هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳
Hydrogeology, Volume 9, No. 1, Summer 2024

بررسی آسیب‌پذیری سفره آب‌زیرزمینی دشت دهگلان با روش‌های مختلف برمبنای تغییرات پوشش گیاهی

مهسا کلانتری*[۱]، فریبا صادقی اقدم[۲]، مهری کاکی[۳]، فرخ اسدزاده[۴]، مطلّب بایزیدی[۵]

۱- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور ابهر، ابهر، ایران.
۲- دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۴- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۵- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران.
*نویسنده مسئول: mkalantari7322@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

چکیده

اخیراً ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی در برابر آلودگی‌های ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی و خطرات مرتبط با آن برای سلامت انسان، اقتصاد و محیط زیست در سراسر جهان اهمیت بیشتری پیدا کرده است. تخمین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با توجه به تنوع روش‌های شناخته شده بر اساس پارامترهای هیدروژئولوژیکی انجام و نتایج آن‌ها با هم مقایسه می‌گردد. با توجه به چنین دیدگاهی، این پژوهش با استفاده از چهار روش آسیب‌پذیری DRASTIC، SINTACS، DAC و COP انجام و نتایج آن‌ها برای آبخوان آبرفتی دشت دهگلان ارزیابی گردید. مقایسه روش‌ها با استفاده از مقادیر داده‌های نیترات و شاخص نرمالیزه کردن آسیب‌پذیری آب زیرزمینی (NGVI) انجام شد. به‌منظور محاسبه درصد پوشش گیاهی منطقه مطالعاتی برای روش COP، از نرم‌افزار NDVI5.3 با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (LIO-TM) در مورخ ۲۳ام می سال ۲۰۲۴ استفاده گردید و مشاهده شد که محدوده آبخوان به سه سطح شامل آبی (۰/۵ ٪)، پوشش خاک (۲/۵ ٪) و زراعی (۹۷ ٪) تقسیم‌بندی شده است. نتایج حاصل از نقشه‌های آسیب‌پذیری مشاهده گردید آلودگی بیشتر در مناطق با عمق سطح آب زیرزمینی کم است. همچنین بخش جنوبی محدوده مطالعاتی در هر چهار روش در معرض آسیب‌پذیری شدید بوده است. درصد سطح آسیب‌پذیری در طبقه خیلی زیاد آبخوان دهگلان با روش‌های آسیب‌پذیری DRASTIC، SINTACS، DAC و COP به نرتیب صفر، ۸۳/۸، ۲ و صفر بدست آمد. در مقایسه چهار روش آسیب‌پذیری که با استفاده از شاخص NGVI انجام شد، مشاهده گردید که روش COP نسبت به سه روش دیگر در منطقه بهتر است.

کلمات کلیدی: آسیب‌پذیری، روش DAC، شاخص NGVI، COP.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به دلیل کمیت زیاد و توزیع نامناسب، هر چند نابرابر است، منبع اصلی شرب و آبیاری روی زمین می‌باشد (Khosravi etal., 2018؛ Xiong etal., 2022). طبق گزارش یونسکو (۲۰۲۲)، آب‌های زیرزمینی تقریباً ۹۹ درصد از آب شیرین مایع موجود زمین را تشکیل می‌دهند و یک چهارم کل مصرف آب برای فعالیت‌های انسانی را تشکیل می‌دهند. این منبع مهم، بسیاری از جنبه‌های توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در سراسر جهان مانند زندگی سالم، توسعه صنعتی، آبیاری کشاورزی، حفظ اکوسیستم و توسعه پایدار قادر می‌سازد (Aslam et al., 2018). با این حال، کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در حال حاضر توسط مصرف بیش از حد و آلودگی، افزایش شهرنشینی، توزیع نابرابر و سوء مدیریت در دفع فاضلاب‌ها در معرض تهدید قرار گرفته است (Barzegar et al., 2021). با توجه به اینکه منابع آب زیرزمینی از یک سو گیرنده نهایی آلاینده‌ها در فرآیند چرخه آب هستند

و از سوی دیگر احیای آن‌ها پس از آلوده شدن بسیار دشوار است، موضوع کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی ممکن است منجر به کاهش قابل توجهی شود و در نتیجه باعث کمبود شدید آب می‌شود (Siarkos et al., 2021, Abunada et al., 2021). بنابراین، نیاز مبرمی به کاهش مؤثر تهدیدات آب‌های زیرزمینی از طریق حذف آلودگی آب‌های زیرزمینی، بهبود انعطاف‌پذیری آب‌های زیرزمینی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در مقیاس جهانی وجود دارد (Taghavi etal., 2022). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی روشی برای ارزیابی فضایی حساسیت یک آبخوان نسبت به آلودگی است. علاوه بر این مقایسه نتایج روش‌های آسیب‌پذیری مختلف یک چالش مهم پژوهشی و مرجعی برای حفاظت و برنامه‌ریزی صحیح کاربری اراضی که دارای محدودیت داده‌های کمی و کیفی هستند. متفاوت بودن نتایج بدست آمده از نقشه‌های حاصل از روش‌های مختلف باعث گردیده قابلیت اطمینان در این روش-های برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به روش مورد استفاده و کیفیت و کمیت داده بستگی داشته باشد. متداول‌ترین روش‌ها برای تخمین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی DRASTIC و GOD هستند (USEPA, 1987 ; Foster, 1987). شاخص آسیب‌پذیری آبخوان AVI و SINTACS توسط آژانس ملی ایتالیا برای حفاظت محیط-زیست ارائه شده است (Stempvoort, 1993; Civita, 2000; ANPA, 2001). چندین روش با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری در این چهارچوب مانند روش COP توسعه داده شده است (Vias et al., 2006). این روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی در سفره‌های کارستی بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ در اروپا برای حفاظت آبخوان‌ها از کربنات انجام شد و سپس با ارائه دستورالعمل برای مدیریت حوضه رودخانه و حفاظت منابع آب زیرزمینی از آلودگی نسبت به EC توسعه داده شد. براین اساس ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان دشت دهگلان در شرق استان کردستان انجام می‌شود. این منطقه یکی از بزرگ-ترین دشت‌ها و منبع آب زیرزمینی استان کردستان است و همچنین قطب کشاورزی استان محسوب می‌گردد. لذا این امر باعث گردیده مدیریت حفاظت منابع آب زیرزمینی منطقه برای جلوگیری از آلودگی و اضافه برداشت‌ها و حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق که فاجعه ساخته است از سال ۱۳۸۶ روزبه روز افزایش یافته است. اقدامات انجام شده در این زمینه افزایش تحقیقات در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری و آلودگی، اضافه شدن به فهرست دشت ممنوعه از سال ۱۳۸۶ به بعد، جلوگیری از حفر چاه در محدوده دشت و جلوگیری از کف‌شکنی چاه‌های عمیق می‌باشد. روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی آسیب-پذیری آب‌های زیرزمینی عوامل مشابهی را در نظر می‌گیرند و با فرآیندهای نقل و انتقال آلاینده‌ها از زمین به منطقه آب زیرزمینی کنترل می‌شود و کاربرد آن‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه نتایج متفاوتی را دادند. از جمله نتایج قابل توجه در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت دهگلان نشان داد. و در زمینه تصمیمات حفاظت از منابع آب زیرزمینی با برنامه‌ریزی صحیح کاربری اراضی بایستی حمایت انجام گیرد. این روش‌های به کار گرفته یکی از ابزارهای عملی برای تصمیم‌گیران در بخش حفاظت از آب‌های زیرزمینی در برابر خطر را فرهم می‌کند. آلودگی آب‌های زیرزمینی مطالعه مختلف نشان داده است که هیچ روشی برای ارزیابی آسیب-پذیری آب‌های زیرزمینی قابل اطمینان نیست و هر یک از آن ها بسته به ویژگی‌های آبخوان، کاربری اراضی و داده‌های قابل دسترش و پارامترهای درگیر، وزن‌ها و امتیازات به هر پارامتر بستگی دارد. روش‌های مرسوم دراستیک باعث شده در عدم قطعیت و تعیین امتیازات و وزن‌دهی‌ها معرفی شود. این روش ها برای شناسایی مناطقی که در آن بایستی توجه ویژه‌ای شود، استفاده کرد (Cusano et al., 2023).

Maqsoom et al., (2020) مدل دراستیک و دراستیک اصلاح شده با تأثیرات کاربری اراضی برای ارزیابی حساسیت آب‌های زیرزمینی در امتداد مسیر کریدور اقتصادی چین- پاکستان (CPEC) انجام دادند. نتایج آسیب‌پذیری با مدل دراستیک نشان داد که ۱۹ درصد محدوده دارای آسیب‌پذیری بالا، ۴۲ درصد آسیب‌پذیری متوسط، ۳۷ درصد دارای آسیب‌پذیری کم و دو درصد آسیب‌پذیری بسیار کم در برابر آلودگی آب‌های زیرزمینی است. اعتبارسنجی مدل با پارامتر نیترات نشان داد که مدل دراستیک اصلاح شده با کاربری اراضی (تغییرات انسانی) بهتر از مدل دراستیک بوده است. تحلیل حساسیت انجام شده با حذف تک پارامتر برای تجزیه و تحلیل مدل انجام شد و نتایج آن نشان داد که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه تحت تأثیر پارامترهای کاربری اراضی و

عمق سطح ایستابی می‌باشد. Ghosh et al., (2021) به شناسایی آلوده‌ترین مناطق آب زیرزمینی منطقه بیربهوم در جنوب بنگال هندوستان پرداختند. دلیل انتخاب این ناحیه آلودگی منطقه از نظر فلوراید و سایر پارامترهای شیمیایی بیان کردند. آن‌ها در این مطالعه از روش دراستیک استفاده کردند. نقشه نهایی آسیب‌پذیری نشان داد که قسمت غربی نسبت به قسمت شرقی آسیب‌پذیرتر است زیرا قسمت‌های غربی ساختار زمین‌شناسی از بازالت و گرانیت تشکیل شده است. آن‌ها بیان کردند که وجود این ساختار باعث هوازدگی بیشتر و بالا رفتن سرعت آلودگی کانی‌های مضر در آب‌های زیرزمینی این ناحیه شده است. همچنین نتایج نشان داد که در قسمت غربی این ناحیه مطالعاتی سنگ‌های سخت وجود دارد که باعث شده سطح آب زیرزمینی نسبت به بخش شرقی محدوده مطالعاتی نزدیک به سطح زمین باشد. مدل دراستیک با نمودار ROC[1] برای اعتبارسنجی استفاده کردند و نتایج نشان داد که مشخصه عملکرد برای این مدل در این منطقه ۷۳ درصد معتبر است. نقریان و همکاران (۱۴۰۱) به مقایسه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورامین با روش سینتکس و مدل عددی سه‌بعدی MODFLOW پرداختند. نقشه آسیب‌پذیری بدست آمده از شاخص روش سنتکس بین ۹۲ تا ۱۶۸ متغیر بوده و مشاهده کردند قسمت شمال دشت آسیب‌پذیری زیاد و اراضی جنوب شرقی و پایاب دشت آسیب‌پذیری کم و مابقی مناطق دشت دارای آسیب‌پذیری متوسط می‌باشد. برای ارزیابی شاخص از مدل سه‌بعدی استفاده کردند و نتایج نشان داد که دقت مدل مناسبی دارد. همچنین صحت‌سنجی آسیب‌پذیری ذاتی از نیترات استفاده نمودند و مقدار مجذور همبستگی ۶۵ درصد و خوب است. آسیب‌پذیری آبخوان دشت دهگلان در مطالعات گذشته با روش‌های مختلف مبنی بر پارامترهای مختلف بررسی گردیده است که در ادامه ارائه شده است. در مطالعه‌ای با استفاده از مدل دراستیک و الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی موجک و ازدحام مرغ به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت دهگلان پرداخته شد. نقشه نهایی بخش‌های شمال آبخوان دارای پتانسیل آلودگی متوسط و زیادی برخوردار است و بایستی محافظت بیشتری از این مناطق صورت گیرد. با توجه به معیارهای ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری بدست آمده با شبکه عصبی موجک نسبت به الگوریتم ازدحام مرغ عملکرد بهتری داشته است. توزیع نیترات با شاخص آسیب‌پذیری در حالت بهینه، نتایج بهتری را در پیش‌بینی مناطق آلوده داشته است (ولدی و همکاران، ۱۴۰۳). ندیری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش‌های SINTACS، DRASTIC و SI و روش ترکیبی مدل فازی ساجنو، الگوریتم ژنتیک آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه- دهگلان را بررسی کردند. مطابق شاخص همبستگی (CI) نتایج نشان داد مدل فازی ساجنو نسبت به بقیهٔ روش‌ها بهتر است. براساس این روش بخش‌های شمال-غرب و جنوب‌شرق دشت پتانسیل آلودگی بیشتری نسبت به سایر مناطق دارد و باید محافظت بیشتری از این مناطق صورت گیرد. ملکی و همکاران (۱۴۰۳) روش جدید مبتنی بر اعداد Z برای ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آب‌های زیرزمینی دشت‌های اردبیل و قروه-دهگلان استفاده کردند. مفهوم اعداد Z به عنوان نسل جدیدی از منطق فازی است. تجزیه وتحلیل نتایج نشان داد که مدل‌سازی مبتنی بر اعداد Z به دلیل درنظرگرفتن قابلیت اطمینان داده‌ها و تخصیص وزن مناسب به قوانین، کیفیت نتایج را نسبت به منطق فازی کلاسیک به میزان ۵۳ درصد (برای سناریوی اول)، ۱۸۴ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت اردبیل و ۱۲۷ درصد (برای سناریوی اول)، ۳۱۱ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت قروه_دهگلان بهبود بخشید. ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲) میزان فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام را به کمک تداخل‌سنجی راداری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین نرخ نشستی معادل ۷ میلی-متر در سال طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵ است و بیان نمودند افزایش زیاد تراز آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ باعث شده که نرخ فرونشست متوسط حدود ۳ میلی‌متر در سال کاهش شده است.

طبق مطالعات گذشته نقشه آسیب‌پذیری دشت دهگلان با روش‌های مختلف تهیه شد اما در این پژوهش برآورد و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت دهگلان علاوه‌بر روش-های DRASTIC و SINTACS از روش‌های DAC و COP که برمبنای فعالیت‌های کشاورزی و تغییرات انسانی هستند، ارزیابی و مقایسه شد. امتیازبندی پارامترهای DAC براساس فعالیت‌های شدید کشاورزی با تبعید از تحقیقات انجام شده در

[1] Receiver Operating Characteristic Curve

گذشته در سایر مناطق می‌باشد. برای برآورد درصد پوشش گیاهی و جداسازی کاربری اراضی در روش COP از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (LIO-TM) در محیط نرم‌افزار ENVI5.3 استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه روش‌های به‌کارگرفته شده از شاخص NGVI و همبستگی پیرسون استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دهگلان در دامنه غربی سلسله جبال زاگرس و در شرق استان کردستان، ما بین طول‌های جغرافیایی"۳۰ ' ۰۷ ° ۴۷ الی " ۰۰ ' ۱۲ ° ۴۸ و عرض‌های جغرافیایی "۰۰ ' ۰۰ ° ۳۵ الی " ۰۰ ' ۰۰ ° ۳۶ واقع گردیده است. این محدوده از شرق به محدوده‌های مطالعاتی گل‌تپه-زرین‌آباد، از غرب به محدوده مطالعاتی سنندج، از جنوب تپه اسماعیل امیر آباد و از شمال به محدوده مطالعاتی دیواندره-بیجار محدود می‌گردد (شکل۱). در شکل ۱ توزیع مکانی چاه-های بهره‌برداری آب زیرزمینی در آبخوان دهگلان نمایش داده شده است. محدوده مطالعاتی دهگلان دارای مساحت محدوده دشت ۹۸۲/۴۲ کیلومتر مربع است و حداقل و حداکثر ارتفاع نیز به ترتیب ۱۷۴۰ و ۲۰۳۲ متر می‌باشد. از ارتفاعات منطقه می‌توان به کوه‌های دربند کبود و کوه دربند، زاجیان، عبدالرحمان و بندآباد از جنوب، از شمال به کوه‌های شیدا و آخی کمال اشاره نمود. از جمله خصوصیات این محدوده مطالعاتی وجود شبکه‌های آبی در سطح آن است که شبکه آبیاری دهگلان از جمله آن‌ها می‌باشد. جریان‌های سطحی ورودی به این محدوده مطالعاتی از طریق دو رودخانه ویهج و اوریه و ارتفاعات جنوب و جنوب شرقی در شمالی‌ترین نقطه جریان می‌یابد و وارد رودخانه چم‌شور می‌گردد (شکل ۲). آبخوان آبرفتی دشت دهگلان یکی از مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی شرق استان کردستان بوده که از دیرباز نقش تعیین-کننده‌ای را در تأمین آب مورد نیاز مصارف منطقه از جمله کشاورزی و صنعت برعهده داشته است. به‌دلیل کاهش بارندگی‌ها، افت سطح آب‌زیرزمینی و افزایش برداشت از چاه-های حفر شده و حفر چاه‌های غیرمجاز در دشت باعث شد که از سال ۱۳۸۶/۰۳/۲۰ ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از سوی وزارت نیرو اعلام گردید. براساس بررسی‌های انجام شده علاوه بر عدم تعادل آبخوان و کاهش مستمر حجم مخزن، کیفیت آب زیرزمینی نیز در حال کاهش می‌باشد. تصاویر بازدید از محدوده‌ی موردمطالعه در شکل ۳ ارائه شده است.

شکل۱- موقعیت آبخوان در ایران و موقعیت پیزومترها و چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان و دشت دهگلان.

Figure 1- The position of the aquifer in Iran and the position of piezometers in the aquifer and Dehgolan plain.

شکل۲- زمین شناسی و مقاطع ورودی و خروجی جریانات سطحی و زیرزمینی آبخوان دهگلان.

Figure 2- Geology and the inlet and outlet sections of surface and underground streams of Dehgolan aquifer.

شکل۳- مسیر رودخانه دهگلان – بازدید ۱۴۰۲.

Figure 3- Dehgolan River route – visit 2023.

مبانی نظری

روش دراستیک

دراستیک قابل اعتمادترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش و به‌طور گسترده پذیرفته شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (ذاتی و خاص) در نظر گرفته می‌شود (Chamanehpour et al., 2020; Sarkar and Pal, 2021). این یک روش شاخص پوششی است که در ابتدا در سال ۱۹۸۷ توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA) و انجمن کار آب آمریکا (AWWA) توسعه داده شد. روش DRASTIC توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده پیشنهاد شده است. این روش به عوامل هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی که تأثیر زیادی بر آلودگی آبخوان دارد، بستگی دارد. کاربرد روش منوط به مفروضات زیر است: ۱) منابع آلودگی در سطح زمین رخ می‌دهد؛ ۲) آلاینده‌ها با بارش به داخل آبخوان نفوذ می‌کنند؛ ۳) آلاینده‌ها تحرکی مشابه آب دارند؛ ۴) واحد هیدرولوژیک باید حداقل ۰/۴ کیلومترمربع باشد (Hamza et al., 2014; Saidi et al., 2011). شاخص آسیب‌پذیری به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$I_{DRASTIC} = \sum P_j(1,7) \times W_j(1,7) \qquad (۱)$$

روش SINTACS

مخفف SINTACS شامل عوامل هیدروژئولوژیکی عمق تا سطح آب زیرزمینی (S)، تغذیه خالص (I)، محیط اشباع (N)، محیط خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) و شیب (S) است برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب-

های زیرزمینی استفاده می‌شود. اهمیت پارامترها و داده‌ها برای تخمین و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در پاراگراف بالاتر توضیح داده شد. در ارزیابی نمره‌ای بین یک تا ۱۰ به هفت پارامتر فوق اختصاص داده شد.

در این روش به هر پارامتر براساس استعداد و حساسیت نسبی در برابر آلاینده، یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود (جدول ۲). شاخص سینتاکس از طریق جمع فاکتورهای وزنی هر بخش از منطقه محاسبه می‌شود (شکل ۲). شاخص آسیب‌پذیری به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$I_{SINTICS} = \sum P_j(1,7) \times W_j(1,7) \quad (۲)$$

که P_j هفت پارامتر و W_j ضریب وزن است.

روش DAC

DAC همانند روش دراستیک به ارزیابی پتانسیل آلودگی ناشی از نفوذ پراکنده بارش از طریق خاک و شکستگی سنگ آهک ارزیابی پتانسیل آلودگی به هفت پارامتر مؤثر بستگی دارد. با این تفاوت ضرب وزن پارامترها مطابق جدول ۲ ارائه شده است و وزن پارامترهای محیط خاک، محیط غیراشباع خاک، هدایت هیدرولیکی و توپوگرافی متفاوت است (Cusano et al., 2023).

$$I_{DAC} = \sum P_j(1,7) \times W_j(1,7) \quad (۳)$$

این روش‌ها به هفت پارامتر مهم هیدروژئولوژیکی یعنی عمق آب (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، ناحیه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) بستگی دارد. رتبه‌بندی مربوط به این پارامترها به صورت جدول ۱ انجام شد.

جدول۱- رتبه‌بندی مربوط به پارامترها در روش DRASTIC (Aller et al., 1987).

Table 1- Ranking of parameters (Aller et al., 1987).

Hydraulic conductivity of the aquifer (m/sec)	Score
$> 5 \times 10^{-2}$	10
5×10^{-3}-5×10^{-2}	9
5×10^{-4} -5×10^{-3}	8
1×10^{-5} -5×10^{-4}	7
5×10^{-5} -1×10^{-4}	6
1×10^{-5} -5×10^{-5}	5
4×10^{-6} -1×10^{-5}	4
8×10^{-7} - 4×10^{-6}	3
1×10^{-7} -8×10^{-7}	2

Soil media	Score
send	10
sand	9
Pit	8
cracked clay	7
Loam sand	6
Loam	5
Loam silt	4
Loam Clay	3

Net recharge (mm/year)	Score
0-200	6
200-300	9
300-400	8
400-500	5
500-700	4
700>	3

Aquifer media	Score
Massive shale	2
Metamorphic	3
Weathered metamorphic	4
alluvium	5
Sandstone, limestone and shale, massive limestone	6
Sand	8
basalt	9
Karst limestone	10

Depth to water (m)	Score
0-2	10
2-3	9
3-5	8
5-7	7
7-10	6
10-13	5
13-20	4
20-30	3
30-56	2
>56	1

Topography-slop (%)	Score
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18<	1

Impact of the vadose zone	Score
enclosing layer	1
Sandstone	6
Sandstone, Shale	6
Sand and Clay	6
Metamorphic	4
sand	8
basalt	9
Karst limestone	10

جدول۲- ضریب وزنی پارامتر روش‌های DRASTIC، SINTACS (Civita and Miao, 2000)، SINTACS (Civita and Miao, 2000) و DAC (USEPA, 1987).

Table 2- The weighting coefficient of the parameter methods DRASTIC (Civita and Miao, 2000) and DAC SINTACS (USEPA, 1987).

DAC	SINTACS	DRASTIC	Parameter
5	2	5	Depth to water
4	5	4	Net recharge
3	1	3	Aquifer media
5	3	2	soil media
3	5	1	Topography
4	5	5	Impact of the vadose zone
2	5	3	Hydraulic conductivity

روش COP

ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مناطق کارستی در پروژه COST Action 620 ارائه شد (European Commission, 2004). این روش مخفف سه حرف غلظت جریان، لایه‌های پوشاننده و بارندگی. اساس مفهومی این روش بر حفاظت طبیعی از آب‌های زیرزمینی (عامل O) توسط ویژگی‌های خاک در ناحیه غیراشباع می‌باشد و همچنین این امر چطور می‌توان با میزان فرآیند نفوذ (C) و شرایط آب و هوایی (P) تخمین زد (Vias et al., 2006).

پارامتر غلظت جریان (C)

این پارمتر نشان‌دهنده پتانسیل آب موجود در منطقه اشباع است. و این پارامتر با دو سناریو پهنه‌بندی گردید: سناریوی اول: با فرض اینکه یک لایه با نفوذپذیری کم در حوضه وجود دارد و رواناب سطحی در مناطق دامنه‌ی مناطق شیب‌دار نفوذ می‌کند. سناریوی دوم: وضعیت در مناطقی که در آن تغذیه به صورت خودکار اتفاق می‌افتد نه متمرکز در یک نقطه و در دامنه‌ها. برای این منظور در برآورد این ضریب ژئومورفولوژی کارست، فاصله از رودخانه، شیب‌ها و پوشش گیاهی منطقه در نظر گرفته می‌شود. طبقه‌بندی کاربری اراضی و پوشش زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به علت هزینه بالا و وقت‌گیر بودن مطالعات میدانی، مناسب‌ترین روش برای محاسبه درصد کاربری اراضی است (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۶). برای برآورد درصد سطح پوشش گیاهی ابتدا با استفاده از نرم افزار ENVI5.3 بدست آمد. بنابراین بعد از آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای، در مرحلهٔ پیش‌پردازش روی تصاویر ماهواره‌ای اصلاحات رادیومتریک اعمال شد. هدف اصلی از این مرحله خطاهای سیستماتیک و غیرسیستماتیک موجود در تصاویر خام و افزایش صحت و قابلیت دسته‌بندی اطلاعات رقومی مختلف است (علوی‌پناه و همکاران، ۱۳۸۷). سپس تصحیحات هندسی، رادیومتریک و اتمسفری انجام شد و با استفاده از روش الگوریتم درختی به جداسازی کاربری اراضی محدوده آبخوان دهگلان انجام شد. کلاس‌بندی کردن پارامترهای این بخش در جدول ۳ ارائه شده است.

پارامتر لایه‌های پوشاننده آب زیرزمینی (O)

برای این پارامتر بافت و ضخامت هر لایه در بخش غیراشباع براساس مطالعات ژئوالکتریک انجام گردید و کلاس-بندی برای این بخش در جدول ۳ ارائه شده است.

پارامتر بارش (P)

تغییرات مکانی و زمانی بارش در انتقال آلاینده‌ها نقش دارد. برای تخمین مقدار بارش به توزیع بارندگی و پراکندگی بستگی دارد (Allocca et al., 2014). برای این محدوده تغییرات این پارامتر در سال بین ۲۵۹ تا ۵۱۱ میلی‌متر در سال است (شکل ۵). نمرات اختصاص داده شده به هر یک از عوامل روش COP در ارزیابی حفاظت از منابع آب زیرزمینی در جدول ۳ ارائه شده است.

$$COP = C \times O \times P \quad (۴)$$

جدول ۳- نمرات پارامترهای شاخص COP (Cusano et al., 2023).

Table 3- Score Index Parameters COP (Cusano et al., 2023).

Factor Index	Subfactor	Range	Score
C	Distance to swallow hole (m)	Between<500 and 2000m	0-0.3
		<10m	0
		10-100m	0.5
		100m	1
	Slope and vegetation	<8%	1

		8-31% with vegetation cover	0.95
		31-76% with vegetation cover	0.85
		>76%	0.75
	Texture and Thickness	Sandy loam and<0.5m	0
		Sandy loam and 0.5-1m	1
		Sandy loam and>1m	2
O	Layer Index (resulted from the multiplication of thickness and lithology of each layer)	0-250	1
		250-1000	2
		1000-2500	3
		2500-10000	4
		>10000	5
	Average rainfall (mm/year)	>1600	0.4
		1200-1600	0.3
		800-1200	0.2
P		400-800	0.3
		<400	0.4
	Temporal distribution(mm/day)	10-20	0.4

مقایسه نقشه‌های آسیب‌پذیری

به منظور مقایسه نقشه‌های آسیب‌پذیری به دست آمده، برای هر روش شاخص (NGVI) محاسبه شد. نرمال‌سازی خطی با نسبت داده NGVI=0% به حداقل امتیاز آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و NGVI=100% برای بالاترین مقدار مطابق فرمول ۵ انجام خواهد شد.

$$NGVI = \frac{I_v - I_{vmin}}{I_{vmax} - I_{vmin}} 100 \qquad (۵)$$

I_{vmax} و I_{vmin} حداکثر و حداقل مقادیر شاخص آسیب‌پذیری هستند. مقادیر بدست آمده به پنج کلاس (خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد) به ترتیب بین مقادیر ۰، ۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ درصد تقسیم گردید. برای روش COP نرمال‌سازی مقادیر نسبت به سه روش دیگر متفاوت بوده زیرا شاخص آسیب‌پذیری COP برای حفاظت آب زیرزمینی است. این روش جهت یکسان‌سازی محدوده برای شاخص‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی انجام شد و تعداد کلاس‌ها در مقایسه روش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود (Cusano et al., 2023).

برای ارزیابی همبستگی مقادیر شاخص‌های آسیب‌پذیری آب-های زیرزمینی از همبستگی پیرسون استفاده شد. ضریب همبستگی بین مقادیر x و y به صورت فرمول ۶ تعریف می‌شود:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i - x)(y_i - y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x_i - x)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(y_i - y)^2}} \qquad (۶)$$

در این مطالعه همبستگی بین جفت شاخص‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در هر سلول به صورت ماتریسی محاسبه خواهد شد (Kijsipongse et al., 2011).

نتایج و بحث

عمق آب زیرزمینی (S)

عمق سطح آب در یک آبخوان یکی از پارامترهای مهم است زیرا طول مسیر حرکت آب زیرزمینی تعیین کننده میزان نفوذ مواد آلاینده به آب‌های زیرزمینی است. در نقاطی که عمق سطح آب زیاد باشد بار غلظت آلاینده‌ها کمتر است (USEPA, 1987). در محدوده‌هایی که عمق آب زیرزمینی کمتر از ۳۰ متر است دارای آلودگی بیشتر و هر عمق آب زیرزمینی بیشتر شانس آلوده شدن آب زیرزمینی کمتر می‌گردد. عمق آب زیرزمینی آبخوان دهگلان بین ۱۲/۷ تا ۱۳۷/۲ متر بدست آمده و همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد آبخوان دارای پنج کلاس‌بندی است که مناطق جنوبی و غربی دارای کمترین عدد کلاس عمق آب زیرزمینی (شماره ۱ رنگ قرمز) بدین معنا که عمق آب زیرزمینی زیاد و بیشتر از ۵۶ متر بوده و بخشی از مناطق شمالی بیشترین عدد کلاس عمق آب زیرزمینی (شماره ۵ رنگ سبز) را داشته و بدین معنا که عمق آب زیرزمینی کمتر از ۱۳ متر می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد جریان آب زیرزمینی از نواحی قرمز رنگ یعنی نواحی که عمق آب زیرزمینی بالای ۵۶ متر است عبور می‌کند و مقاطع ورودی در بخش شرق آبخوان و جنوبی آن بیشتر و

بزرگتر بوده و عمق آب زیرزمینی هم در این نواحی نسبت به سایر نقاط دیگر عمیق‌تر بوده است. ورودی آب‌های سطحی در قسمت بالادست (مطابق آبراهه‌ها) باعث شده که در مناطق شمالی عمق آب زیرزمینی بین ۳۰-۵۶ متر باشد و عمق آب زیرزمینی در این نواحی نسبت به مناطق مرکزی بیشتر باشد. در reclassify انجام شده درصد مساحت سطح آبخوان در عمق آب زیرزمینی کمتر از ۱۵ متر حدود ۲۳ درصد و بیشتر از ۱۵ متر ۷۷ درصد محاسبه شد.

شکل۴- کلاس‌بندی عمق اب زیرزمینی آبخوان دهگلان.

Figure 4- Classification of groundwater depth of Dehgolan aquifer.

تغذیه خالص (I)

تغذیه آب‌زیرزمینی برای انتقال مواد جامد و آلاینده است و در مناطقی که تغذیه خالص بالا باشد پتانسیل آلودگی بالاست (USEPA, 1987). برآورد میانگین تغذیه سالانه آب زیرزمینی برای محدوده مورد مطالعه بدین صورت بدست آمد که ابتدا یک مدل توزیع شده از میانگین سالانه بارش مؤثر (P-ETR) انجام می‌شود (Allocca et al., 2014; De Vita et al., 2018). مطابق شکل (۵- الف) پهنه‌بندی تغذیه خالص آبخوان دهگلان دارای سه کلاس است، مناطقی که دارای کلاس ۹ هستند یعنی بیشتر از ۷۸ سانتی‌متر در سال تغذیه در این نواحی اتفاق می‌افتد و مطابق پهنه‌بندی انجام شده تغذیه خالص بین ۱۶/۳ تا ۹۳/۱ سانتی‌متر در سال بوده و متوسط آن ۳۲ سانتی‌متر در سال می‌باشد.

اثر منطقه غیراشباع (N)

این پارامتر به ویژگی‌های منطقه غیراشباع بالای سطح آب است. ناحیه غیراشباع مهمترین بخش فرآیندهای میرایی را کنترل می‌کند که به لیتولوژی و نفوذپذیری بستگی دارد (USEPA, 1987). بنابراین با استفاده از نقشه هیدروژئولوژیکی و مقاطع ژئوالکترویک برای منطقه‌ی مورد مطالعه با در نظر گرفتن لیتولوژی ناحیه غیراشباع آب‌های زیرزمینی برآورد شده است. حداکثر امتیاز ۱۰ بوده که به منطقه غیراشباع آبخوان متشکل از سنگ آهک و سنگ-دولومیت اختصاص داده شد. امتیاز بین ۴ تا ۶ به رودخانه‌های واقع در دشت دهگلان که متشکل از شن‌های دانه‌درشت و ماسه و آذری نسبت داده شد (شکل ۵-ب).

محیط خاک (T)

بر میزان تغذیه و توانایی آلاینده‌ها برای نفوذ به محیط وادوز تأثیر می‌گذارد. هرقدر اندازه ذرات تشکیل‌دهنده خاک‌ریزتر و نفوذپذیری خاک کمتر و درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد (Di Gennaro et al., 2002; USEPA, 1987). بنابراین محیط خاک بر اساس رده‌بندی بافتی آن مشخص می‌گردد و بر اساس آلودگی امتیازبندی می‌شود. شکل ۵- ج نشان می‌دهد که محیط خاک آبخوان دهگلان در دو امتیاز ۴ و ۶ و متشکل از نوع خاک لوم و لوم ماسه‌ای می‌باشد.

محیط آبخوان (A)

به محیط تلفیقی یا تثبیت نشده‌ای اطلاق می‌گردد که آبخوان را تشکیل می‌دهد. محیط آبخوان کنترل کننده آلاینده‌ها و پراکندگی و انتشار آن‌ها در کل منطقه اشباع می-

کند. بنابراین این پارامتر در تعیین زمان و سطح تماس مواد آلوده در سفره آب زیرزمینی مؤثر است (USEPA, 1987). داده‌های این پارامتر از نقشه هیدروژئولوژیکی و مقاطع ژئوالکتریک منطقه‌ی مورد مطالعه با در نظر گرفتن منطقه اشباع سفره‌های زیرزمینی است. حداکثر امتیاز نقشه این پارامتر هشت بوده و دارای رسوبات آبرفتی دانه‌درشت است و بیشترین سطح منطقه دارای رسوبات آبرفتی ریزدانه بوده است (شکل ۵-ب).

هدایت هیدرولیکی (C)

این پارامتر به قابلیت محیط آبخوان در انتقال آب زیرزمینی تحت یک گرادیان هیدرولیکی معین اشاره دارد. این پارامتر همچنین سرعت حرکت آلاینده‌ها را در منطقه اشباع محیط آبخوان کنترل می‌کند (USEPA, 1987). این پارامتر در محدوده‌ی مورد مطالعه امتیازی معادل ۱۰ به آبخوان تعلق دارد و محیط تشکیل شده از سنگ آهک و سنگ آهک دولومیت که این خود باعث انتشار آلاینده‌ها و همچنین درجه نفوذپذیری بالا است (شکل ۵-ی).

توپوگرافی (S)

این پارامتر زاویه شیب سطح زمین است. توپوگرافی احتمالاً در نفوذ یا باقی‌ماندن یک آلاینده از سطح به منابع زیرزمینی کمک کند. بنابراین این پارامتر از DEM (۲۰ × ۲۰ متر) تخمین زده شد. بالاترین مقدار شیب ۲۰/۵ درصد (۱۱/۵ درجه) است (شکل ۵-د). طبق نمرات تعیین شده برای این پارامتر با افزایش درجه یا درصد شیب مقادیر رتبه کاهش می‌یابد.

شکل ۵- الف) تغذیه خالص آبخوان دهگلان، ب) محیط غیراشباع ، ج) محیط خاک، د) محیط آبخوان، ه) هدایت هیدرولیکی، ی) توپوگرافی.

Figure 5- a) Net recharge, b) unsaturated environment, c) soil environment, d) aquifer environment, e) hydraulic conductivity, j) topography.

برای تهیه نقشه فاصله از رودخانه براساس رستری رودخانه انجام شد. همانطور که در شکل ۶- الف مشاهده می‌شود مناطقی که فاصله از رودخانه کمتر از ۱۰ متر است در کلاس-بندی دارای امتیاز صفر بوده و این نواحی در عامل C دارای آسیب‌پذیری زیاد و مطابق رخنمون زمین‌شناسی این نواحی رخنمون‌های سنگی را دارد (شکل ۶-ب). یکی دیگر پارامترهای این عامل (C) شیب با درصد پوشش گیاهی است. میزان تأثیرپذیری آبخوان از جریانات سطحی به عنوان پارامتر تغذیه مورد بحث قرار می‌گیرد که به صورت تأثیر نفوذ نزولات جوی و آب حاصل از آبیاری کشاورزی و فاضلاب‌ها در نظر گرفته می‌شوند. این امر در نقشه‌ی چاه‌های بهره‌برداری می-توان مشاهده گردد که کشاورزی در مناطقی که فاصله رودخانه کمتر از ۱۰متر است زیادتر و چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است. لذا این افزایش تغذیه باعث پراکنش و رقیق‌سازی آلوده‌کننده در منطقه اشباع و غیراشباع می‌شود. تغذیه بیشتر سرعت بالاتری را برای انتقال آلاینده‌ها به سطح آب‌زیرزمینی فراهم می‌آورد. هرچه تغذیه زیادتر باشد، آسیب‌پذیری آب‌زیرزمینی به علت احتمال بیشتر انتقال آلاینده‌ها بیشتر می‌شود. میزان تأثیر مواد تشکیل دهنده آبخوان بستگی به عواملی همچون میزان تخلخل، جنس، اندازه و جورشدگی ذرات دارد که میزان پویایی تحرک آلودگی و به‌عبارتی فرآیندهای رقیق‌سازی آلودگی نظیر تجزیه‌ی شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر (Retardation) را کنترل می‌کند. هر چه مواد آبخوان دانه درشت‌تر باشد، به‌دلیل نفوذپذیری بالاتر این مواد امکان جریان یافتن آلاینده‌ها درآبخوان بیشتر و پتانسیل آلودگی آبخوان نیز بیشتر خواهد شد. برای اثبات این بخش برای نمونه لاگ حفاری دو چاه در محدوده‌ی دشت دهگلان در تصویر شکل ۷ ارائه شده است که نواحی دارای آسیب‌پذیری بالا هستند از نظر جنس و اندازه ذرات درشت‌دانه هستند. برای این منظور ابتدا تصویر ماهواره‌ای (OLI-TM) لندست ۸ از سایت USGS دانلود شد و سپس در محیط ENVI5.3 محدوده مورد مطالعه به سه کلاس اراضی کشاورزی (دیم و باغی/ زراعی)، مناطق آبی و اراضی بایر و ساخت انسانی (در طبقه‌ی خاک) با استفاده از الگوریتم درختی تقسیم‌بندی شد (شکل۶-ج). مطابق این تقسیم‌بندی اراضی زراعی، آبی و خاک به ترتیب ۹۷، ۰/۵، ۲/۵ درصد از کل محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود. در مناطقی که دارای شیب کم و پوشش گیاهی مناسب هستند میزان نفوذ زیاد می‌شود لذا در این مناطق آسیب‌پذیری زیاد و خیلی‌زیاد می‌شود (شکل ۵-ب). همچنین کمترین مقادیر عامل C به رخنمون‌های آهکی تعلق دارد که در آن شیب باعث افزایش فرآیند رواناب می‌شود. در جاهایی که خاک بیشتر از ۱ متر است نشان دهنده ارزش حفاظتی بالای دشت است که این امر با واحدهای آبرفتی مشخص می‌شوند (شکل ۶-ه). در مناطقی که بارندگی کم باشد ارزش حفاظتی کم و آسیب‌پذیری بالا می‌رود این امر در فاکتور P نشان داده شده است. برای محدوده‌ی مورد مطالعه بارندگی سالانه کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر در سال بوده برای همین منطقه برای پارامتر بارندگی به دو کلاس تقسیم‌بندی شده است (شکل ۶-ی). از نظر دمایی منطقه دارای درجه دمای کم بوده و درجه حرارت در روز بین

۱۰ تا ۱۲/۵ متغیر است لذا در کل محدوده دارای یک کلاس طبقه‌بندی قرار دارد (شکل ۶-و).

شکل۶- الف) فاصله از رودخانه، ب) شیب و درصد پوشش گیاهی، ج) کاربری اراضی آبخوان دهگلان با استفاده از تصویر ماهواره‌ای لندست۸ سال ۲۰۲۴ در محیط ENVI5.3، د) زمین‌شناسی، ه) خاک، ی) بارندگی، و) دما.

Figure 6- a) distance from the river, b) slope and vegetation percentage, c) land use of Dehgolan watershed using Landsat 8 satellite image of 2024 in ENVI5.3 environment, d) geology, e) soil, j) Rainfall, f) Temperature.

شکل۷- لاگ حفاری دو چاه مشاهده‌ای دشت دهگلان.

Figure 7- Drilling log of two observation wells in Dehgolan plain.

چهار نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در شکل ۸ ارائه شده است. هر نقشه از نظر آماری برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف در پهنه‌بندی شاخص‌های آسیب‌پذیری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس نقشه‌ها در پنج دسته اصلی کلاس‌های آسیب‌پذیری انجام شد. با اجرای روش دراستیک مشاهده گردید مقادیر آسیب‌پذیری در کلاس‌بندی زیاد، متوسط و کم به ترتیب ۴، ۳۴ و ۶۲ درصد از سطح آبخوان را پوشش می‌دهد. نقشه آسیب‌پذیری سینتاکس محدوده آبخوان دهگلان را به سه کلاس‌بندی شدید، خیلی زیاد و زیاد تقسیم و به ترتیب سطح ۱۶/۱۸، ۸۳/۸ و ۰/۰۲ درصد از منطقه را فرا گرفته است (شکل ۸-ب). نقشه آسیب‌پذیری DAC نشان داد که محدوده‌ی مورد مطالعه در سه کلاس خیلی‌زیاد، زیاد و متوسط قرار دارد. مطابق شکل (۸-ج) این شاخص ۲ درصد از کل سطح آبخوان در کلاس‌بندی آسیب‌پذیری خیلی زیاد شامل می‌شود و در کلاس‌بندی آسیب‌پذیری زیاد و متوسط به ترتیب ۶۰ و ۳۸ درصد سطح آبخوان را در برگرفته است (شکل ۹). در نقشه آسیب‌پذیری با روش COP که سه عامل تأثیرگذار بوده محدوده را به سه کلاس آسیب‌پذیری زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی کرده است (شکل۸-د).

شکل۸- نقشه‌های آسیب‌پذیری شامل: الف) دراستیک، ب) سینتاکس، ج) DAC و د) COP، مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، WGS84 38N Zon.

Figure 8- Vulnerability maps including: a) drastic, b) syntax, c) DAC and d) COP, scale 1:50000, WGS84 38N Zon.

شکل ۹- مقایسه بین مناطق طبقه‌بندی شده آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با چهار روش (مناطق به صورت درصدی از کل منطقه مورد مطالعه می‌باشد، ۱۰۰٪ یعنی ۷۷۹/۸۲ کیلومترمربع).

Figure 9- Comparison between classified areas of groundwater vulnerability with four methods (areas are as a percentage of the entire study area, 100% means 779.82 square kilometers).

چهار روش مورد استفاده برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به نقشه‌هایی منجر شد که شباهت‌ها و تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. گروه‌بندی مجدد نقشه‌های آسیب‌پذیری با روش نرمال‌سازی NGVI تفسیر متفاوتی از آسیب‌پذیری انجام گردید. محدوده مقادیر و پارامترهای آماری شاخص‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نرمال شده محاسبه شدند

(جدول۴). مقادیر NGVI به پنج گروه برای هر چهار روش تقسیم‌بندی شد و برای هر یک از آنها به صورت فراوانی تجمعی شکل ۱۰ ارئه شده است. هر چهار روش آسیب‌پذیری بیشترین مقادیر بین ۰-۱۰۰ تغییر می‌کند. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بین جفت روش‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی ارزیابی شد (شکل ۱۱). مقایسه تجزیه و تحلیل همبستگی برای همه روش‌ها نشان داد بهترین همبستگی بین DAC-SINTACS (ضریب همبستگی =۰/۹۳) بعد آن همبستگی بین DAC-DRASTIC (ضریب همبستگی= ۰/۹۱) و SINTACS-DRASTIC (ضریب همبستگی= ۰/۹) بدست آمد. همبستگی بین COP و سایر روش‌ها ضعیف و ضعیف‌ترین آن بین COP-SINTACS محاسبه شد. در مطالعه Cusano et al,. (۲۰۲۳) نیز بین روش COP با سایر روش‌های آسیب-پذیری به کار گرفته شده همبستگی وجود نداشته است.

شکل۱۰- توزیع فراوانی از کلاس نرمال‌سازی شده آسیب‌پذیری برای دراستیک، سنیتاکس، DAC و COP.

Figure 10- Frequency distribution of the normalized class of vulnerability for Drastic, Senitax, DAC and COP.

جدول۴- پارامترهای آماری شاخص‌های آسیب‌پذیر نرمال شده.

Table 4- Statistical parameters of normalized vulnerable indicators.

Standard deviation	Maximum	Average	Minimum	Index	
9.7	171	141	118	DRASTIC	Before normalized
10.9	234	199	158	SINTACS	
10.2	189	159	126	DAC	
0.1	2.5	1.52	0.6	COP	
18.4	100	44	0	DRASTIC	normalized NGVI
14.4	100	54.8	0	SINTACS	
16.4	100	52.7	0	DAC	
11.5	100	38	10	COP	

	SINTACS	DRASTIC	DAC	COP
SINTACS	1			
DRASTIC	0.9	1		
DAC	0.93	0.91	1	
COP	0.01	0.6	0.6	1

شکل۱۱- ماتریس هبستگی بین چهار روش اجراء شده آسیب‌پذیری.

Figure 11- Correlation matrix between the four implemented methods of vulnerability.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه شرق استان کردستان از نظر کشاورزی یکی از مناطق مهم و استراتژی در تولید محصولات کشاورزی و باغی است لذا اهمیت به منابع آب آن و حفاظت از آب‌های زیرزمینی دشت‌های واقع در آن همواره اولویت بایستی اولویت کار مدیران منابع آب باشد. در این راستا نیز سازمان‌های زیربط

اقداماتی چون قرار دادن دشت‌های قروه و دهگلان در لیست دشت‌های ممنوعه، عدم مجوز حفر چاه‌های عمیق در منطقه، عدم کف‌شکنی چاه‌ها، نصب کنتور هوشمند برای چاه‌های مجاز، فعال‌سازی هر ساله اکیپ‌های گشت و بازرسی در منطقه و انجام پروژه‌های تغذیه مصنوعی برای کاهش بیلان منفی آب در منطقه انجام داده‌اند. وجود فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در منطقه یکی از منابع بالقوه در آلودگی هستند و نسبت به شرایط آب وهوایی و هیدرولوژی منطقه بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیرگذارتر است. برای این منظور از چهار روش آسیب‌پذیری آب زیرزمینی (DRASTIC، SINTACS، DAC و COP) استفاده و مقایسه شد. در این پژوهش ارزیابی آسیب-پذیری آب‌زیرزمینی توسط DRASTIC و SINTACS با وجود اینکه هر دو روش دارای پارامترهای یکسانی هستند، دارای نتایج متفاوت است. این امر به دلیل وزن‌دهی دو پارامتر عمق تا سطح آب و تغذیه خالص در این روش باشد که باعث شده نسبت به روش دراستیک پیچیده‌تر باشد. بطور خاص در روش سینتاکس این پارامترها در محدوده وسیع‌تری است یعنی به ترتیب (۰-۱۰۰ متر، ۰-۵۵۰ میلی‌متر در سال) و برای روش دراستیک (۰-۳۰ متر، ۰-۲۵ سانتی‌متر) است. از بین روش-های مورد استفاده COP نسبت به سایر روش‌های آسیب‌پذیری در آبخوان آبرفتی محدوده مورد مطالعه نه تنها به عامل سنگ-شناسی بلکه به میزان نفوذ و الگوی بارندگی بستگی دارد. علاوه‌براین ضرایب همبستگی کم بین COP و روش‌های دیگر مانند DRASTIC بیانگر این است که این روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی متفاوت و می‌توان برای محدوده‌های مختلف به کار گرفته شود.

منابع و مآخذ

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 تداخل‌سنجی‌راداری. هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲): ۱۵۸-۱۶۹.

نقریان، آ.، ولی‌سامانی، ج.م.، مظاهری، م.، ۱۴۰۱. مقایسه مدل ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان (سینتکس) به نیترات با مدل عددی سه‌بعدی (مورد مطالعاتی آبخوان دشت ورامین). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۱): ۱۵-۳۱.

ندیری، ع.، جبراییلی، ن.، قره‌خانی، م.، ۱۳۹۸. مقایسهٔ توانایی روش‌های مختلف ترکیبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت قروه- دهگلان. مجله اکوهیدرولوژی، ۶(۳): ۸۲۱-۸۳۶.

ملکی، ث.، نورانی، و.، نجفی، ح.، ۱۴۰۳. روش جدید مبتنی بر اعداد Z برای ارزیابی آسیب پذیری ویژه آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت‌های اردبیل و قروه-دهگلان. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۳۸): ۹۸-۱۱۲.

ولدی، گ.، عباس‌نوین‌پور، ا.، بایزیدی، م.، ۱۴۰۳. ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان دهگلان با استفاده از روش دراستیک، شبکه عصبی مصنوعی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ. فصلنامه‌ی یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۸(۳۵).

علوی‌پناه، س.ک؛ احسانی، ا.ه؛ متین‌فر، ح.ر؛ رفیعی ا، عمار و امیری ، ر.، ۱۳۸۷. مقایسهٔ محتوای اطلاعاتی سنجنده‌های TM و +ETM در محیط‌های بیابانی و شهری ایران. پژوهش-های جغرافیا. ۴۷: ۵۶-۶۴.

Aslam, R.A., Shrestha, S. and Pandey V.P., 2018.Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. Science of The Total Environment. 612: 853-875.

Abunada, Z., Kishawi, Y., M. Alslaibi, T., Kaheil, N., Mittelstet, A., 2021. The application of SWAT-GIS tool to improve the recharge factor in the DRASTIC framework: Case study. Journal of Hydrology. 592: 125613.

ANPA., 2023. Guide Lines for Mapping Groundwater Vulnerability to Pollution. Rome: National Agency for the Protection of the Environment; 2001.

Allocca, V., Manna, F., De Vita P., 2014. Estimating annual groundwater recharge coefcient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy). Hydrol Earth Syst Sci. 18:803–17.

Barzegar R, Razzagh S, Quilty J, Adamowski J, Pour HK, Booij MJ., 2021. Improving GALDIT-based groundwater vulnerability predictive mapping using coupled resampling algorithms and machine learning models. Journal Hydrol 598:126370.

Binh and Pham, T., 2018. A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for

an Adjusted DRASTIC Model (DRASTICA) for Groundwater Susceptibility Assessment along the China-Pakistan Economic Corridor (CPEC) Route. Environmental Science, Geography.

Stempvoort, DV., Ewert, L., Wassenaar, L., 1993. Aquifer vulnerability index: A GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. Can Water Resour J. 18: 25–37.

Siarkos, I., Sevastas, S., Mallios, Z., Theodossiou, N. and Ifadis, I., 2021. Investigating groundwater vulnerability variation under future abstraction scenarios to estimate optimal pumping reduction rates. Journal of Hydrology. 598: 126297.

Salmani, H., Mohseni Saravi, M., Rouhani, H., Salajeghe, A. 2012. Evaluation of Land Use Change and its Impact on the Hydrological Process in the Ghazaghli Watershed, Golestan Province, watershed management Journal, 3(6): 43-59.

Taghavi, N., K. Niven, R., J. Paull, D., Kramer, M., 2022. Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. Science of The Total Environment. 822: 153486.

USEPA. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.

Vias, JM., Andreo, B., Perles, MJ., Carrasco, F., Vadillo, I., Jimenez, P., 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeol J. 2006;14: 912–25.

Vias, JM., Andreo, B., Perles, MJ., Carrasco, F., Vadillo, I., Jimenez, P., 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeol Journal;14: 912–25.

groundwater vulnerability assessment. Science of The Total Environment. 642: 1032-1049.

Civita, M., De Maio, M., 2000. SINTACS R5 - A New Parametric System for the Assessment and Automatic Mapping of Groundwater Vulnerability to Contamination. Bologna: Pitagora; 226 p.

Cusano, D., Coda S., De Vita P., Fabbrocino, S., Fusco, F., Lepor,e D., Nicodemo, F., Pizzolante, A., Tufano R., Allocca V., 2023. A comparison of methods for assessing groundwater vulnerability in karst aquifers: the case study of Terminio Mt. aquifer (Southern Italy). Sustainable Environment Research. 33:42.

De Vita, P., Allocca, V, Celico F., Fabbrocino, S., Mattia, C., Monacelli, G., et al., 2018. Hydrogeology of continental southern Italy. Journal Maps. 14:230–41.

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Zwahlen F. COST Action 620 – Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – Final report. EU Publications Ofce 2004 (OPOCE).

Ghosh, R., Sutradhar, S., Mondal, P., Das, N., 2021. Application of DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability: a study on Birbhum district, West Bengal, India. Modeling Earth Systems and Environment. 7: 1225-1239.

Foster, SSD. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden W and van Waegeningh HG editors. 1987. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Delft: TNO Committee on Hydrological Research. 69–86.

Kijsipongse, E., U-ruekolan, S., Ngamphiw, C., Tongsima, S., 2011. Efcient large Pearson correlation matrix computing using hybrid MPI/CUDA. In: 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). Nakhonpathom, Thailand. 237-241.

Khosravi, kh., Sartaj, M., T.-C. Tsai, F., P. Singh, V., Kazakis, N., M. Melesse, A., Prakash, I., Tien Bui, D.,

Xiong, H., Wang, Y., Guo, X., Han, J., Ma, Ch and Zhang, X., 2022. Current status and future challenges of groundwater vulnerability assessment: A bibliometric analysis. Journal of Hydrology. 615: 128694.

Maqsoom, A., Aslam, B., Khalil, U., Ghorbanzadeh, O., Ashraf, H., Tufail, R.F., Farooq, D., Biaschke. T., 2020. A GIS-based DRASTIC Model and