paper

Hadi Mohammadi¹, Nasrollah Kalantari^{2*}, Farshad Alijani³, Ali Mehrabi Nejad⁴

1-Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2-Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3-Assistant Professor, Department of Mineral and Water Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Tehran, Iran.

4-Remote Sensing Graduate, Khuzestan Water and Power Authority, Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*Corresponding Author: n.kalantari@scu.ac.ir

Abstract

The plains of Behbahan, Ramhormoz, and Zeidon are located in the southeastern region of Khuzestan Province. To identify the primary factors influencing hydrochemical variations and to examine the hydrogeochemical processes controlling water resources in the southeastern plains of Khuzestan Province, hydrochemical and isotopic analysis results were utilized. In this study, combined diagrams of total dissolved solids (TDI) versus major ions, cation exchange diagrams, and isotopic diagrams ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were employed. The results from the combined diagrams indicate that the primary dissolution processes in the aquifers are initially related to sulfate dissolution followed by chloride dissolution. As TDI increases, the sulfate concentration increases linearly. A similar linear relationship exists between sulfate and calcium ions, indicating gypsum dissolution in the groundwater of the studied plains. However, the sulfate concentration in water samples follows the trend: Ramhormoz > Behbahan > Zeidon. A distinct linear trend for sodium versus chloride is observed in the Zeidon plain compared to Ramhormoz and Behbahan, further confirming halite dissolution in the study area. Isotopic findings reveal that the enrichment of oxygen-18 and deuterium isotopes is higher in the Ramhormoz plain than in other regions, and the water samples from this plain clearly exhibit the effects of intense evaporation, as evidenced by deuterium excess (D-excess). The direct relationship between chloride increases and isotopic enrichment in Ramhormoz plain confirms the influence of evaporative processes, whereas this relationship is weaker in the Zeidon plain. The dominant hydrogeochemical processes in the studied aquifers, in descending order of prevalence, include the dissolution of evaporative minerals (gypsum followed by halite), carbonate dissolution, evaporation, and finally normal and reverse cation exchange (locally).

Keywords: Behbahan, Ionic exchange, Ramhormoz., Stable isotopes, Zeidon, Combined diagrams.

Introduction

Groundwater resources are the only reliable water source for environmental and economic purposes, particularly in arid regions (Dogramaci & Skrzypek, 2015; Zarei et al., 2013). Given the scarcity of water resources in many parts of the world, the quantitative and qualitative management of aquifers is essential. The quality and chemical composition of water depend on the environment, conditions, and processes affecting it as it moves through the basin. Factors influencing the geochemical evolution of groundwater include water residence time, materials involved in water-rock interactions, and mixing between different water sources (He et al., 2019; Ledesma-Ruiz et al., 2015; Kalantari et al., 2021). Intense evaporation and limited rainfall recharge can lead to the salinization of shallow groundwater. Additionally, long flow paths and increased residence time of groundwater may result in water

salinization and changes in water type from bicarbonate to sulfate and chloride. Various water-rock interactions occur during the hydrochemical evolution of groundwater, while anthropogenic changes in groundwater flow conditions can also have a significant impact on groundwater hydrochemistry (Chen et al., 2023).

In recent years, the International Association of Hydrological Sciences has witnessed the development and application of stable isotopes in various disciplines, including understanding the geochemical evolution of water resources. The combined application and cross-validation of these methods have emerged as a focal point in current research on groundwater hydrochemistry and hydrogeology (Ji et al., 2024). Hydrochemical and isotopic techniques are conventional methods for identifying groundwater recharge sources, hydrochemical characteristics, pollution sources, and major hydrogeochemical processes. Notable studies in this field include those by Chen et al., (2023), Akshitha et al., (2021), Ghorbanzadeh et al., (2024), Esmaili et al., (2018), and Asomaning et al., (2023).

The primary objective of this study is to identify the chemical characteristics of groundwater and the major hydrogeochemical processes controlling aquifers in Behbahan, Ramhormoz, and Zeidon, located in the southeastern region of Khuzestan Province, using combined diagrams and stable isotopes. This study aims to recognize the differences in hydrogeochemical processes governing the chemical evolution of groundwater in the mentioned aquifers.

Materials and Methods

Study Area

The study areas in this research include the aquifers of Behbahan, Ramhormoz, and Zeidon, located in the southeastern region of Khuzestan Province (Figure 1). The Behbahan aquifer, with an area of 485 square kilometers, is situated east of Omidiyeh, between the geographical coordinates of 50°04' to 50°24' E longitude and 30°30' to 30°51' N latitude. The Ramhormoz aquifer is located between the geographical coordinates of 49°11' to 49°41' E longitude and 31°09' to 31°36' N latitude, while the Zeidon aquifer is situated between the geographical coordinates of 49°46' to 50°17' E longitude and 30°16' to 30°33' N latitude.

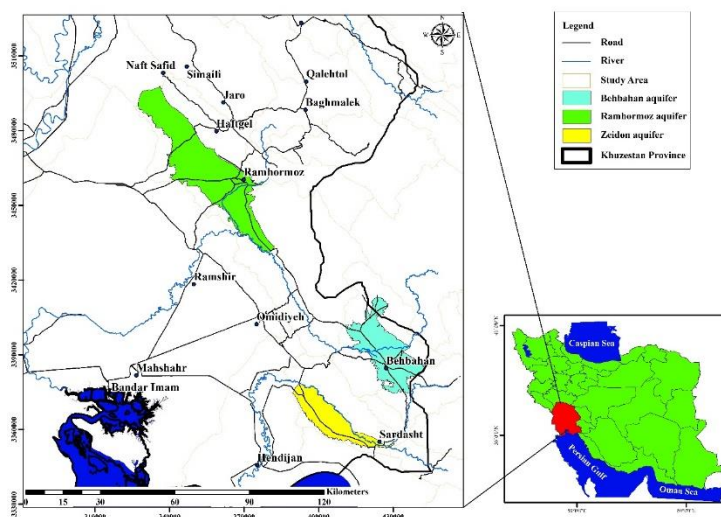


Figure 1 - Map of the Location of the Studied Aquifers in Southeastern Khuzestan. Data Collection.

To understand the geochemical system of groundwater in the study area, surface and groundwater samples were collected during two periods (November 2022 and May 2023) from 24, 12, and 12 water wells in the plains of Behbahan, Ramhormoz, and Zeidon, respectively. The sampling stations were selected based on the spatial distribution of the operational wells in the mentioned plains to ensure optimal coverage across the plains.

Water samples were analyzed through field measurements (temperature, electrical conductivity, and pH) and laboratory hydrochemical analysis of major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , and HCO_3^-). Hydrochemical analyses were conducted at the Zagros Water Science Laboratory in Shiraz, and isotopic analyses for one season were performed at the Mesbah Energy Laboratory.

Methodology

One of the methods for interpreting the processes affecting the chemical quality of groundwater is determining the relationship between parameters of water samples by plotting them on bivariate graphs, known as composition diagrams. To identify hydrogeochemical processes, the following composition diagrams were used: TDI versus major elements, Na-Cl diagram, $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$ versus Na-Cl diagram, scatter plots of δD versus $\delta^{18}\text{O}$, δD versus $\delta^{18}\text{O}$ based on EC, bubble plot of groundwater depth versus $\delta^{18}\text{O}$ based on EC, bubble plot of δD versus $\delta^{18}\text{O}$ based on Cl, Cl versus $\delta^{18}\text{O}$ and δD , and Cl versus D-Excess in the studied aquifers. These diagrams were plotted and analyzed using Microsoft Excel.

Results and Discussion

The results from the bivariate plots of Total Dissolved Ions (TDI) versus other major ions for the alluvial aquifers of Behbahan, Ramhormoz, and Zeydun indicate that the primary processes influencing water chemistry are related to the dissolution of sulfate and chloride. In the studied areas, as TDI increases, the concentration of sulfate increases linearly. This linear relationship is also observed between sulfate and calcium ions, suggesting the process of gypsum dissolution in the groundwater of the studied plains. However, the sulfate concentration in the water samples varies across the plains, with $\text{Ramhormoz} > \text{Behbahan} > \text{Zeydun}$. A similar linear relationship is observed for magnesium ions. The primary source of the increase in magnesium concentration can be attributed to dedolomitization, a dominant process in carbonate-calcium waters that come into contact with gypsum-bearing sediments along the flow path. Approximately 70% of the samples have a TDI below 100 milliequivalents per liter (meq/L). In this range, the Ca^{2+} ion concentration increases up to 25 meq/L in Behbahan and Ramhormoz plains and up to 15 meq/L in Zeydun plain, after which it stabilizes. Within this range, the SO_4^{2-} ion concentration also shows an increasing trend. For TDI values above 100 meq/L, a transitional trend from gypsum dissolution toward halite dissolution is observed, although this transition remains incomplete. This increasing trend is particularly noticeable in the samples from Ramhormoz and Behbahan plains.

The isotopic values of groundwater samples in the studied plains range from -4.57‰ to -1.34‰ for $\delta^{18}\text{O}$, with an average of -3.21‰, and from -21.84‰ to -7.57‰ for δD , with an average of -15.37‰. Three samples from Behbahan plain, one sample from Ramhormoz plain, and one sample from Zeydun plain are distinct from the others, with $\delta^{18}\text{O}$ values less than -4‰, indicating fresh recharge waters. Two samples from Ramhormoz plain show significant isotopic enrichment, which is attributed to evaporation. This phenomenon is also observed in six samples from Behbahan plain, though the enrichment of $\delta^{18}\text{O}$ ranges between -2‰ and -3‰. The remaining samples in the studied plains fall within the range of -3‰ to -4‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -17‰ to -13‰ for δD . In Behbahan plain, $\delta^{18}\text{O}$ values range from -3.2‰ to -4.5‰, and δD values range from -15.7‰ to -21.8‰. Electrical conductivity (EC) values below 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in many samples indicate limited evaporation and recharge from irrigation and drainage networks. In Ramhormoz plain, $\delta^{18}\text{O}$ values range from -2.4‰ to -3.8‰, and δD values range from -10.6‰ to -17.5‰. Higher salinity in this plain, with EC values exceeding 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and a positive correlation with increasing chloride concentration (up to 350 mg/L), indicates significant evaporation. In Zeydun plain, $\delta^{18}\text{O}$ values range from -3.5‰ to -5.3‰, and δD values range from -18.4‰ to -25.7‰. Chloride concentrations in this plain vary between 150 and 300 mg/L, suggesting a more limited role of evaporation and the mixing of surface and groundwater.

Conclusion

In this study, the hydrochemical and isotopic processes of groundwater in the Behbahan, Ramhormoz, and Zeydun plains were investigated. Overall, the chemical evolution of groundwater in these areas is primarily influenced by the dissolution of evaporative minerals (gypsum and halite), carbonate dissolution, evaporative processes, and ion exchange (both normal and reverse). These findings not only clarify the origin and chemical evolution of groundwater but also provide valuable insights for water resource management and mitigating the effects of salinity and contamination.

Assessing the Accuracy of Stochastic and Deterministic Data-Driven Models in Modeling and Predicting River Flow (Case Study: Western and Southwestern Rivers of Lake Urmia)

Document Type: Research Paper

Fatemeh Rohininia¹, Majid Montaseri², Behzad Hessari^{*3}, Jalal Shiri⁴

1-Phd Candidate of Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, IRAN.

2-Professor of Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, IRAN.

3-Associate professor of Water Engineering Department, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, IRAN.

4-Associate professor of Water Engineering Department, Tabriz University, Urmia, IRAN.

*Corresponding Author: b.hessari@urmia.ac.ir

Abstract

Simulating and forecasting river flow is crucial for understanding water inflow over different time periods, playing a significant role in water resource management. Therefore, this study evaluates and identifies the most suitable forecasting model for streamflow at seven hydrometric stations located on rivers in the west and southwest of Lake Urmia. The models employed include various stochastic ARIMA patterns as well as artificial intelligence (AI)-based models, including Extreme Learning Machine (ELM), Artificial Neural Networks (ANN), and Support Vector Machine (SVM). The results indicate that ARIMA (1,0,0) and ARIMA (2,0,1) models demonstrated superior performance in modeling streamflow in the studied rivers, with average Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) values of 0.67 and 0.68, respectively. In contrast, the average NSE values for the ANN, SVM, and ELM models were 0.38, 0.47, and 0.21, respectively. Additionally, the Pearson correlation coefficient for the stochastic models (0.83) was significantly higher than that of the best-performing data-driven models (0.61). Thus, stochastic models outperform artificial intelligence models in streamflow modeling and future river flow prediction within the study area, making them the preferred choice for hydrological applications.

Keywords: Artificial Intelligence Models, Prediction, Stochastic Models, Time Series, Urmia Lake Basin.

Introduction

As accessible water resources gradually decrease, the importance of water management and planning becomes increasingly evident. With urban expansion, industrialization, changes in crop patterns, and agricultural growth, the demand for water has also increased. Therefore, the prediction of parameters such as discharge and precipitation is considered one of the fundamental tasks in this field.

Estimating and determining the expected future occurrences of meteorological and hydrological phenomena are carried out within the concepts of short-term and long-term predictions. Short-term forecasting in hydrological studies involves the evaluation and estimation of the occurrence of meteorological and hydrological phenomena over several future periods following the end of the historical statistical period. The further the time period for the forecast is from the end of the historical period, the more uncertain and less reliable the prediction becomes due to the exponentially increasing weight of random behavior components in the occurrence.

The management of water resources, especially in sensitive and challenging areas such as the western and southwestern watersheds of Lake Urmia, where river flow forecasting plays a vital role in water resource planning, flood control, optimal water allocation, and the sustainable management of aquatic ecosystems in these watersheds, necessitates accurate simulation and prediction of river flows. Considering climate change and hydrological fluctuations, identifying accurate and appropriate

predictive models is a fundamental requirement for these watersheds. Therefore, examining various stochastic and artificial intelligence models is a crucial step toward identifying more effective tools for managing and predicting water resources in this region. Consequently, the aim of this study is to assess the accuracy of stochastic methods and artificial intelligence-based models in predicting and estimating river flows at 7 hydrometric stations located in the western and southwestern rivers of Lake Urmia.

Materials and Methods

Forecasting and simulating river flow to estimate river discharge over varying time periods is an essential and practical component of water resources management. This study evaluates and identifies the most suitable models for predicting the flow discharge at nine stations situated along the western and southwestern rivers of Lake Urmia. The models utilized include both stochastic models (ARMA and ARIMA) and artificial intelligence-based models (ANN, ELM, and SVM). In this research, eight distinct configurations of the ARIMA(p,d,q) stochastic model, incorporating different combinations of orders ($p=1, 2$; $d=0, 1$; and $q=0, 1$), as well as three artificial intelligence models, were utilized to fit historical monthly flow time series data for the seven rivers under investigation. The outcomes of these models were then compared to evaluate their performance.

1. ARMA (Autoregressive Moving Average)

- **Description:** The ARMA model is a combination of two models: AutoRegressive (AR) and Moving Average (MA).
 - **AR:** The AR part involves regressing the variable on its own lagged (past) values.
 - **MA:** The MA part involves modeling the error term as a linear combination of error terms occurring contemporaneously and at various times in the past.
- **Usage:** ARMA models are suitable for modeling and forecasting time series data that is stationary, meaning its statistical properties (mean, variance) do not change over time.

2. ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)

- **Description:** The ARIMA model extends the ARMA model by including integration (I) which involves differencing the data to make it stationary.
 - **AR:** Similar to ARMA, it uses past values of the variable.
 - **I:** The integration part makes the data stationary through differencing.
 - **MA:** Similar to ARMA, it models the error terms.
- **Usage:** ARIMA is widely used for forecasting because it can handle data with trends and seasonality by transforming non-stationary data into stationary data.

Artificial Intelligence-Based Models

1. ANN (Artificial Neural Network)

- **Description:** ANN is a computational model inspired by the structure and functions of biological neural networks. It consists of interconnected layers of nodes (neurons), including an input layer, hidden layers, and an output layer.
- **Usage:** ANNs are capable of capturing complex non-linear relationships in the data, making them suitable for a wide range of applications, including time series forecasting.

Artificial Neural Network (ANN) models simulate the functioning of the brain through interconnected neurons, where the output of each layer serves as the input for the next layer. The connection weights between neurons simulate information transfer, akin to synaptic connections in the brain, and the learning process in the network occurs through the adjustment of these weights. In this study, a Multilayer Perceptron (MLP) neural network, available in the scikit-learn library and used for prediction, was employed. Additionally, the number of hidden layers and the number of neurons in each layer were set to (100), (100 and 100), and (50, 50, and 50), respectively.

2. ELM (Extreme Learning Machine)

- **Description:** ELM is a type of single-hidden layer feedforward neural network where the weights between the input and hidden layer are randomly assigned, and only the weights between the hidden and output layer are learned.
- **Usage:** ELMs are known for their fast-learning speed and good generalization performance, making them useful for regression and classification tasks, including hydrological modeling.

3. SVM (Support Vector Machine)

- **Description:** SVM is a supervised learning model that analyzes data for classification and regression analysis. It works by finding the hyperplane that best separates the data points of different classes in the feature space.
- **Usage:** SVMs are effective in high-dimensional spaces and are widely used for both linear and non-linear data. They are particularly robust in dealing with outliers and noise in the data.

In this study, to develop and evaluate the performance of stochastic and artificial intelligence models in flow data modeling, monthly time series data over a 30-year statistical period (1991-2020) were utilized. For this purpose, 70% of the initial monthly flow time series data were used as input data for model training or calibration, while the remaining 30% of the data from the end of the time series were reserved for testing or validating the developed models. The results of this research, due to the importance of model performance during the testing or validation period, are solely focused on this phase. Flow data modeling and prediction in the study area were conducted for 7 selected river hydrometric stations, namely Chehriq-Zulachay, Tapik-Nazluchay, Kalehur-Rowzehchay, Mirabad-Shahrchay, Hashemabad-Baranduzchay, Payqala-Gadarachay, and Kootar-Mahabadchay.

Results and Discussion

In this study, the performance of eight different ARIMA stochastic models and three artificial intelligence models (ANN, ELM, and SVM) was evaluated for modeling and predicting the flow of seven rivers in the western and southwestern regions of Lake Urmia. For this purpose, monthly time series flow data of the studied rivers from the statistical period 1991-2020 were used, with 70% of the data (1991-2011) allocated for model training and the remaining 30% (2011-2020) for testing or validation. Due to the critical importance of model performance in predicting river flow during the testing period and the page limitations of the article, the results are solely focused on the testing period. The findings and their interpretation are summarized as follows:

Based on the ACF plot, only one-month and seasonal (11-13) autocorrelations were significant in the monthly flow time series for all rivers in the study area. Accordingly, eight suitable ARIMA(p,d,q) stochastic model configurations were identified.

Four models—ARIMA (1,0,0), ARIMA (1,0,1), ARIMA (2,0,0), and ARIMA (2,0,1)—provided satisfactory predictions of flow values during the testing period for all rivers, with average correlation coefficient and Nash-Sutcliffe values of 0.83 and 0.68, respectively, for the seven rivers in the region.

Conclusions

The comparison of the results of stochastic models and the three artificial intelligence models indicated a significantly better performance of the top four stochastic models compared to the top artificial intelligence models. These results are entirely consistent with the findings of previous studies, such as Fathabadi (2009), Hejabi et al. (2013), Papacharalampous et al. (2019), Zainalddin et al. (2020), and Shahin et al., (2024).

The results of the artificial intelligence models highlighted the necessity of emphasizing further tuning and optimization of the parameters of these models for each specific condition governing the flow values in the studied rivers. Given the structure of stochastic models and their reliable performance

in flow modeling and prediction in this study, their application in predicting future river flows appears to be more reliable than that of artificial intelligence models.

Prediction of water flow of karst springs during drought with fractal geometry (case study of Kermanshah province)

Document Type: Research Paper

Turan Kolani¹ *, Mohammad Nakhai², Mehran Arin³

1. Master's degree in Hydrology, Tehran University of Research Sciences, Tehran, Iran.

2. Professor of Department of Geology, Khwarazmi University of Karaj, Karaj, Iran.

3. Professor of Geology Department, Tehran University of Research Sciences, Tehran, Iran.

*Corresponding author: tourankulani@yahoo.com

Abstract

Kermanshah province, with an area of about 24,953 square kilometers, is located in the middle of the western side of the country, most of which is located inside the folded and folded zones of the Zagros, and most of its heights are made of hard (carbonate) formations. Karst areas of Kermanshah province play an important role in supplying and feeding aquifers. The new method for studying karst springs is fractal geometry. The main characteristic of fractals is the fractal dimensions that can take on non-integer numbers. In this research, 59 karst springs of the province of Sejang and their geological status, tectonics, rainfall status, the degree of coordination of irrigation with rainfall changes, hydraulic behavior of the springs, reservoir capacity and drought time of the springs, and finally forecasting the situation have been tried in this research. All karst springs and their reactions to changes in precipitation should be investigated by fractal geometry. The results of this research predict the dry periods of the karst springs of the province with fractal geometry, determine the type of system of the karst springs of the province, the severity of the dry or wet period of the springs, and compare different regions of the province in terms of karst development and its effect on the karst springs of the province.

Keywords: drought, fractal dimension, Fractal geometry, Karst springs.

Introduction

Fractal is a new branch of mathematics and art. Most physical systems in nature and many human artifacts do not have regular geometric shapes according to standard Euclidean geometry. Fractal geometry provides almost limitless ways to describe, measure, and predict these natural phenomena. Many people are fascinated by images called fractals. Beyond what people commonly think, fractal geometry is about mathematics, which they see as complex and boring formulas. This geometry combines mathematics with art and shows that equations are nothing more than a set of numbers. What makes fractals even more interesting is that they are the best mathematical descriptions available for many natural phenomena, such as beaches, mountains, or parts of living organisms. Two of the most important characteristics of fractals are self-similarity and their non-integer dimension.

Altafi Dadgar and Nakhai (2009) in an article entitled Estimating the Intrinsic Permeability of Fractal Porous Medium by Monte Carlo Method have estimated the permeability of fractal porous medium by simulation. For this purpose, using the results and measurements of previous studies on several sandstone samples such as porosity, fractal dimension, the upper limit of fractal property and inherent permeability, using the Monte Carlo probability model, a series of random and random numbers between 0 and 1 is produced and The size of the diameter of the pores has been determined. Finally, the permeability value for sandstone samples was simulated and compared with the measured values. The results of these researchers showed that the Monte Carlo simulation model is well capable of simulating the permeability of fractal porous medium without the need for experimental coefficients, spatial discretization and only by determining a few parameters required in the laboratory. The measured and calculated permeability values match with a correlation of 83%. Fakhri () in his

dissertation entitled "Prediction of flow rate and time of death of Sasan and Seyed Hossein karst springs and the trend of water level changes in piezometric wells in Kazeroon plain with fractal geometry" fractal dimension of Sasan and Seyed Hossein springs as well as piezometric wells located in Kazeroon area, obtained by fractal geometry method to evaluate the potential of the area in terms of spring formation and to predict water supply.

Pachepsky (2004) in an article titled Applications of Fractal Geometry in Soil Hydrology considers the geometric characteristics of primary particles, aggregates, holes and soil surfaces to be extremely important for understanding and managing soils. aya Sagar & Chokalingam in an article entitled Fractal dimension of the non-grid space of the watershed have reached the following results: the production of the non-grid space M from the X basin reconstructed from the channel network such that the channel network is included in X and secondly, the decomposition of M into NOD to calculate the dependent dimension Fig.

Mandelbrot's formula summarizes many of his views on the fractal geometry of nature, the real world of the fourth dimension. This contrasts with the idealized Euclidean shapes of the first, second, and third dimensions that nearly all mathematicians before Mandelbrot dealt with. Euclidean geometry is about perfection that does not exist in nature. It describes the shape of a cloud, or a mountain, or a tree, or a coastline. As Mandelbrot explains in his book Fractal Geometry of Nature, clouds are not spheres. Mountains are not cones, coastlines are not circles, sailing ships are not flat, and lightning does not travel in a straight line. Before Mandelbrot, mathematicians believed that most patterns in nature were too complex, irregular, fragmentary, and amorphous to be described mathematically. But Mandelbrot presented a new fractal geometry of nature based on the fourth dimension and complex numbers, which is prone to mathematical description of the most irregular and shapeless shapes of the real world. As Mandelbrot says, fractal geometry is not a chapter of mathematics but something that helps everyone. to see the world in a different way.

Eleven percent of Iran's area is covered by karst carbonate formations (Afrasiabian 1372, Raisi and Kausar 1997). The amount of water stored in these areas can meet the water needs of many cities and villages. Big cities such as Shiraz, Kermanshah and large areas of the province. Ilam, Lorestan and Kurdistan feed from karst water sources. Hundreds of karst springs come out of the karst formations with considerable water flow and very good quality. The water of these springs is used for drinking, agriculture and mineral water. Most of these springs welcome many tourists. Karst stones are widely used in buildings. In this research, it is tried to select the springs of each zone or part and the geological situation, tectonics, precipitation situation, the degree of coordination of irrigation with changes in precipitation, hydraulic behavior of the springs, reservoir capacity and drought time of the springs, coefficient of flow rate changes and hydrochemical characteristics. The type of karst spring system and finally the prediction of the general condition of karst springs and their reaction to changes in precipitation should be investigated. Fractal geometry is used to predict the condition of springs during drought.

Materials and Methods

In order to check and predict the discharge of karst springs during drought with fractal geometry, the steps of preparing standard maps were done. These maps were prepared using 9.2 ARC GIS software package. The data required to prepare these maps have been collected from various sources. Some phenomena around us cannot be justified in the framework of Euclidean geometry. In Euclidean geometry, correct dimensions are one, two, and three, and Euclidean geometry can only explain one-dimensional, two-, three-, or more-dimensional phenomena. In the fractal dimension, this new attitude has emerged that we should not assume the dimensions of phenomena and events to be integers, and therefore the dimensions of 1.7 and 1.5 and the like are proposed. That is, the fractal dimension investigates scale-independent phenomena and extracting existing relationships between their geometric shapes at different scales.

In this study, to describe and determine the fractal dimensions of the studied karst springs in wet and non-humid periods, suppose there are n to dry periods ($d_1, \dots, d_2$, and d_1) throughout a certain level. To extract the fractal dimension of the dry and wet period, we choose the dry period unit (1) d as a one-day, one-month, or one-year period based on the available data. (For example, each month represents 1 cm on the curve), we choose a standard length equal to the initial unit for step 1, we slide the measuring standard along the dry period and count their number, n_1 , for the initial unit. Repeat step 3 and take the different continuation time of the dry period to get the result which is a sequence of integers ($n_1, \dots, n_2, n_1$). Continue the work and number the steps in the same way to find the maximum steps ($n_1, \dots, n_2, n_1 = (1)N$)

Get the value of $(1)d(1)N$, which is an estimate of the maximum duration of drought (1) D with unit (1) d . Increase the duration of the period by one unit and then repeat steps 3 to 5. The result is the number of step (2) N with the length of the period (2) d and the duration of the dry period (2) $d(2)N$. Continue the steps until the same recipe is completed until the length of the time period is equal to the maximum length of time continuity of drought in the recorded data. Now there are several different estimates and estimations of the total duration of drought, $d(j)$ and numbers (j) N . If $m, \dots, 2, 1 = j$, where m is the number of possible rings that there is. It is clear that the increase in (j) d will be due to the decrease in (j) D . To show the method of finding the continuation time of rainy and non-rainy periods and their number, the monthly flow rate in different springs of the province is presented in (Table 3). In order to obtain the fractal dimension in the desired springs for all the springs, a logarithmic-logarithmic curve of the duration of the dry (wetter) months is drawn and a linear regression with the best fit is obtained on the drawn points of the duration of the dry (wetter) months of the springs. The fractal dimension is obtained from the slope of this line.

Results and Discussion

The data related to the discharge of 59 springs of the province from the information and statistics collected by the Kermanshah Regional Water Company and the statistics related to the amount of temperature, precipitation, humidity and evaporation from the information and statistics site of the Meteorological Organization of Kermanshah Province as a point in the soft environment. The imported Excel software is then called to the 9.2 ARC GIS environment. These point data include the geographical location of the springs (Table 1), the amount of temperature, precipitation and evaporation. All data are converted to a utm image system and an 84 WGS reference system. Then he counted the dry and wet months of each spring, the results of which are as described (Table 2). The annual average discharge of the statistical period of the springs is obtained and we rank the springs based on it from maximum to minimum (Table 3). In the following, we draw logarithmic-logarithmic curves from the time of dry (wet) continuity (Figure 4). In the following, we will rank the springs based on the dry and wet fractal dimension from the highest to the lowest (Table 4) and (Table 5) and compare the result with the flow rate of the springs. In the following map, we draw the fractal dimension and compare it with the degree of karstification of the province (Figure 2) and (Figure 3). In order to find the relationship between the amount of rainfall and the discharge of the springs, we draw the rainfall-discharge curves for all the springs (Figure 5). How long does each spring spend in the dry season after the rain stops (Table 6).

Conclusions

The most karst evolution is in the parts of the Zagros subterranean and high zones, which have high and moderate karst evolution, respectively, and the further we go towards the folded Zagros, the karst evolution becomes weaker. The most important factor of karstification in the mentioned areas is due to the presence of seams and cracks and faults and the effect on the development and dissolution in the region compared to other units that have less density of faults and seams and cracks. According to the statistics collected from the meteorological stations of Kermanshah province, the highest amount of rainfall is in the low and high zones of Zagros. Also, the lowest annual temperature and the lowest

evaporation rate are related to the Sandaj-Sirjan zone and the central and southern parts of Kermanshah province, which is part of the high zone of Zagros. is The highest value of the drought fractal dimension in the central and southern parts of Kermanshah province is 6.76 in the springs of Birjan, 4.08 in Metrovan Gauravani, 3.57 in Khizralias and 3.5 in Armenijan. Bidserukh is 1.16, Heshilan 1, Nilofer 1. The position of the springs has been determined according to the determination of the fractal dimension in terms of whether they are watery or dry according to the logarithmic-logarithmic curve: a- Springs are watery where the line of wet months is above the line of dry months. (Armenian springs of John) - Bernaj - Bi Abar - Tiran - Khizr Zind and...). B- Springs are considered semi-aqueous where the line of the wet months is above the line of the dry months and the distance between the lines is small. C- Springs are considered dry when the line of dry months is above the line of wet months. The fractal dimension of springs is effective on their discharge flow. So that the higher the fractal dimension of the springs, the higher the discharge, and vice versa. For example, in Nilufer spring with a fractal dimension of Tarsali 1, the average annual discharge rate is 10344 cubic meters and in Bernaj with a fractal dimension of 1.8, the average annual discharge rate is 22727 cubic meters, while Borbor Spring with a fractal dimension of 0.22 has only 1.051 cubic meters of annual discharge. has Based on the statistical data related to the daily discharge of springs, rain gauges, network of observation wells, and according to the available information, we conclude that in the folded Zagros zone, there is mainly an effusion karst system and in the crushed zone, there is a channel karst system. The stability and durability of springs against droughts and lack of precipitation in the springs that appeared in the folded zone is more than other zones and existing geological units.

The effect of bedrock and soluble materials on the formation of scallops in Namksar salt cave and Sarab limestone cave

Document Type: Research Paper

Mohammad Nakhaei¹, Sarah Edalatian Arasteh^{*2}, Asghar Dolati³

1- Professor, Applied Geology Department, Water Research Center, Kharazmi University, Karaj, Iran.

2- Ms. in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran.

3- Professor, Applied Geology Department, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran.

*Corresponds: k2_infinite@yahoo.com

Abstract

Scallops are oyster-shell-shaped depression in cave walls, floors and ceilings. Scallops are hydraulic phenomenon which may be used to indicate Past flow direction and other hydraulic parameters, in the caves. Scallops are asymmetrical in the direction of flow, with a smooth slope on the downstream side of the scallop and a steep cusp on the upstream side. Production of scallops is based on the turbulent flow of a solvent over a soluble surface. In nature, this occurs most frequently with water dissolving limestone or with air dissolving ice. In some cases, scallops may form in the chloride or gypsum caves. In the formation of scallops that are formed by water flow, the hydraulic and chemical characteristics of water flow as well as the type of bedrock are effective in the morphology of scallops. To investigate the effect of bedrock and water-soluble materials on the formation of scallops, a salt and limestone caves with scallops were compared. The results show that due to the larger dimensions of the mirages of Sarab Cave compared to Namksar Cave, the flow velocity in Sarab Cave was slower. The Reynolds number in both caves is almost the same and the flow velocity in Sarab Cave was 17 times higher than in Namksar Cave, but the discharge was almost the same in both caves. Also, the sedimentation (settling) rate in Namaksar cave was 1.8 times faster than Sarab cave. The importance of this article is that for the first time a study on the comparison between salt scallops and limestone scallops was conducted.

Keywords: Cave mapping, hydrogeology, salt cave, Sarab cave, Scallops.

Introduction

Namaksar salt cave is located in the vicinity of Golbagraei village, 60 km from Mashhad in the South, between the road of Mashhad and Torbat Heydariyeh. The cave is located in solitary mountains at a height of about 20 meters from the surrounding land with very little vegetation. Many dolines have formed around the salt cave. The surface of the dolines is covered by a very thin layer of salt. Around the entrance of the cave there are karrens that have formed in salt and gypsum formations.

The cave floor is filled with lots of minerals such as salt and gypsum, which are due to falling from the roof and carried materials from outside the cave by floods. At the end part of the cave situated on the roof, there are scallop shapes that have been created by dissolution process. There are also falling rocks with thorns and debris inside them, such as dried barley or wheat clusters that may have been brought to the site by floods. The decorations or soeleothems inside the cave include cave flowers, salt cauliflower and salt crystals.

Sarab Cave is located about 70 km northwest of Hamadan city, Hamadan province, in metamorphic Jurassic rocks. The entrance of Sarab Cave consisted of stone boulders which had blocked the entrance of the cave but have been removed for traveling into the cave. After 10 meters, the cave passage turns to the right and leads to the bottom, which is a small gallery.

In this gallery, scallop shapes can be seen on the roof and walls of the cave. From the left, the path continues with a small passage. A small hole in the floor with a heavy air flow allows access to the first cave lake (six meters long and at least 4 meters deep).

Then climbing down the rock, we enter a lake one meter deep. In this part of the lake, the decorations of Folia can be seen and the bottom of the lake is covered with clay and sand sediments. Along the way you can see flowstone, stalagmite, stalagmite and columns that extend from the roof of the cave to the floor. This path extends in the form of a traverse covered with calcite and flowstone and ends on the left side of the lake. The roof and walls on the right are covered with scallops. In order to travel further in the cave, one should enter the water.

Gol Tappeh-Zarrinabad area, where Sarab and Ali Sadr caves are located (7 km away from Sarab cave), is located between two regions in terms of geological location, its northern parts are in central Iran and its southern part is in Sanandaj-Sirjan zone. Therefore, in the study area, rocks and tectonic effects of both areas can be observed. Jurassic metamorphic shales and shales are the oldest known rocks in the study area. These rocks are mostly in the western margin and sometimes scattered in the south and east of the region. In the lower part, there are gray schists and crystallized limestone with dolomite which is located in the form of interference between layers.

Materials and Methods

Both Sarab cave with UISV2-6-4-E grade and Namaksar salt cave with UISV2-4-3-BC grade were mapped and the location of scallops were marked on the map.

The mapping was done by a Disto X310 laser meter equipped with a compass and inclinometer kit, and the information was transferred to Topodroid software via Bluetooth. By determining the mapping stations in points of the cave that have a direct view of each other and measuring the length, azimuth (angle to the north) and the slope between the two stations as the main values, we draw the main lines of the map. Also, by measuring the distance of the main mapping lines from the walls, ceiling and floor of the cave, the space of the cave can be drawn in three sections.

These two caves, extended horizontally, were drawn only in the plan view, and other profile view information such as the height of the roof and the slope of the cave were added to the plan view.

Results and Discussion

Characteristics of Sarab cave

The length of this cave is 1700 meters and its depth is twenty meters. After the first hundred meters, most of the routes and passages of the cave are full of water. The water depth is between five and twenty meters and the water temperature is 8 degrees Celsius. Water type is Ca-HCO₃.

Characteristics of Namaksar cave

The length of this cave is 150 meters and its depth is twenty meters. Scallops have been formed in three parts of this cave. The scallops at the end of the cave were selected for measurement due to the greater number and clarity.

There is no water flow in this cave. The presence of cave flowers indicates that relatively dry conditions prevail in this cave and there is no dripping water in this cave.

The cave flowers were sampled and the X-ray diffraction (XRD) results obtained from show the chemical composition of sodium chloride with a cubic crystal structure

At the end of Namaksar salt cave, 22 scallops were selected and their length were measured. The direction of water flow in the scallops can be distinguished from their deep and shallow parts. The deep parts are at the top and the shallow parts are at the bottom, where the eddy current comes out. Therefore, the direction of water flow is towards the end of the cave. The longitudinal mean of the scallops is obtained from the Sauter mean equations.

In Sarab cave, scallops were suitable for measurement after passing the first pond of the cave. 9 scallops were selected and their lengths were measured and the mean length of scallops was calculated from the Sauter mean equations.

Curl in his paper (1074) showed that scallops are formed at a constant Reynolds number $Re = 2200$. Therefore, having the values of density and viscosity of dissolved water containing sodium chloride for salt cave and water containing carbonic acid for Sarab cave, and hydraulic equation near the scallops, hydraulic characteristics of flow in two caves including flow rate, Reynolds number, Darcy friction factor, Froude number, shear stress, flow rate and settling velocity were obtained in both caves.

Conclusions

In this research, the flow characteristics in Namksar salt Cave and Sarab limestone cave have been investigated using the physical and geometric properties of scallops. The scallops at the end of Namksar Cave and in the second part of Sarab Cave have been used for measurement. Compared to Namaksar Cave, the water flow velocity decreases as the size of the scallops increase. Flow properties are studied in two caves. As expected, by decrease in flow velocity, the size of scallops increases. The acquired Reynolds number (based on conduit diameter) in two caves shows turbulent flow in each conduit. Conduit flow is fully turbulent in a conduit of diameter D . The Froude number provides a second way of classifying flow conditions and is based on the relationship between flow velocity and flow depth. Froude number less than one ($F < 1$) shows subcritical flow which is deep, slow flow with a low energy state. When flow conditions are subcritical, disturbances in the flow can generate surface waves, and because the downstream flow is so slow, those surface waves can travel in an upstream direction and a downstream direction. The results show that due to the larger dimensions of the mirages of Sarab Cave compared to Namksar Cave, the flow velocity in Sarab Cave was slower. The Reynolds number in both caves is almost the same and the flow velocity in Sarab Cave was 17 times higher than in Namksar Cave, but the discharge was almost the same in both caves. Also, the sedimentation (settling) rate in Namaksar cave was 1.8 times faster than Sarab cave. Because almost nothing about comparing salt scallops and limestone scallops has appeared in Iranian Speleological literatures, particularly on salt caves, the main purpose of this paper is to study deducing Paleo-hydrologic conditions in this cave. The importance of this article is that for the first time a study on the comparison between salt scallops and limestone scallops was conducted.

Simulation of groundwater using artificial intelligence system (Case study: Komeh Basin of Isfahan province)

Document Type: Research Paper

Roohallah Samiee Dastjerdi¹, Mehdi Hayatzadeh^{2*}, Ali Fathzadeh³, Farzaneh Fotouhi Firoozabad⁴

1. MSc, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

2. Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

3. Associated Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

4. Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

* Corresponding Author: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

Abstract

The limitation of surface water resources has led the demand for water consumption to the use of underground water resources and the withdrawal from these sources and the lack of feeding of the aquifers has caused a drop in the level of groundwater. On the other hand, to evaluate and manage water resources in the conditions of today's and future dangers, it is necessary to predict the level of ground water. The purpose of this research is to predict the ground water level of Komeh basin in Semirum city of Isfahan province using artificial intelligence system. In this regard, were used the observational data of groundwater level, precipitation and discharge on a monthly scale with a 20-year time series (1379-1398). Multilayer perceptron (MLP) network algorithm was used to check the prediction power and influence of inputs from different arrangement, change of input weights, change of layers and number of neurons. In order to check the performance of the models, were used two measures of root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). For this purpose, 75% of the data (180 data series) were used for training the network and the remaining 25% (60 data series) were used to evaluate and test the network. Based on the comparison of the tables of RMSE and R of different arrangements, in predicting the groundwater level of the studied basin, the effect of precipitation is more than discharge and Levenberg–Marquardt training algorithm has a better performance than others with a coefficient of determination of 0.99 and root mean square error of 0.0047. The results, while confirming the appropriate efficiency of artificial neural network models in simulating the groundwater level, showed that the use of climatic parameters compared to hydrological parameters to model small amounts of underground water in the artificial neural network model has a better performance. The results indicate that in the simulation of the groundwater level using artificial neural network, due to the existence of many uncertainties in the input data to the network, the selection of the type and structure of the model is of particular importance.

Keywords: Artificial Intelligence, Groundwater, Levenberg–Marquardt Algorithm, MLP Network.

Introduction

Water, as the main vital substance for humans, is very important and the limitation of suitable surface water resources, the demand for water consumption due to the increase in population and the development of agriculture have led people to exploit groundwater reserves. Obviously, is vital to manage water resources, having correct information and predicting the level of groundwater. If action is not taken as soon as possible regarding the planning and management of ground water resources, we will witness further destruction of aquifers, lack of renewal and loss of underground water resources. On the other hand, in order to evaluate and manage water resources in the conditions of today's and future risks, it is necessary to predict the level of ground water. Today, the use of software mathematical

models for monitoring and managing ground water has developed significantly and has provided a tool for managing water resources. Also, due to the existence of uncertainty in many experimental modes, is considered the use of new and intelligent methods such as the artificial neural network method. The artificial neural network model is able to understand the weak hydrological relationships, it is a powerful method in real data analysis and it can recognize the pattern and hidden relationship between the data, train itself and make appropriate predictions by increasing its information. Also, due to its accurate predictability, it can be used in groundwater management strategies. Researchers have come to the conclusion that artificial neural networks can be a suitable substitute for other methods. The purpose of this research is to predict the ground water level of Komeh basin in Semirom city of Isfahan province using artificial intelligence system.

Methodology

In this research, were used the observational data of ground water level, precipitation and discharge on a monthly scale with a 20-year time series (1379-1398). Multilayer perceptron (MLP) network algorithm was used to check the prediction power and influence of inputs from different arrangement, change of input weights, change of layers and number of neurons. The network used in this research is a multi-layer perceptron (MLP) network that works as a feedforward. The number of neurons in the input layer is variable, after which variable inputs will be induced into the network, and the output consists of one neuron, which is the same as the artificial current produced during the day. There are also 20 neurons in the middle layer. The neurons of the middle layers use the sigmoid tangent transformation functions, and the linear transformation function is used in the output layer. In order to check the performance of the models, were used two measures of root mean square error (RMSE) and correlation coefficient (R). For this purpose, 75% of data (180 data series) were used for network training and the remaining 25% (60 data series) were used for network evaluation and testing. In neural network models, research has shown that a network may experience overfitting. If the training process is too long, the network may begin to memorize certain input-output pairs. When a set of new input values is applied, the overtrained network tends to recall one of the stored vectors, while it should be able to generalize the output vector for any given input vector. To avoid this situation, training can be stopped before the network begins to memorize. The generalization process can be simplified by adding less accurate data to each input-output vector during each training iteration. By using this method, the network will never see pairs of input-output vectors that are exactly the same, thus preventing it from memorizing specific patterns.

Results and Discussion

Based on the comparison of RMSE and R test results in different arrangements, in predicting the ground water level of the studied basin, the effect of precipitation is greater than discharge and Lunberg-Marquardt training algorithm has a better performance than others with a correlation coefficient of 0.99 and root mean square error of 0.0047. The results, while confirming the appropriate efficiency of artificial neural network models in simulating the ground water level, showed that the use of climatic parameters compared to hydrological parameters to model small amounts of ground water in the artificial neural network model has a better performance.

Conclusions

Since groundwater level changes depend on many factors, predicting groundwater levels with multiple inputs to artificial neural network models will face uncertainties. As additional inputs are included, not only does the complexity of the network structure increase, but the predictions may also face greater uncertainty. Therefore, selecting the best network and the most effective factors in the changes of the variable in question is a significant step in reducing uncertainties in predicting that variable. In this study, an artificial neural network model with different configurations was used to predict the groundwater level in the Kome watershed of Semirom County. The comparison of the first and fourth arrangements shows that with the addition of the surface flow rate as an input to the network models, its efficiency decreases. Also, the efficiency of modeling has improved by increasing the delay

time in climate data and ground water, and this is a sign of the effect of rainfall even in mountainous areas, with intervals of one month and two months, on changes in the ground table. By comparing the results of the statistical tests of four different arrangements in the neural network model, it can be concluded that had the best performance the models trained with the Levenberg–Marquardt training algorithm which is consistent with the results of some similar researches in this field. Therefore, predicting the level of groundwater according to the proven efficiency of artificial neural network models can be a big step in the direction of managing groundwater resources. Additionally, according to the results of this study and considering the complexity of modeling groundwater levels due to various climatic, geological, and managerial factors, it is recommended to use artificial neural network models for short-term predictions of groundwater levels with a satisfactory degree of accuracy.

Prediction of hydrological drought using the GRI index and linear random time series models (Study area: Ardabil Plain aquifer)

Document Type: Research Paper

Seyed Mahdi Hoseini^{*1}, Yagob Dinpashoh², Omid Babamiri³

1- Former MSc student, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor of Water Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Post Doctoral student of Water Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*Corresponding author: mahdi.hoseini@ut.ac.ir

Abstract

The study investigated hydrological droughts in the Ardabil plain aquifer. The monthly groundwater level observations in 48 wells in the statistical period of 2004–2021 were used for this aim. The Thiessen polygon approach was applied here to transform point data to the regional form. GRI indexes were computed in different time scales, which are 1, 3, 6, 9, and 12 months for regional groundwater level data. Then the GRI time series were modeled. Model performances were evaluated using the Nash-Sutcliffe (NS) and Akaike Information Criteria (AIC) to find the appropriate model. Based on observational data, the parameters of the models were evaluated. Drought was analyzed for each of the time series separately. To predict drought, the fitted model for each of the time series was used. Results showed that the longest drought period length in the three-month timeframe belonged to the period 2004 to 2007; however, it was in the period 2015 to 2021 using the 6-month time span. Using the GRI1 and GRI9 scales, the largest severity of wetness and drought spells were calculated to be about 1.87 and -3.21, respectively. Modeling of GRI time series showed that all-time series have a seasonal trend, and therefore, they were fitted using the SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) model. Results revealed that SARIMA (5,1,0) (0,2,2) is the most appropriate model for the GRI3 series. Values of model performances of the mentioned model using the observed data were about NS=0.53 and AIC=-96.6. Therefore, it can be concluded that time series models have relatively suitable precision in predicting GRI series with different time windows in the Ardabil plain.

Keywords: ARIMA, drought, GRI index, Groundwater , prediction.

Introduction

Drought is one of the most complex and multidimensional natural hazards, posing serious challenges to the sustainability of ecosystems, agricultural productivity, and water security worldwide. Among its various types—meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic—hydrological drought represents the most persistent and impactful form, as it directly affects the availability and storage of water in surface and subsurface systems. In arid and semi-arid regions like Iran, where climatic variability is high and surface water is limited, groundwater often serves as the primary buffer against drought conditions. However, prolonged dry periods, coupled with increased water demand and inefficient resource management, have resulted in alarming declines in groundwater levels. This situation underscores the urgent need for accurate monitoring tools and forecasting models that can inform timely and sustainable water management strategies.

The Ardabil Plain Aquifer in northwestern Iran is a prime example of a groundwater system under growing stress. It supplies water to thousands of households, farms, and industries and is vital to the region's socio-economic stability. Over the past two decades, the aquifer has experienced considerable depletion due to a combination of natural and anthropogenic factors, including declining precipitation, changes in recharge patterns, and excessive abstraction. The situation has raised serious concerns about

the long-term sustainability of this aquifer and highlighted the need for robust drought monitoring frameworks. In this context, the Groundwater Resource Index (GRI)—a normalized anomaly index derived from groundwater level data—has emerged as a reliable and sensitive tool for identifying and classifying groundwater droughts. Unlike traditional indices such as SPI and PDSI, which focus on atmospheric or soil moisture variables, GRI directly reflects aquifer behavior, making it especially suitable for hydrogeological applications.

Despite its proven utility in drought assessment, GRI has been less commonly integrated with predictive models capable of forecasting groundwater drought evolution. Time series models such as ARIMA and SARIMA, grounded in the Box–Jenkins methodology, offer powerful approaches for modeling hydrological variables with trend and seasonality. These models are particularly effective in environments with strong temporal structures and data continuity. However, their application in Iranian aquifers, especially in conjunction with GRI, remains limited. This study aims to bridge this gap by employing ARIMA and SARIMA models to analyze and forecast GRI time series at multiple temporal scales in the Ardabil Aquifer. The integration of these models with GRI is expected to provide valuable insights into the temporal dynamics of drought and enhance the predictive capacity of groundwater monitoring systems in the region.

Materials and Methods

The Ardabil Plain is located in the northwestern part of Iran and spans an area of approximately 4,804 square kilometers. Geographically, it is bounded by the Sabalan Mountains to the west and south, the Talysh highlands to the east, and the Republic of Azerbaijan to the north. The elevation ranges from 1,300 to 1,600 meters above sea level. The region is characterized by undulating terrain composed mainly of Quaternary alluvial deposits, which form the basis of the Ardabil Aquifer. This aquifer system includes both unconfined and semi-confined layers with varying hydrogeological properties such as transmissivity and storage coefficients. The area experiences a cold semi-arid climate with an annual precipitation of approximately 273 mm, most of which occurs during spring and autumn. The mean annual temperature is about 9.9°C, and the region is subject to prolonged freezing conditions, with more than 120 frost days annually, all of which significantly affect groundwater recharge dynamics.

For this study, monthly groundwater level data from 48 observation wells were used, covering the period from 2004 to 2021. These wells were selected from an initial set of 52 based on the completeness, continuity, and reliability of their records. The wells are spatially distributed across the plain to ensure a representative dataset for regional groundwater analysis. Prior to analysis, the raw data underwent a preprocessing stage that included outlier detection and removal, filling missing values through linear regression methods, and normalization to ensure consistency across stations. To convert point data into a regionalized estimate of average groundwater levels, the Thiessen polygon method was applied using ArcGIS, allowing the generation of a single composite time series reflecting overall aquifer behavior.

The Groundwater Resource Index (GRI) was computed for five different temporal aggregation windows—1, 3, 6, 9, and 12 months—to capture both short-term variability and long-term trends. The index was calculated as the standardized anomaly of monthly groundwater levels, using long-term mean and standard deviation as reference values. Thresholds were then applied to classify drought severity into categories ranging from near-normal to extreme drought. This multi-scalar approach enables a comprehensive understanding of the aquifer's response to both transient and prolonged drought events. In addition to standardizing the series, statistical tests were employed to assess their suitability for modeling: the Kolmogorov–Smirnov test was used to check for normality, and the Mann–Kendall test was applied to detect trends and monotonic shifts over time.

Time series modeling was carried out using ARIMA and SARIMA frameworks, following the Box–Jenkins methodology. Separate models were developed for each GRI time scale. The modeling process involved examining the autocorrelation (ACF) and partial autocorrelation (PACF) functions to determine the appropriate order of autoregressive and moving average terms. Differencing was

performed where necessary to achieve stationarity. Seasonal components were included in SARIMA models to account for cyclical variations in the data. Model selection and validation were based on several statistical performance indicators, including the Akaike Information Criterion (AIC), Root Mean Square Error (RMSE), Nash–Sutcliffe Efficiency (NS), and coefficient of determination (R^2). To ensure robust model evaluation, the dataset was divided into training and testing subsets, with the final 12 months reserved for out-of-sample validation. Residuals were analyzed for randomness, normality, and homoscedasticity to confirm the adequacy and stability of the selected models.

Results and Discussion

The analysis of groundwater level data over the 17-year period revealed a pronounced and consistent decline across the Ardabil Plain aquifer. The cumulative drawdown amounted to approximately 5.36 meters, corresponding to an average annual decrease of about 32 centimeters. In certain high-extraction zones, the annual decline exceeded one meter, indicating a critical imbalance between recharge and abstraction. This spatially heterogeneous depletion pattern underscores the pressing need for differentiated groundwater management approaches across the plain. The overall trend confirms long-term stress on the aquifer, potentially exacerbated by both climatic shifts and unsustainable exploitation practices.

The Groundwater Resource Index (GRI), calculated at five temporal scales (1, 3, 6, 9, and 12 months), effectively captured variations in groundwater conditions over time. During the initial years of the study (2004–2007), GRI values at all time scales were mostly in the positive or near-normal range, indicating balanced groundwater dynamics and relatively stable recharge-discharge relationships. However, a notable shift began around 2013, when GRI values across most time scales dropped below -1.0 , suggesting the onset of moderate to severe hydrological drought. The 9-month GRI showed the most extreme condition, reaching -3.21 , signaling a sustained and intense drought episode that persisted for several years.

Time series modeling results demonstrated varying degrees of model performance depending on the GRI time scale. Among all configurations tested, the SARIMA (5,1,0) (0,2,2) [12] model applied to the 3-month GRI series produced the most accurate and reliable forecasts, achieving an RMSE of 0.63, an NS coefficient of 0.53, and an AIC of -95.6 . This model was effective in capturing the seasonal cycles in groundwater variation and exhibited no significant autocorrelation in the residuals. In comparison, the ARIMA model showed stronger performance for the 1-month GRI, where seasonal effects were less dominant. These findings emphasize the importance of aligning model structure with the temporal dynamics of the target variable.

Despite relatively strong model performance in short- and mid-term time scales, forecasting accuracy diminished for the 12-month GRI series. Although the SARIMA model for this time scale achieved a high Nash–Sutcliffe efficiency ($NS = 0.99$), its very low coefficient of determination ($R^2 = 0.09$) indicated a weak linear relationship between observed and predicted values. This suggests that while the model could replicate general trends, it struggled to predict specific magnitudes of change over longer aggregation windows. Residual analysis supported this conclusion, showing wider variance and reduced predictive precision. Out-of-sample validation using the 2021 dataset confirmed that the best-performing models were most effective for short- to medium-term forecasts, particularly the GRI3 series, which struck a balance between responsiveness and stability.

Conclusions

This study demonstrated the effective application of the Groundwater Resource Index (GRI) alongside stochastic time series models for forecasting hydrological drought in the Ardabil Plain Aquifer. The SARIMA (5,1,0) (0,2,2) [12] model applied to the 3-month GRI series proved most reliable in capturing seasonal patterns and producing accurate short-term forecasts. These results emphasize the importance of integrating seasonality and trend components in modeling groundwater dynamics, especially in

regions with marked climatic variability. The consistent decline in groundwater levels and the shift to negative GRI values since 2013 indicate that the aquifer is experiencing chronic drought conditions, exacerbated by both natural and human-induced pressures.

The use of GRI as a drought index offered a clear advantage over conventional meteorological indicators by directly reflecting subsurface water storage changes. This study confirmed the index's sensitivity to both short- and long-term fluctuations and its applicability for operational monitoring. The time series models further enhanced the utility of GRI by providing forecast capabilities that can inform early warning systems and adaptive water management strategies. While SARIMA performed best for medium-range time scales, ARIMA models also proved useful for short-term, less seasonal series. These findings validate the feasibility of using relatively simple, data-driven models in groundwater drought prediction, particularly in data-scarce or resource-limited settings.

From a management perspective, the results support a transition from reactive groundwater governance to proactive, data-informed decision-making. Incorporating GRI-based forecasting models into regional monitoring frameworks can help policymakers identify drought onset early, regulate abstraction rates, and plan targeted interventions such as managed aquifer recharge. Although this study focused on linear models, future research should explore hybrid and machine learning approaches to enhance prediction under increasing environmental uncertainty. The proposed framework can be applied to other vulnerable aquifers in Iran and similar regions worldwide, contributing to broader efforts in sustainable groundwater management and climate adaptation.

Hydrogeochemical Characteristics and Potability Assessment of Urban Springs in Sanandaj as Alternative Resources in Water Crisis Conditions

Document Type: Research Paper

Mehdi Kord^{1*}, Halaleh Rostami² and Mohammad payam Mahmoodi³

1- Assistant Professor, Department of Earth Science, Faculty of Sciences, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2- MSc Graduate in Geochemistry, Department of Earth Science, Faculty of Sciences, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

3- MSc Graduate in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: m.kord@uok.ac.ir

Abstract

Sanandaj city, owing to its topographic variations and unique geological conditions, hosts numerous springs within its residential areas. Recent declines in urban water quality have compelled residents of Sanandaj and its suburban regions to refer to these springs for drinking water. Despite increased reliance, particularly during the COVID-19 pandemic, a comprehensive assessment of the physicochemical and microbial quality of the springs has been lacking. This study aimed to evaluate the hydrogeochemical characteristics and water quality of Sanandaj's urban springs. Following the identification of springs within the city's boundaries, 26 springs were sampled in early autumn 2023. Field physicochemical parameters were measured using a multi-parameter probe, major ions were analyzed via titration, flame photometry, and spectrophotometry, 70 trace elements were determined using ICP-MS, and microbial culture was employed for total coliform measurement. Data were analyzed using statistical and graphical methods and compared against the water quality standards. Results indicated no heavy metal contamination in any spring. While some springs exhibited satisfactory quality, others showed diminished quality and pollution due to geological influences and anthropogenic activities. The key factors contributing to the reduced quality included elevated bicarbonate concentrations, electrical conductivity (EC) exceeding the drinking water standards, and microbial pollution, sometimes accompanied by increased chloride levels. Elevated nitrate and sulfate levels in springs located within residential areas confirmed the impact of urban wastewater.

Keywords: Hydro geochemistry, Microbial Pollution, Residential Areas, Sanandaj Springs, Water Quality.

Introduction

The city of Sanandaj is a mountainous city with an average annual rainfall of 492 mm. However, in recent years, it has faced a water scarcity crisis. In addition to frequent urban water outages during the hot seasons, the sharp decline in urban water quality has forced residents of Sanandaj and its suburbs to refer to springs daily for their drinking water, spending hours in long queues (Figure 1). Another reason driving people to use spring water is the very low quality of urban water and public dissatisfaction with its taste and odor in recent years, to the extent that the people of Sanandaj use spring water as an alternative source for drinking water.

Between 2019 and 2021, when the COVID-19 pandemic occurred, this issue became more acute. Public consumption from Sanandaj's springs is occurring while a comprehensive assessment of the water quality of these springs, in terms of physicochemical and microbiological aspects, has not been conducted. Since this issue is directly related to public health, it increases the necessity of investigating it. This study aims to investigate the quality and evaluate the hydrogeochemical characteristics of springs located within the Sanandaj city area.

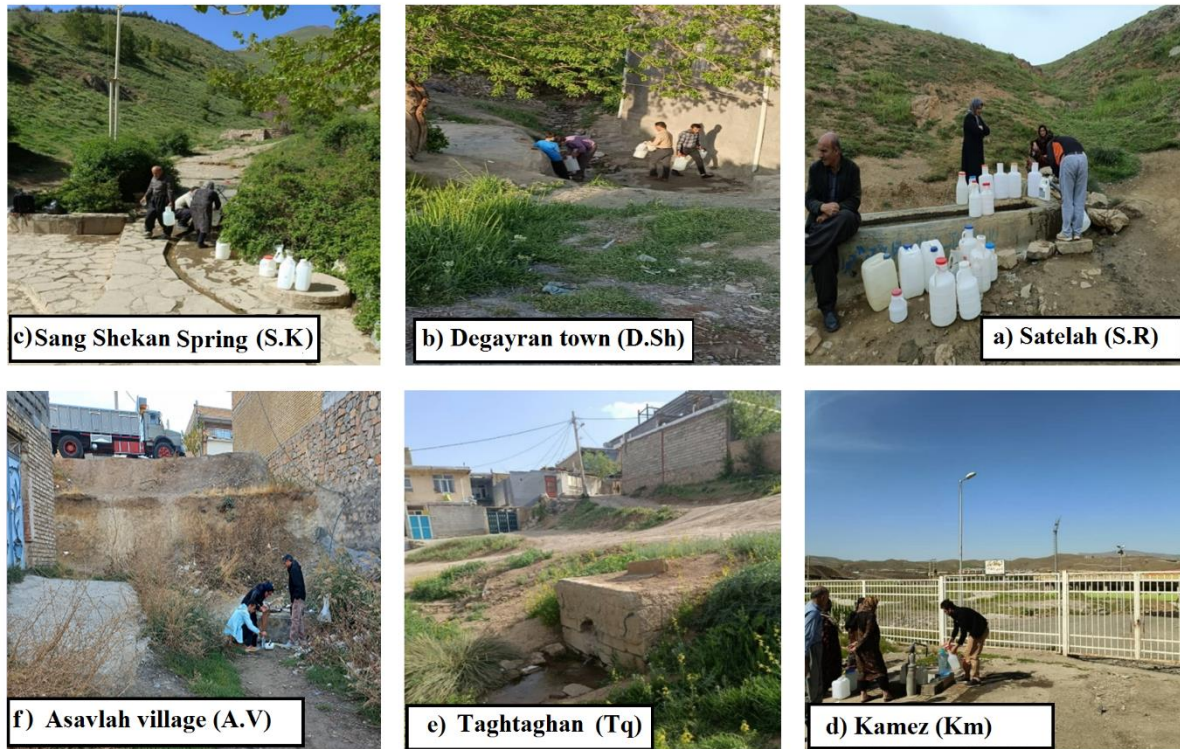


Figure 1 - Public use of springs within the Sanandaj city limits to supply drinking water: a) Satelah Spring, b) Dagayran Spring, c) Kani Sang Shekan, d) Kamiz Spring, e) Taghtaghan Spring, f) Asaveleh Spring.

Materials and Methods

The study area is the city of Sanandaj and its surrounding areas, located between longitudes 46°55'30" to 47°04'30" East and latitudes 35°15'00" to 35°25'00" North.

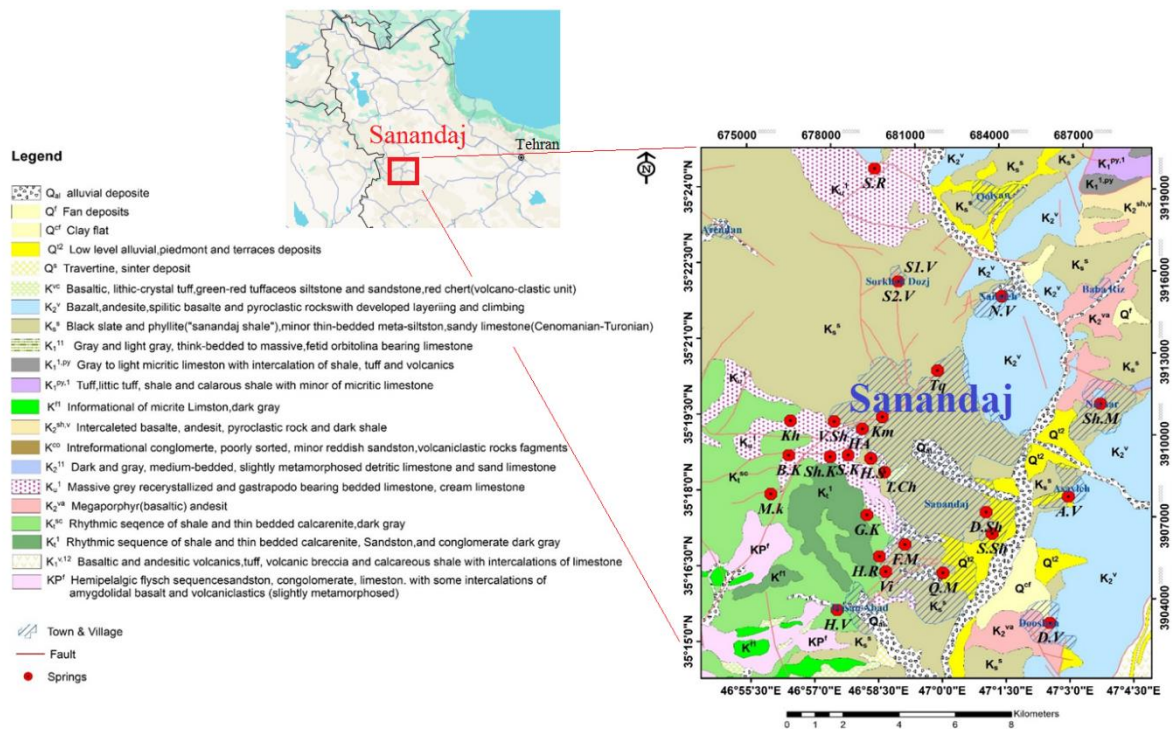


Figure 2 - Location and geological map of the region (taken from the 1:100,000 geological map of Tiztzh and Sanandaj) and the location of the springs.

To conduct this research, samples were collected from 26 springs in the city of Sanandaj in early autumn 2023.

Because the parameters of temperature (T), acidity (pH), electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), and oxidation-reduction potential (Eh) will change over time and under environmental conditions, these parameters were measured at the sampling site using a multi-function device. The prepared samples related to the total coliform analysis were sent to Aria Shimi Sharif Laboratory located in Karaj, and the samples related to the trace element analysis for measuring polluting elements and heavy metals were sent to Azmoon Salamat Asa Company in Tehran. The major cations and anions were also analyzed in the hydrogeochemistry laboratory of the University of Kurdistan. The Na^+ and K^+ cations were evaluated using a flame photometer, and the SO_4^{2-} and NO_3^- anions were evaluated using a spectrophotometer. The Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} anions and Ca^{+2} and Mg^{+2} cations were analyzed by titration. Also, the method for measuring the trace elements was ICP-MS.

Results and Discussion

Based on the results obtained, the springs in the study area were classified into three groups in terms of type and facies. The first group, which includes most of the springs, has a calcium bicarbonate type and facies. The 21 springs in this group are springs 2 (Vi), 3 (F.M), 4 (H.R), 5 (H.V), 7 (H.S), 8 (V.Sh), 9 (HA), 13 (D.V), 14 (A.V), 15 (Sh.M), 16 (N.V), 17 (S.R), 18 (S1.V), 19 (S2.V), 20 (Tq), 21 (Kh), 22 (S.K), 23 (Sh.K), 24 (M.K), 25 (G.K), and 26 (B.K). The second group consists of springs with $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ and $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ compositions, in which the concentrations of calcium, bicarbonate, and sulfate are high, and includes 4 springs: 1 (Q.M), 10 (Km), 11 (S.Sh), and 12 (D.Sh). The third group also has a Na-Cl composition, and the only member of this group is spring number 6 (T.ch).

Piper, Durov, Stiff, Schoeller, and USSL diagrams were used for the graphical analysis. Based on the Piper diagram, springs 1 (Q.M), 10 (Km), and 12 (D.Sh) are located in the mixed water range, and spring 11 (S.Sh) with the dominant SO_4^{2-} ion is located at the top of the Piper diagram diamond, which indicates that the dominant geochemical reaction for these springs is reverse ion exchange, but it should be noted that this is due to the high concentration of sulfate ion in the water of this spring. Due to the fractured nature of the spring and its location in a residential area, the high sulfate content can be attributed to leakage from the sewage. The Tekyeh-vo-Chaman spring is located in the upper right corner of the diagram, which indicates the end of the water cycle, and very saline waters are located in this area. Since the Tekyeh-vo-Chaman spring is located on the Abidar slope, it is close to the recharge area, but due to the deposition of salt and animal manure in the upstream areas, the water of this spring has been affected. The rest of the springs are located in the upper left corner of the diagram, which indicates that these sources are close to the recharge area. The Durov diagram confirms the results of the Piper diagram.

Springs 2 (Vi), 3 (F.M), 4 (H.R), 5 (H.V), 7 (H.S), 8 (V.Sh), 9 (HA), 13 (D.V), 14 (A.V), 15 (Sh.M), 16 (N.V), 17 (S.R), 18 (S1.V), 19 (S2.V), 21 (Kh), 22 (S.K), 23 (Sh.K), 24 (M.K), 25 (G.K), and 26 (B.K) have limestone and dolomite origins, which is consistent with the lithology of the study area. Springs 1 (Q.M), 10 (Km), 11 (S.Sh), 12 (D.Sh), and 20 (Tq) indicate a large amount of sulfate. The Stiff diagram indicates that their rock origin is similar to that of carbonate rocks with a high amount of sulfate. Considering the dominant lithology of the region, which is shale and limestone, as well as the location of the springs in residential areas, it was concluded that this amount of sulfate is of human origin and is due to sewage infiltration.

Spring 6 (T.ch) on the Stiff diagram shows water with a seawater origin; however, considering the lithology of the area, the proximity to the recharge area, as well as comparing the percentage of ions present in the surrounding springs, this amount of salinity can only be explained by the probability of infiltration of salt deposited upstream of the spring.

To examine the suitability for drinking, in addition to using quality standards, the Schoeller diagram is also employed. The Hejab Square spring (H.S), with its high Th (hardness), falls within the Unsuitable range for drinking water, while other springs are classified as Acceptable to Moderate. The Hejab

Square spring is at the end of a recreational valley, downstream of the passage of surface water and wastewater from shops and restrooms.

The USSL diagram was also drawn and examined to assess the qualitative characteristics of the Sanandaj springs for agricultural purposes. Samples number 6 (T.ch) and 7 (H.S) in the USSL diagram fall within the C3S1 range, and other samples fall within the C2S1 range, which indicate good to acceptable and excellent to good quality classes, respectively.

For microbial evaluation of the springs in this research, total coliforms were analyzed. According to the results obtained, springs number 1 (Q.M), 2 (Vi), 3 (F.M), 5 (H.V), 6 (T.ch), 11 (S.Sh), 12 (D.Sh), 13 (D.V), 14 (A.V), 15 (Sh.M), 19 (S2.V), and 20 (Tq) are microbially contaminated and not suitable for drinking. Note that all contaminated springs are located in residential areas. In the village of Sorkheh Dozaj, the reason for the contamination of spring 19 (S2.V) and the non-contamination of spring 18 (S1.V) was attributed to different origins and different flow paths of the spring water from the source to the outlet. The residents of this village also stated that the two springs have different tastes and were dissatisfied with the taste of the water from spring number 19 (S2.V), which is microbially contaminated. The correlation between the distribution of coliform and nitrate indicates their common origin.

In the research conducted, 70 elements present in the spring water were measured using the ICP-MS method. Fortunately, all the springs are free of heavy metal contamination.

Conclusion

The results showed that although none of the springs had heavy metal contamination, unfortunately, some of them were not suitable for drinking in terms of other quality indicators. The springs of Qaradian, Nanaleh village, Hejab Square, Vilashahr, Farooq Azam Mosque, Hassanabad village, Tekyeh-vo-Chaman, Shahrake Saheli, Diagaran, Dushan village, Asavoleh village, Sheikh Rash Mosque, the second spring of Sorkheh Dezaj (Suraza) village, and the Taghtaghan neighborhood fall into this category.

Evaluating the climatic suitability of the Araz River Basin for the cultivating four species of medicinal plants using remote sensing and fuzzy clustering and examining economic analysis based on benefits and costs

Document Type: Research Paper

Marjan Moazamnia¹, Seyed Bahman Mousavi², Sina Sadeghfam³

1- Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, East Azerbaijan, Iran.

2- Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, East Azerbaijan, Iran.

3- Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, East Azerbaijan, Iran.

Corresponding author: m.moazamnia@ubonab.ac.ir

Abstract

Identifying suitable areas for crop cultivation is crucial for sustainable agriculture and the preservation of soil and water resources. This research introduces a framework using various data to compute the climate suitability index for four medicinal plant species: *Capparis spinosa* L, *Mill Rosa damasena*, *Echinacea*, and *Lavandula angustifolia*. The data include climate variables, specifically average annual precipitation and growing season temperature, derived from CHIRPS and ERA5 satellite data. The mentioned climatic requirements for the studied plants were extracted from Agriculture Jihad's publications, and the fuzzy clustering method is employed to calculate the climate suitability index. Investigations showed that *Capparis spinosa* L and *Mill Rosa damasena* exhibit over 75% climate suitability in the eastern half of the basin, while *Echinacea*, and *Lavandula angustifolia* show climate suitability index between 50% and 75% in both eastern and western regions study area. The developed method enhances the analysis by minimizing reliance on expert judgment and quantifying uncertainty. Additionally, the profitability ratio for medicinal plants is estimated as follows: *Lavandula angustifolia* at 12.6 in the fourth year, *Echinacea* at 5.3 from the second year onward, *Mill Rosa damasena* at 1.6 in the fourth year, and 4.4 in the eighth year. Overall, the high benefit-cost ratio and low water requirements indicate significant investment potential in medicinal plant cultivation in the region.

Keywords: CHIRPS, ERA5, FAO, subjectivity, sustainable agriculture, uncertainty.

Introduction

Medicinal plants hold significant importance alongside a variety of agricultural and horticultural crops. These plants have low water requirements and are highly adaptable to water deficit and drought conditions (Das et al., 2016; Harish et al., 2012). Considering that in our country, we are facing a decrease in precipitation and excessive abstraction from surface and groundwater resources, the cultivation of medicinal plants can be considered as an alternative to crops with high water consumption. Among studies investigating climatic factors like precipitation and temperature on medicinal plants, Mirmohammadsadeghi et al. (2019) is noteworthy. In their study aimed at identifying areas suitable for cultivating *Mill Rosa damasena*, researchers selected climatic, topographic, and socio-economic parameters as the key data layers. They employed a network analysis process to assign weights to these layers, ultimately producing mapping that illustrates the potential for *Mill Rosa damasena* cultivation in Isfahan province. The study results indicated that annual precipitation, height, and average temperature were the most significant factors affecting the quantity and quality of this plant species, while slope had the least impact.

Mehrabi et al. (2014) examined the potential for cultivating *Glycyrrhiza glabra* in Arak City by analyzing data on temperature, precipitation, and frost. Their findings indicate the climatic conditions of the region are suitable for effective licorice cultivation. Zhang et al. (2016) examined the potential for cultivating medicinal plants in China using maximum entropy modeling and fuzzy logic. This study

investigated the relationship between environmental factors and medicinal plants by combining fuzzy logic with maximum entropy modeling, utilizing GIS techniques. The results demonstrated the high potential of the study area for cultivating the desired medicinal plants. The study by Pourhadian (2017) examined the potential for cultivating the Echium medicinal plant using climatic data layers, including precipitation, average temperature, maximum temperature, and minimum temperature. The map of Mazandaran province indicates that extensive areas have strong potential for cultivating the medicinal Echium. Sadeghfam et al. (2024b) examine the potential for cultivating 12 species of medicinal plants based on the climate proportion index within the Urmia Lake basin. In the introduced method, an abundance analysis and Particle swarm optimization have been performed to reduce the uncertainty of existing expert opinions. Roopashree et al. (2024) used machine learning algorithms, geographic information systems, and soil information, including soil type and appropriate soil clusters, to preserve medicinal plants from harm and promote their growth in India. These plants are utilized to treat diseases and assist in the discovery of new medicines.

Materials and Methods

Fuzzy Clustering Method (FCM)

FCM is a widely used technique in data analysis and machine learning that classifies data into clusters, taking uncertainty into account. Dunn and Bezdek created this technique in the early 1980s, based on the principle that data can belong to multiple clusters, utilizing soft rather than hard allocation. This process includes several steps: 1. Initialization: Choose the number of clusters and initialize their centers. 2. Membership Function Calculation: For each data point, a membership function is computed that indicates the probability of that point belonging to each cluster, allowing for varying probabilities across multiple clusters. 3. Updating cluster centers involves calculating them based on membership functions to minimize the following objective function (Bezdek 2013):

$$Obj. Func. = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m D_{ij}^2 \quad (1)$$

Where n is the number of data, C is the number of clusters, m is the fuzzy partition matrix that adjusts the amount of fuzzy overlap, D_{ij} is the distance of data j from cluster i ; μ_{ij} is the membership degree of data j in cluster i .

4. Iteration: Repeat steps 2 and 3 until the cluster centers and membership functions stabilize. In this study, Fuzzy clustering is used to determine Climate Suitability Index (CSI), and the uncertainty is examined by assessing the degree of non-membership within the selected cluster.

Results and Discussion

Potential of medicinal plant cultivation

Figure 1(a) illustrates the spatial distribution of the cultivation potential for Capparis spinosa L from a climatic perspective. This includes the necessary annual precipitation and the temperature requirements during the growth period. In this context, the term "crop potential from a climatic perspective" will be referred to as "climatic suitability." The results presented in this figure were obtained using the fuzzy clustering method. According to the figure, the eastern half of the basin demonstrates a higher potential for cultivation compared to the western half.

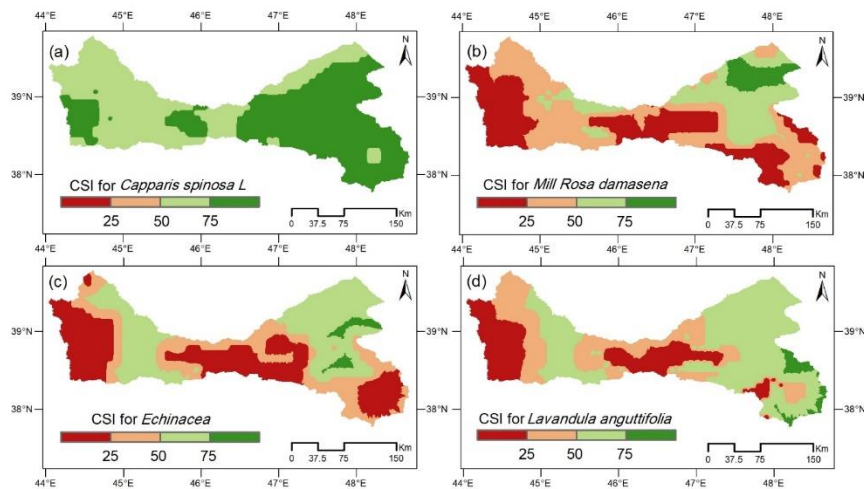


Figure 1- Climatic potential of cultivation based on fuzzy clustering method for (a) *Capparis spinosa* L, (b) *Mill Rosa damasena*, (c) *Echinacea*, (d) and *Lavandula angustifolia*.

Figure 1(b) shows the spatial distribution of climatic suitability (including annual rainfall and growing season temperature) of *Mill Rosa damasena* based on the fuzzy clustering method. According to this figure, in the eastern half, the cultivation potential is between 50 and 75 percent, and in the western half, the highest cultivation potential varies in the range of 25 to 50 percent. Figure 5(b) shows the uncertainty of the climatic suitability classification, which according to this figure, the uncertainty is lower in the eastern half than in the western half.

Figure 1(c) illustrates the spatial distribution of climatic suitability for *Echinacea*, which is determined by factors such as annual precipitation and growing season temperature using the fuzzy clustering method. The results indicate that in the eastern half of the area, climatic suitability exceeds 50%. In contrast, the western half exhibits even higher climatic suitability, also surpassing 50%. Figure 5(c) presents the uncertainty of climatic suitability classes, showing that this uncertainty is lower in the eastern half compared to the western half.

Figure 1(d) illustrates the climatic suitability for *Lavandula angustifolia* based on annual precipitation and growing season temperature, as determined by the fuzzy clustering method. The figure indicates that a significant portion of the basin areas in the eastern half of the plain falls within the above 50% suitability class, while the western half also demonstrates suitability in the upper 50% range. Additionally, Figure 5(d) presents the uncertainty associated with the climatic suitability classifications, revealing that the uncertainty in the western half is lower than that in the eastern half.

Conclusion

This study evaluates the climatic suitability of medicinal plants such as *Capparis spinosa* L., *Rosa damascena*, *Echinacea*, and *Lavandula angustifolia* in the Araz watershed area. The aim is to identify regions that are suitable for investment in the production of these plants. The climatic variables considered include annual rainfall and temperature during the growing period. All climatic data have been obtained from satellite observations. For the necessary rainfall amounts, duration of the growing period, and required temperatures during this time, recommendations from Agriculture jahad's publications have been utilized.

Social, economic, and environmental factors all play a crucial role in developing a comprehensive index for assessing plant cultivation. When evaluating the potential for plant cultivation, economic considerations such as market demand are vital in determining which species should be prioritized for further investigation. By understanding the economic significance of these plants, policymakers can make informed decisions about resource allocation. From an ecological standpoint, it is essential to recognize the potential impact of introduced plant species on native species and ecosystems. Some plants may behave invasively, compete with native species, and disrupt the ecological balance. Therefore, carefully assessing the potential invasiveness of a plant is critical for conserving biodiversity and

ensuring the sustainability of an area. Another important environmental aspect to consider in plant assessments is soil quality and texture. Soil properties can significantly influence the growth and survival of plants, affecting their overall suitability for a given environment. By examining soil conditions, researchers can better understand the constraints and opportunities for various plant species in a habitat, leading to a more thorough and accurate assessment. Future studies should explore the impact of climate change on medicinal plant cultivation and emphasize the integration of social, economic, and environmental dimensions in these assessments.

Quality assessment of surface water using (NSFWQI) and (IRWQIsc) indices in Kashkan River of Lorestan

Document Type: Research Paper

Narges Ghalavand¹, Artimes Ghassemi Dehnavi^{2*}, Zeinab Ahmadnezhad³

1- MSc in Environmental Geology, Faculty of Sciences, University of Lorestan, Khorramabad, Lorestan, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Sciences, University of Lorestan, Khorramabad, Lorestan, Iran.

3- Ph.D. in Hydrogeology, Faculty of Sciences, University of Lorestan, Khorramabad, Lorestan, Iran.

*Corresponding author: Ghassemi.a@lu.ac.ir

Abstract

Rivers in case of entry Urban, industrial and agricultural wastewater can be among the most vulnerable water sources. One method of investigating the quality of surface water is the quality and pollution indices, as a single number without dimension, and each number is an interpretation of characteristics of water quality. The basin of the Kashkan River in Lorestan province is the main source of the Karkheh River. In this research, samplin was done three times (wet seasons and dry season) to assess the quality of Kashkan River pollution. Physical parameters including fecal coliform (total and fecal) and chemical parameters (EC, BOD, COD, PO₄, NO₃, P, pH and NTU) were tested in the laboratory. The results were analyzed by NSFWQI, IRWQI and statistical methods. The results of the NSF index show that in the three sampling periods, the majority of the stations are in the middle category (with a number between 50-70). Also, the results of the IRWQI index indicate that the sampling stations are in the range of relatively good with relatively bad class (with a number between 30 and 70) and are often in good and moderate class. The results of this research show that the water of Kashkan River is suitable for agriculture, and in some stations, it is in unsuitable conditions in terms of phosphate level. The factors determined by the factor analysis indicate the presence of earth (natural) and man-made pollution in the region, and it is important to take necessary solutions to better control the river water quality.

Keywords: Ashkan, Index, pollution, surface water.

Introduction

Rivers are considered as the main sources of water supply for humans and other animals (Jaafari et al., 2010) and also the most important vital sources of water supply for seas, lakes, and in the most cases of water transfer and distribution for industry, agriculture and urban parts (Rafii et al., 2020). Different methods for analyzing surface water quality information and their quality classification have been studied worldwide (Asghari and Mohebi, 2016; Nadiri and Sedghi, 2019) among which the use of "standards" and "surface water quality indices" is one of the most widely used and simple methods (Asadollah fardi et al, 2004; Kalantari et al, 2014). The object of this research is to investigate the quality of Kashkan river stations using quality indices and available standards. Kashkan basin is located in the middle of the Zagros mountain range, and covers about one third of Lorestan province (Lashni Zand, 1997).

Materials and Methods

In this study, the number of sampling stations on the river were selected in order to investigate the quality of the Kashkan River (investigation of quality-pollution indices). The number of samplings was done in three times, one time was considered as a reference. After sampling, the physical and chemical parameters for quality indices were tested. These parameters included: dissolved oxygen factor, biochemical oxygen demand, phosphate, nitrate, turbidity, total dissolved solids, temperature, pH, acidity, total coliform and EC were measured in the sampling stations. Discharge (by water flow meter)

and T were measured at the sampling site and other parameters were transferred to the laboratory for measurement. In this research, statistical methods using SPSS and Excel software were used to analyze the results. The quality classification of river water was evaluated based on NSFQI and IRWQIsc indices. Also, water quality zoning of Kashkan river was done using quality and pollution indices using GIS.

Results and Discussion

In the second (dry season) and third (wet season) sampling time, the discharge was measured at the sampling stations by water flow meter. In the second sampling, the highest discharge measured at the Visayan station was recorded as $3.69 \text{ m}^3/\text{s}$ and the lowest discharge was recorded as $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ at the Mashureh dam station (Table 2). According to Table 2, in the third sampling, the highest discharge is related to station 9 (Poldokhtar) with a value of $20.2 \text{ m}^3/\text{s}$ and the lowest discharge is related to station 1 (Kakareza Dam) with a value of $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

In all stations, according to the value of the water quality index (NSFWQI indices), which are in the range of 50-70, the water quality is in the moderate group and is shown in yellow color. Thus if this water is used to provide drinking water, it needs advanced treatment. In terms of NSFQI quality index, in the second sampling at Kakareza station is in the good category, Chamtagheleh Olya, Mashureh Dam, Cham Pelk, Afrineh and Poldokhtar stations are in the moderate category and Cham Anjir stations, Doab Visayan and Visayan are in bad category. According to the NSFQI index, the water quality in the third sampling at the first station (Kakareza Dam) is in good condition and other sampling stations are in a middle condition (Water quality at station 5 (Cham Anjir) is moderate to good).

In terms of the IRWQIsc index, sampling stations 1, 3, 4 and 7 (Shah Qoli spring, Cham Pelk, Kashkan Bridge and Poldokhtar) are in relatively good condition and stations 2, 5, 6 and 8 (Chamtagheleh Olya, Visayan), Afrineh and Lower Cham-Mehr are in a middle condition. In terms of IRWQIsc index, water quality in stations 1, 2, 3 and 4 (Kakareza Dam, Chamtagheleh Olya, mashoureh dam and Cham Pelk) is in a relatively good condition, stations 8 and 9 (Afrineh and Poldokhtar) are in a moderate condition, the station 5 (Cham Anjir) is in a relatively bad condition and stations 6 and 7 (Visayan Doab and Visayan) are in a bad condition. In the third sampling, water quality has been classified into three categories based on the IRWQI index. In stations 1, 3 and 4 (kakareza dam, mashure dam and Cham Pelk) the water quality is relatively good and in stations 5, 6 and 7 (Cham Anjir, Visayan Doab and Visayan) the quality of water is in moderate and in stations 2, 8 and 9 (Chamtagheleh Olya, Afrineh and Poldakhter) the quality of water is relatively bad in terms of the IRWQI index. In order to assess the water condition of the Kashkan River, the analysis parameters were compared with the standards in three sampling times. The results of the turbidity test in terms of quality standards (WHO) in the first, second and third sampling periods of most stations are in the permissible limit and in the rest of the samples it is above the permissible limit. From the point of view of agriculture, all the samples are in the permissible limit of Iran's national standard.

Also, according to the river water standard, the amount of phosphate in most of the sampling stations is higher than the permissible limit (0.7 mg/liter) and the sampling stations are in unsuitable conditions in terms of phosphate parameter. Based on the standard of surface water and different uses of fecal coliform in the sampling of three times of bacterial contamination, they are placed in categories 1 and 2, and bacterial contamination requires disinfection and successive purification methods (coagulation, filtering and disinfection). Through statistical analysis and determination of effective factors in the region, it was determined that they are the main factors affecting the quality of the river. In the first factor, calcium, magnesium, sulfate, sodium, chloride, TDS, EC have a high and strong correlation. In the second factor, there is a high correlation between bicarbonate and pH, and in the third factor, there

is a high correlation between carbonate and temperature. The first factor can indicate the presence of dissolution and weathering process in the region and the effect of natural factors on the water quality of Kashkan River.

Conclusions

As a general conclusion, the first step in determining the quality of river water is to gain knowledge about the quality changes of river water in terms of time and space, as well as to identify the main sources and types of water pollutants. Therefore, the qualitative investigation of the Kashkan river using indices and statistical methods showed that the quality of the river water is generally in the moderate category, and in the wet season with the increase of precipitation, the quality of the river is in a better condition compared to the total volume of the river due to decrease the suspended solids and substances. Besides in the dry season, the decrease in discharge and the increase in agricultural activities, as well as the increase in the amount of solids compared to the volume of the river water, cause a decrease in the quality of the river water. The effect of dissolution and weathering of carbonate formations and the presence of phosphate-containing formations in the region indicate the influence of geological (natural) factors on the water quality of the Kashkan River. Furthermore, the use of chemical fertilizers and various pesticides in the lands along the river and the wastewater from the use of detergents in residential areas, has caused the impact of man-made factors on the quality of the river, which requires necessary measures to control this pollution. Also, the water quality of Kashkan river in terms of bacterial contamination needs successive disinfection and purification methods (coagulation, filtration and disinfection), thus this should be considered important in making decisions for specific purposes.

Estimating the Subsidence of Ghorveh Plain Using GARDLIF-SD Index and Radar Images

Document Type: Research Paper

Mina Rahimi¹, Mehri Kaki², Farrokh Asadzadeh³, Vahid Rezaverdinejad^{*4}

1- Ph.D. of Water Engineering, Department of Water Engineering, Agricultural Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

2- M.Sc. Water Resources Management, Department of Water Engineering, Agricultural Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Professor of Soil Science Engineering, Agricultural Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

4- Professor of Water Engineering, Agricultural Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

* Corresponding author: v.verdinejad@urmia.ac.ir

Abstract

Subsidence is a geomorphological hazard influenced by hydrological and hydrogeological factors, with its impacts being more severe in arid and semi-arid regions. This study employed the GARDLIF-SD model to evaluate subsidence vulnerability in the Ghorveh Plain. The model integrates several input parameters: groundwater level (G), aquifer media (A), net recharge (R), pumping discharge (D), land use (L), aquifer thickness (I), distance from faults (F), slope (S), and distance from rivers (D). After preparing and ranking the relevant layers, a subsidence vulnerability map was generated and classified into three categories: medium, high, and very high. To validate the map, field observations and a subsidence rate map derived from Sentinel-1 radar imagery were utilized. The radar-based subsidence values, recorded between 2017 and 2023, ranged from 200 mm to 1043 mm. The results showed that 61.58% of the Ghorveh Plain lies within high and very high vulnerability zones. Among the parameters, distance from faults had the least influence, while groundwater level and land use had the most significant impact. Field inspections also confirmed active subsidence through observed cracks and groundwater fluctuations in piezometers. The findings highlight excessive groundwater extraction as the main driver of land subsidence in the region. Therefore, effective groundwater management and continuous monitoring are essential for mitigating further subsidence.

Keywords: Groundwater, Radar interferometry, Sentinel-1, Subsidence, Vulnerability.

Introduction

Water is a vital resource, more crucial than ever, and its preservation, along with the optimal, economical, and fair use of these resources, has become a comprehensive global challenge (Shayan et al., 2015). The limitations of water resources, coupled with factors such as population growth, reduced rainfall, increased water consumption, prolonged droughts, and deteriorating water quality, pose significant challenges. These issues are particularly relevant in countries like Iran, which are located in arid and semi-arid regions (Akbari Erimi et al., 2018). Due to limited access to surface water in many areas, groundwater resources are used for various purposes, including agriculture, drinking, and industry.

Subsidence, often referred to as a "silent earthquake," is a geological hazard caused by multiple factors (Park et al., 2014). As groundwater levels fluctuate, the compaction of earth layers reduces the permeability and storage capacity of the aquifer. Therefore, the primary cause of subsidence in arid and semi-arid regions is the lowering of groundwater tables due to excessive water extraction from these resources (Pacheco et al., 2006). The global risk of land subsidence began to rise between 1950 and 1970, coinciding with industrialization and urbanization in various parts of the world. Subsidence typically occurs at rates of 1 to 10 cm for every meter of groundwater level decline (Akbari Erimi et al., 2018). In Iran, subsidence was first reported in 1967 in the Rafsanjan Plain, where groundwater level drops of 5 to 15 cm per meter were observed (Abbasnejad, 1998).

Various methods have been employed by researchers to calculate subsidence, including radar interferometry (DInSAR), machine learning techniques, and potential vulnerability weighting indices. Given the significant impact of subsidence on regions around the world, particularly in the plains of Iran, it is essential to identify areas at risk of subsidence, implement proper aquifer management, and either prevent subsidence or take special measures to mitigate its effects.

Ghorveh Plain, located in the eastern part of Kurdistan Province, is one such area facing significant challenges. Due to excessive groundwater extraction and declining rainfall in the watershed, the balance of its groundwater resources has been negative since 2014. Despite efforts by local managers, the situation has not improved, and the groundwater balance remains negative. In this context, this research aims to estimate the subsidence vulnerability of Ghorveh Plain by modifying the GARDLIF index and incorporating additional important parameters, such as slope and distance from the river.

Materials and Methods

Study Area

The study area is Ghorveh Plain, with a 1065.31 km² area in the east of Kurdistan province, with a longitude of 30° 47 to 00° 48 and a latitude of 30° 35 to 50° 34 (Figure 1).

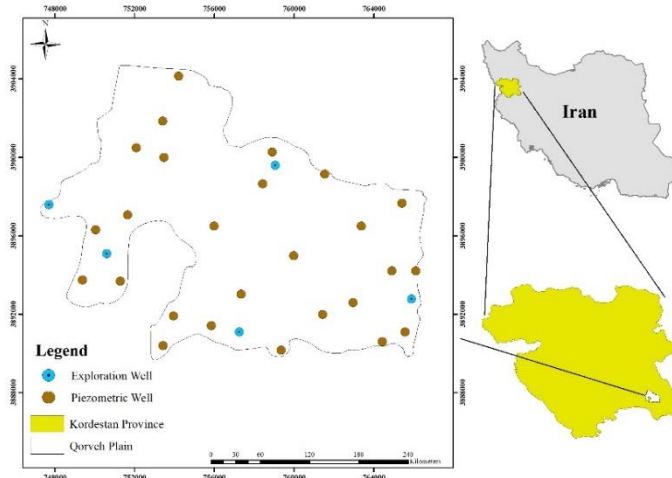


Figure 1- Location of Ghorveh watershed at Kordestan province and Iran.

GARDLIF-SD subsidence vulnerability model

Subsidence is influenced by various factors, including human activities and geological conditions (Nadri et al., 2017). The GARDLIF framework comprises seven hydrogeological parameters: annual groundwater level fluctuation (G), aquifer media (A), net recharge (R), pumping discharge (D), land use (L), aquifer thickness (I), and distance from faults (F) (Nadri et al., 2017). In this method, each parameter is assigned a rank and a weight based on its significance. The rank values range from 1 to 10, with 1 indicating the lowest risk of subsidence and 10 indicating the highest. Weights ranging from 1 to 5 are assigned according to the relative importance of each parameter in comparison to the others.

In addition to the original GARDLIF parameters, slope and distance from the river are recognized as critical factors influencing subsidence. Low slope areas allow more surface water infiltration, while in high slope areas, water quickly runs off and has less chance to recharge the aquifer. Rivers, as key contributors to groundwater recharge, also play a vital role: the farther an area is from a river, the lower its groundwater recharge potential, and vice versa.

Given the significance of these two additional parameters, this study incorporates slope and distance from rivers into the original GARDLIF model to enhance its predictive accuracy. The modified model, referred to as GARDLIF-SD, is employed to assess subsidence vulnerability. The GARDLIF-SD index is calculated by applying weighted values to all parameters, as shown in Equation 1 (Nadri et al., 2017).

$$GI = G_r G_w + A_r A_w + R_r R_w + D_r D_w + L_r L_w + I_r I_w + F_r F_w + S_r S_w + D_r D_w \quad (1)$$

Where GI is the vulnerability index, uppercase letters represent the model parameters, r is the rank, and w is the weight assigned to each parameter. By calculating the GI index, areas vulnerable to subsidence can be identified. The high rate of this index means a high probability of subsidence.

Table 1- The weights assigned to the parameters of the GARDLIF-SD model.

Parameters	Weight
Groundwater down-up (G)	5
Aquifer media (A)	4
Net recharge (R)	2
Aquifer Drainage (D)	4
Land use (L)	5
Aquifer thickness (I)	3
Distance to fault (F)	1
Slope (S)	3
Distance to river (D)	3

Radar interferometry

In this study, Sentinel-1 radar images were utilized to assess land subsidence. Eight images, captured between November 15, 2017, and October 1, 2023, from the C-band of the Sentinel-1A satellite, were processed using SNAP 9 software. The SBAS (Small Baseline Subset) method was employed for image interpolation, which uses only image pairs with short spatial and temporal baselines to ensure accurate processing. This method also minimizes topographic errors and noise.

Subsidence data for the Ghorveh Plain were generated through automated processing using Python-based open-source scripts compatible with SNAP. The resulting subsidence map was then compared with the vulnerability zoning map produced using the GARDLIF-SD framework.

Results and Discussion

The subsidence vulnerability map of Ghorveh Plain was classified into three categories: medium, high, and very high vulnerability. The results indicated that 24.78% of the plain falls within the high vulnerability class, while 36.80% is classified as very high. The primary factors contributing to this high vulnerability include the widespread presence of agricultural lands, intensive groundwater extraction—particularly for agricultural use—and the composition of the aquifer, which predominantly consists of clay materials.

The findings also revealed a significant risk of subsidence in areas surrounding the cities of Ghorveh and Sirish-Abad, located at the center of the plain. Field visits confirmed the presence of subsidence around several piezometers, including those in Gale, Divzand, and Serishabad, as well as in the vicinity of Veihaj Dam. Based on radar interferometry analysis, the measured subsidence in the Ghorveh Plain ranged from 200 to 1043 millimeters.

Conclusions

Ghorveh Plain is situated in an arid to semi-arid region, and due to its low average annual rainfall and limited access to surface water resources, it is heavily reliant on groundwater. Groundwater serves as the primary source for both drinking water and agricultural activities in this area. In the present study, the GARDLIF-SD framework was employed to identify and assess areas vulnerable to land subsidence within Ghorveh Plain. The resulting vulnerability map revealed that 61.58% of the area is classified as having high or very high vulnerability to subsidence.

Radar interferometry analysis indicated that between 2017 and 2023, subsidence levels ranged from 200 mm to 1043 mm. Over time, such levels of ground deformation can severely damage infrastructure, including buildings, artificial recharge dams, and agricultural lands, leading to significant and often irreversible consequences. The designation of Ghorveh Plain as a “forbidden plain” and its ongoing negative groundwater balance further underscore the severity of the situation.

Field observations also confirmed subsidence through the detection of cracks in dam structures and settling around piezometers. The highest rates of subsidence were found to correspond with irrigated

agricultural zones in the eastern and western parts of the plain, indicating that the expansion of irrigated farming and excessive groundwater extraction are the primary drivers of this phenomenon.

Therefore, it is recommended that water managers and policymakers adopt stricter controls on groundwater usage. This includes the installation of smart volumetric monitoring devices, stricter regulation and enforcement against unauthorized wells, and the preparation of a comprehensive land-use inventory to distinguish between rainfed and irrigated lands. Moreover, identifying suitable crop patterns could support sustainable water use and help mitigate the risk of further subsidence.

Evaluation of crest raising methods for the Mazraeh copper mine tailings dam, Ahar, and proposal of an optimal design

Document Type: Research Paper

Ghodrat Barzegari ^{*1}, Ata Allah Nadiri ², Amir hassan Rezaei Farei ³

1- Associate Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

*Corresponding author: gbarzegari@tabrizu.ac.ir

Abstract

Tailings dams are structures used to store tailings from mineral and industrial processing. These dams play a vital role in controlling pollution and reducing the environmental impacts of mining activities. Generally, these dams are not built to their final level all at once and in one stage, but rather, as the extraction process progresses and the resulting tailings are produced, the height of these dams increases in stages. The Mazraeh copper mine tailings dam is a rockfill dam with a reservoir capacity of about 550,000 cubic meters, located in East-Azerbaijan province, 18 kilometers north of Ahar city and on the eastern side of the Shiver intrusive masses. The current level of the tailings dam after first construction and two stages of raising elevation is 2085 (meters above sea level) and about 50 meters above the bed, and the third stage of raising is currently being designed and is under construction to a height of 2095 meters. This dam is built on granite bedrock and the weathering of the rock mass at the surface and along the joints is assessed as low to moderate. The quality index of the rock mass up to a depth of 20 meters from the ground surface is very poor to poor and at greater depths it is moderate to excellent. In this paper, the variants for raising the dam crest level from 2085 to 2095 are examined and then, based on the results obtained and the existing limitations, the proposed option is selected and designed using Slope/W, Sigma/W and Plaxis software. Based on the results obtained, the use of upstream methods is an economical and risky option, the downstream option is uneconomical but safe, and the center-facing option is intermediate. Therefore, due to existing limitations and short-term operation period (about 10 years), the use of a combined method of the 5m centerline followed by 5m upstream method was proposed. The design results showed that the downstream slope in this case needs to be reduced from 1v:1.6h at the current state, to 1v:1.75h. The vertical displacement after the raising completion was estimated to be about 54 to 60 cm. For the closure and abandonment stage of the study tailings dam, it is recommended to reduce the downstream slope of the dam body and ensure that the tailings are consolidated and dried inside the reservoir (to prevent possible liquefaction).

Keywords: Dam design, Mazraeh tailings dam, Numerical modeling, Rockfill dam, Tailing dam closure.

Introduction

Tailings dams are among the largest engineered structures constructed by geotechnical engineers. Globally, failures of these structures have led to severe environmental contamination and significant loss of life, while the mechanisms governing their collapse remain insufficiently understood (Mendoza et al., 2006). Each tailings dam is site-specific and represents a unique structure requiring customized design; therefore, conventional standardized designs cannot be directly applied to their construction (Morgenstern et al., 2016). Construction of tailing dams generally begins with an initial starter dam, which serves as the foundation and is subsequently raised incrementally during the mine's operational life (Edraki et al., 2014). In principle, two types of earth structures are employed for tailings storage and retention: retention dams and raisable embankments. Retention dams are usually built to their final

height prior to mine operation, whereas raisable embankments are progressively constructed in stages using upstream, downstream, or centerline methods concurrent with mining activities and based on storage requirements (Vick, 1990; EPA, 1994). Among these, upstream dams are more susceptible to failure, while downstream and centerline dams generally provide greater stability (Lyu et al., 2019).

The total number of tailings storage facilities (TSFs) constructed worldwide is estimated at approximately 30,000 (WMTF, 2020). Across 18,000 reported mines worldwide, the failure rate of tailings dams over the past century is estimated at 2.1%, compared with only 0.01% for water storage dams (ICOLD, 2001). The current failure rate of large tailings dams is estimated at 2–5 incidents per year, which is significantly higher than the failure frequency of water retention dams, roughly one in 10,000 (Davies, 2001). Several factors contribute to the greater vulnerability of tailings dams compared with other types of water storage structures (Rico et al., 2008): (1) embankments constructed from soil, mine tailings, or overburden material; (2) dams storing large volumes of saturated tailings and precipitation water, raised progressively in stages; (3) insufficient regulations and design standards; (4) lack of strict requirements for maintaining dam stability, including continuous monitoring and supervision during both construction and operation; (5) high costs of post-closure maintenance; and (6) limited direct economic benefits for mining companies, which often leads to underestimating their economic and environmental importance (Niekerk and Viljoen, 2005). At least 3,500 tailings dams currently exist worldwide (Martin and Davies, 2000), with surface areas ranging from a few hectares to several thousand hectares (Davies et al., 2000; Lotter Moser, 2007).

Approximately 76% of global incidents involve upstream tailings dams. According to ICOLD, 51% of reported failures are attributed to slope instability caused by excessive stresses in foundations, dam bodies, and elevated pore water pressures (ICOLD, 2001). Moreover, floods and intensified rainfall patterns have been identified as primary triggers of these failures. The key factors governing tailings dam instability include static failure, seepage (internal erosion), overtopping, seismic instability, structural and foundation deficiencies, and, most critically, the position of the phreatic line (UNEP, 1994). The phreatic surface plays a fundamental role in failures associated with overtopping and seepage (Lei et al., 2022). Slope stability, earthquakes, and overtopping represent the three principal causes of dam failure; mitigating these risks requires drainage systems, advanced engineering analyses, instrumentation, continuous monitoring, inspection, and performance evaluations of comparable dams (Stark et al., 2022).

In this study, in addition to reviewing the existing literature and highlighting the significance of the subject, the advantages and disadvantages of various methods for raising the crest elevation of the Mazraeh copper mine tailings dam by approximately 10 meters are evaluated. Based on the specific constraints of the project, a suitable method has been proposed and designed through numerical modeling, along with recommendations for the closure phase of the dam. This research is distinguished from previous technical studies in the field by its innovative approach. The findings of this work are expected to contribute significantly to the advancement of knowledge, practical experience, and the improvement of study and design practices for this class of dams.

Materials and Methods

Mazraeh Tailings Dam Specification

The tailings dam of the Mazraeh copper mine is located in East Azerbaijan Province, approximately 18 km north of Ahar city, on the southern slopes of the Sheyvar Mountains. The primary purpose of constructing and raising this tailings dam is to collect and store the effluents and tailings generated by the concentrator plants of the Mazraeh and Sungun copper mines. The dam body has been constructed using gravelly materials with varying gradations, including zones 3A, 3B, and 3B1 (from coarse to coarser), along with filter (2A) and drainage (2B) materials to ensure proper internal drainage within the dam structure.

Engineering Geology of Dam Site

The Mazraeh tailings dam site is located entirely within the southeastern part of the volcanic rocks of Oligocene age, known as the Sheyvar intrusive body. The petrographic composition of the Sheyvar intrusion varies according to its extent and distribution, however, at the Mazraeh dam site, it is predominantly granitic in composition. The study tailing dam has been constructed across the main drainage channel, which ultimately joins the Mazraeh-Chai River downstream. In the downstream area, adjacent to the beds of the main and secondary channels, Quaternary elastic sediments derived from the erosion of granitic rocks have been deposited as thin, unconsolidated alluvial layers. These deposits mainly consist of colluvial materials, slope-wash sediments, and fluvial deposits. In the upstream reservoir area, loose rock blocks, formed as a result of weathering and erosion of the surrounding rock mass, are observed along the slopes, reflecting ongoing slope instability and mass movement processes.

To carry out subsurface studies during the first raising stage of the tailings dam, five exploratory boreholes were drilled along the dam axis. Based on the results obtained, the Rock Quality Designation (RQD) at the right abutment is classified as very good to excellent. At the foundation and left abutment, the RQD is very poor to poor down to a depth of 20 m; however, the rock quality improves with depth, reaching moderate to excellent levels.

Engineering classification of the rock mass, using the geomechanical RMR and Q systems, indicates fair to good rock quality in general, while some sections show lower to fair quality. The Geological Strength Index (GSI) for the granitic unit ranges from 50 to 60, decreasing to 35–45 in altered zones and further to 20–25 in fractured and faulted zones. The most critical seismic scenario for the project area is associated with the Qaleh Juq fault, which exhibits a maximum seismic potential of 6.6 Ms and is characterized as a compressional fault. This fault is located near the dam site, at a surface distance of approximately 2 km (Toossab Consulting Engineers Company, 2018).

Tailings Dam Raising Methods

Tailings dams are typically constructed using natural materials and compacted aggregates obtained either from the excavation of mine waste or from designated borrow sources. There are three primary methods for raising tailings dams: upstream, downstream, and centerline. The selection of a particular method depends on technical and economic considerations, with each method associated with a distinct level of risk. The upstream method, considered the most economical and fastest, involves constructing successive embankments on top of previously deposited, compacted tailings within the reservoir. However, it presents the highest risk of failure due to potential liquefaction during seismic events. The downstream method emphasizes stability by constructing each successive raise on the downstream slope of the previous embankment. The centerline method represents a compromise between upstream and downstream approaches in terms of cost and material requirements. The selection of a raising method must carefully consider tailings characteristics, foundation conditions, planned raising height, and long-term operational requirements.

Results and Discussion

In this study, six different raising scenarios were evaluated to determine the most suitable method including; 10 m upstream raise, 10 m downstream raise, 10 m centerline raise, 5 m centerline followed by 5 m upstream raise, 5 m upstream followed by 5 m downstream raise, and 5 m downstream followed by 5 m upstream raise. The advantages and disadvantages of each scenario were analyzed in terms of technical feasibility, stability under static and seismic loads, construction cost, material requirements, and operational considerations. Although the downstream raising method requires a larger volume of embankment materials, higher construction costs, and longer execution time, it is considered a more reliable approach for raising tailings dams, particularly in seismically active regions. For this reason, downstream raising is often the preferred and first-choice method among designers and engineers in the field. However, in some cases, operational constraints may prevent the use of this method. The specific limitations in the current project are the limited space at the downstream, limited reservoir capacity and the volume of embankment materials required. The assessment of different raising scenarios indicates that using the upstream method for the full 10 m raise requires a lower construction volume. However,

considering the seismicity of the region and the need to maintain maximum reservoir capacity, this option is not prioritized. On the other hand, although the downstream method provides higher reliability and safety and is technically the most favorable, it was not selected as the preferred option due to the limited available land on the project site. Therefore, the combination of a 5 m centerline raise followed by a 5 m upstream raise is considered the optimal method for the current stage of raising the Mazraeh tailings dam to a total of 10 m, up to elevation 2095 m. This approach offers a reduced construction volume and minimizes downstream displacement of the dam toe, while taking into account the site constraints and the relatively short operational period of approximately 10 years. By balancing technical feasibility, safety, and operational limitations, this method provides the most practical and efficient solution for the dam raising at this stage.

For the design of the dam body, stability analyses of both downstream and upstream slopes were conducted using Geo-Studio Slope/W, while stress-strain behavior was evaluated with Geo-Studio Sigma/W and Plaxis. To maintain consistency and uniformity, the materials selected for this stage of raising the dam were similar to those used in the existing tailings dam body. Slope stability was assessed under static loading as well as seismic forces through pseudo-static analyses at different stages: post-construction, during operation, and at closure. In the pseudo-static analyses, seismic coefficients corresponding to various return periods were applied to the dam body. The results demonstrated that adequate factors of safety were maintained for the stability of the dam. Based on the analyses, the maximum cumulative vertical displacement at the dam crest after raising to elevation 2095 m was estimated to be approximately 54 to 60 cm. A comparison of the stress-strain results obtained from Sigma/W and Plaxis showed good agreement, confirming the reliability of the numerical modeling approaches.

Conclusions

In this study, the raising of the Mazraeh tailings dam by 10 m, to achieve a crest elevation of 2095 m, was investigated to increase the capacity of the existing reservoir. Preliminary site investigations, including engineering geology, geotechnical assessments, and regional seismicity studies, were conducted to support the design. Different raising options were then evaluated and compared based on various criteria, such as site constraints, limited downstream space, and the required volume of embankment materials. Although the upstream method involves lower construction volume and shorter execution time, it is not recommended due to the seismicity of the region. The downstream method, despite providing higher reliability and safety, was not prioritized because of the limited space available downstream within the mine. Considering the relatively short planned operational period of approximately 10 years, a combined raising strategy 5 m using the centerline method followed by 5 m using the upstream method was proposed as the optimal solution. This approach demonstrates the importance of carefully planning tailings dam location and auxiliary structures with future raising stages in mind, in order to minimize site constraints and avoid additional costs.

It is recommended that, during the closure stage of the Mazraeh tailings dam, due to the reduced need for the downstream seepage collection sump and the availability of sufficient space, the downstream slope of the dam be reduced as much as possible through rockfill placement. Necessary measures should be taken to maintain upstream diversion channels and manage the watershed flow. In addition, ensuring the consolidation and drying of the tailings within the reservoir is essential to prevent potential liquefaction and to guarantee the long-term stability and safety of the dam during closure.