

ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان‌های کارستی ماراب با استفاده از مدل RISKE و تحلیل سری زمانی

شکور سلطانی (Email: shakoursoltani@ut.ac.ir)

دکتری ژئومورفولوژی، وزارت نیرو



ایثار نورایی صفت*

دانشجوی کارشناسی ارشد آموزش محیط زیست، دانشگاه تهران

طاهر ولی‌پور (Email: ta.valipour68@yahoo.com)

دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی

عبدالکریم ویسی (Email: veysi@ut.ac.ir)

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

احمد عباسیان (Email: Geo_ahmadi@yahoo.com)

کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۶)

چکیده

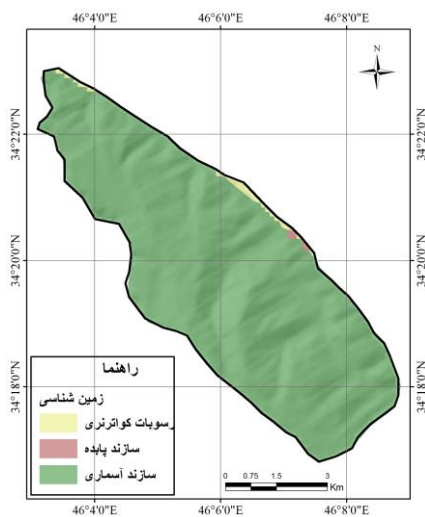
ارزیابی آسیب‌پذیری و خطر آلودگی، اقدامی مهم در مدیریت منابع آب کارست است. توسعه‌یافته بودن کارست در زاگرس، فراهم بودن شرایط طبیعی در منطقه و فعالیت‌های انسانی در محدوده آبخوان‌ها، سبب شده که انتشار آلودگی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی آبخوان‌های زاگرس از نظر کیفی باشد. هدف این پژوهش، ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان ماراب در غرب استان کرمانشاه در برابر انتشار آلودگی است. مدل RISKE با ارزیابی پنج پارامتر سنگ مادر آبخوان، میزان نفوذ، نوع خاک، توسعه کارست و ایبی کارست به ارزیابی و بهینه‌بندی آسیب‌پذیری سطوح کارستی می‌پردازد. از روش‌های آماری تک‌متغیره خودهمبستگی برای ارزیابی توسعه شبکه درونی کارست آبخوان ماراب استفاده شد. در نهایت با تحلیل نتایج این دو روش، میزان آسیب‌پذیری آبخوان تحلیل شد. نتایج مدل RISKE نشان‌دهنده وجود سه پهنه آسیب‌پذیری در سطح آبخوان است که به ترتیب طبقه متوسط، کم و زیاد، ۵۷/۵، ۳۷/۷ و ۴/۸ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. طبقات آسیب‌پذیری و مساحت آنها بیان‌کننده آسیب‌پذیری متوسط آبخوان ماراب در برابر انتشار آلودگی است. مناطق با آسیب‌پذیری زیاد در محدوده فروچاله‌ها و پلزه‌ها قرار دارد. نتایج تابع خودهمبستگی نشان داد که آبخوان ماراب دارای رفتار هیدرودینامیکی چندگانه است و دو نوع جریان سریع و پایه در آبخوان وجود دارد. بر این اساس می‌توان گفت به علت وجود جریان سریع در آبخوان و توسعه ژئومورفولوژی کارست سطحی، امکان انتشار آلودگی در آبخوان وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ماراب، آسیب‌پذیری، آلودگی، خودهمبستگی، مدل ریسک.

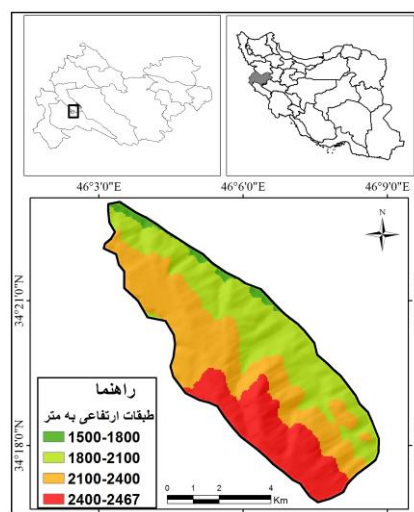
مقدمه

در مناطق خشک و نیمه خشک، آب عامل بسیار مهمی در توسعه در آینده به شمار می‌رود [۵]. ارزیابی کمی و کیفی منابع آب کارست و حفاظت از آنها در طی دو دهه گذشته، در بسیاری از جوامع در اولویت قرار گرفته است [۲۱]. آبخوان‌های کارستی به علت درز و شکاف‌های زیاد و ویژگی‌های خاص ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی در معرض آلودگی قرار دارند. مخاطرات مربوط به منابع بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی به طور عمده ناشی از فعالیت‌های انسانی است [۶]. حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب کارست است [۲]. در سال‌های اخیر، جامعه علمی جهان، حساسیت زیادی به آلودگی منابع آب زیرزمینی نشان داده و در نتیجه اقدامات زیادی در زمینه مدیریت زیست‌محیطی برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است [۱۱]. یکی از راهکارهای مهم در مدیریت منابع آب کارست، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی است که به عنوان یک رویکرد علمی به منظور حفظ منابع آب زیرزمینی، اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ مطرح شد [۱]. تهیه نقشه آسیب‌پذیری، امکان شناسایی منابع آب زیرزمینی در معرض خطر آلوده شدن را فراهم می‌کند. این رویکرد، به علت پیشرفت در مدل هیدرولوژیکی و GIS در طول دهه گذشته بهبود چشمگیری داشته است [۱۴]. تهیه نقشه آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نقش مهمی در مدیریت علمی، بهره‌برداری بهینه و جلوگیری از آلودگی دارد و نهادهای مختلف دولتی و مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد در حفظ کیفیت منابع آب زیرزمینی و شناخت مناطق حساس به آلودگی، از آن بهره‌گیرند. در طول ۲۰ سال گذشته منابع آب کارستی زاگرس شمال غربی از لحاظ کمی و کیفی تحت فشار عوامل طبیعی همچون خشکسالی و آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی بوده است. آبخوان ماراب بخشی از کوهستان نوا است. حجم خروجی سالانه از آبخوان کارستی ماراب در حدود ۲۰ میلیون متر مکعب بوده و این آبخوان منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی روستاهای اطراف خود است. با توجه به نقش حیاتی این آبخوان در زندگی جوامع انسانی اطراف خود، بررسی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی به منظور مدیریت علمی آبخوان، ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ماراب با استفاده از مدل RESKE و بررسی توسعه شبکه درونی کارست برای ارزیابی انتشار آلودگی در آبخوان با استفاده از تحلیل سری زمانی است. مدل RISKE با استفاده از پنج پارامتر لیتولوژی، نفوذ، خاک، توسعه یافتگی کارست و اپی کارست به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی

می‌پردازد. روش RISKE مبتنی بر روش EPIK و اولین روش اختصاصی مرتبط با کارست است [۱۴]. روش EPIK با هدف ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری منابع آب کارست ارائه شد [۷]. EPIK مخفف چهار پارامتر اپی کارست (E)، پوشش حفاظتی (P)، شرایط نفوذ (I)، و درجه توسعه شبکه کارست (K) است. محققان مختلفی از این مدل‌ها به‌عنوان مدل مؤثر در ارزیابی پتانسیل آلودگی منابع آب کارست در نقاط مختلف استفاده کرده‌اند [۱۴، ۱]. تحلیل سری‌های زمانی با استفاده از روش تک‌متغیره مشخص‌کننده ساختار ویژه و منحصر به فرد هیدروگراف است [۱۳]. شناخت تنوع مکانی-زمانی دبی چشمه در سیستم‌های کارستی به شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی و ساختار آبخوان، مدیریت مصرف آب و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلاینده‌ها منجر می‌شود [۱۸]. محققان مختلفی در نقاط مختلف جهان از تحلیل سری‌های زمانی برای ارزیابی عملکرد آبخوان‌های کارستی بهره گرفته‌اند [۱۹، ۱۷، ۱۶، ۳]. آبخوان ماراب در غرب استان کرمانشاه منطبق بر بخش غربی تاق‌دیس نوا، بین عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}40'$ تا $34^{\circ}28'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ}14'$ تا $46^{\circ}04'$ شرقی واقع شده است (شکل ۱). از نظر چینه‌شناسی آبخوان مورد مطالعه در سازند آهکی دولومیتی آسماری-شهبازان با سن ائوسن-لیگوسن و سازند پابده واقع شده است (شکل ۲). میانگین بارش سالانه منطقه ۶۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه $12/8$ درجه سانتی‌گراد است. منطقه به‌علت دارا بودن یک فصل خشک مشخص دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه

روش‌شناسی

این پژوهش یک تحقیق کاربردی مبتنی بر روش‌های میدانی، کتابخانه‌ای، آماری و مدلسازی RISKE است. نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه خاک ۱:۲۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای IRS سال ۲۰۰۲، آمار ایستگاه باران‌سنجی پاتاق و هیدرومتری چشمه ماراب وزارت نیرو به‌عنوان داده‌های اصلی تحقیق به‌کار گرفته شدند. از روش کریمی و همکاران [۱۵]، $A=Q/P.I$ برای تعیین مساحت آبخوان استفاده شد. در این روش A مساحت حوضه آبخیز (کیلومتر مربع)؛ Q حجم تخلیه سالانه به میلیون متر مکعب؛ P بارش سالانه به متر؛ و I ضریب تغذیه بدون بعد بین ۰ تا ۱ است که توسط بازدیدهای میدانی و بررسی ژئومورفولوژی کارست تخمین زده می‌شود. لایه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و خاک به‌عنوان داده‌های پایه به نرم‌افزار ArcGIS انتقال یافت و لایه‌های مورد نیاز تهیه شد. در طی عملیات میدانی، لندفرم‌های کارستی حوضه شناسایی و ژئومورفولوژی کارست منطقه، تحلیل شد و مناطق از نظر توسعه کارستی طبقه‌بندی و در نهایت نقشه توسعه کارست برای امتیازدهی به عوامل K و E ترسیم شد (شکل ۶). مدل RISKE مدل شاخص ارائه‌شده برای مطالعه و شناخت آسیب‌پذیری منابع آب کارست با ترکیب چندین لایه موضوعی است که در اصل به‌منظور همپوشانی صحیح لایه‌های اطلاعاتی به‌کار می‌رود. شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان یک ترکیب خطی از عوامل نشان داده می‌شود تا امکان محاسبات با استفاده از GIS وجود داشته باشد. در این روش حساسیت منابع کارستی به آلودگی با استفاده از پنج معیار سنگ آبخوان (R)، نفوذ (I)، خاک (S)، توسعه کارست (K) و اپی کارست (E) صورت می‌گیرد و به هر کدام از آن‌ها با توجه ویژگی آبخوان مورد مطالعه رتبه ۱ تا ۴ اختصاص داده می‌شود. آسیب‌پذیری نهایی در مدل ریسک با استفاده از شاخص I_g به‌عنوان مجموع وزن همپوشانی پنج لایه محاسبه می‌شود:

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \gamma K_l + \varepsilon E_m \quad (1)$$

در این فرمول (I_g) شاخص جامع آسیب‌پذیری، $\varepsilon, \gamma, \delta, \beta, \alpha$ میزان وزن هر یک از معیارها و R_i, I_j, S_k, K_l معیارهای مورد نظر است. بعد از محاسبه رتبه هر عامل باید آنها را در ضریب‌های یادشده ضرب کرد. مقدار این ضریب‌ها از نسبت اهمیت آنها به یکدیگر به‌دست می‌آید. بدین منظور مقدار وزن هر یک از ضریب‌ها براساس مدل زوجی^۱ به‌دست آمد و با همپوشانی لایه‌های

1. AHP

اطلاعاتی، معیارهای پنج‌گانه شاخص جامع آسیب‌پذیری آبخوان ماراب محاسبه شد. با استفاده از اهمیت نسبی معیارها $I > E = K > R = S$ نقشه آسیب‌پذیری تهیه می‌شود. در نهایت با استفاده از شاخص F (شاخص میزان حفاظت) برای تمامی نقاط منطقه محاسبه شد [۸، ۱۲، ۱۴].

خودهمبستگی: روش خودهمبستگی مقایسه سری زمانی دبی با خود دبی و ابزاری برای شناسایی تغییرات چرخه‌ای آن است و از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (Z_t - Z)(Z_{t+k} - Z) \quad (2)$$

$$R_k = \frac{C_k}{C_0} \quad (3)$$

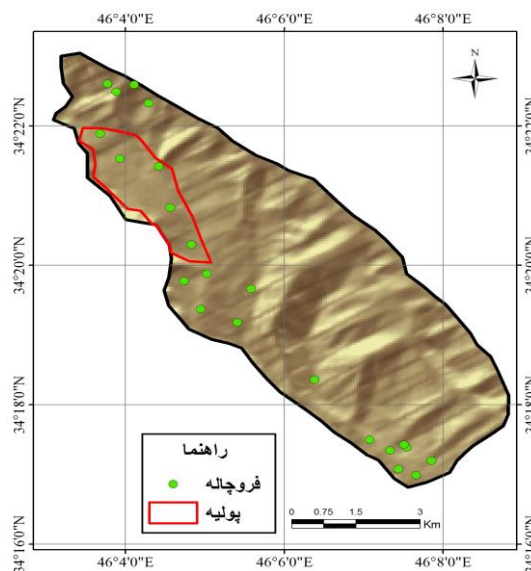
در این رابطه‌ها: C_k اتوکوارینس، C_0 واریانس، R_k ضریب خودهمبستگی، k وابسته به دوره و N تعداد دوره‌های مشاهداتی است. نمودار نمایش‌دهنده خودهمبستگی کورلوگرام نامیده می‌شود. ترسیم R_k در برابر k به تهیه کورلوگرام منجر می‌شود. در نهایت نقشه نهایی آسیب‌پذیری سطحی با نتایج خودهمبستگی و توسعه شبکه کارست درونی با هم تطبیق داده شد تا دید جامعی از آسیب‌پذیری آبخوان حاصل آید.

بحث

ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی آبخوان ماراب

در سطح تاقدیس نوا و حوضه تغذیه‌کننده آبخوان ماراب اشکال کارستی توسعه‌یافته همچون فروچاله‌ها، پلژه‌ها، غارها، دره عمیق کارستی و انواع کارنها وجود دارد. شکل ۳ نقشه فروچاله‌ها و پلژه‌های برداشت‌شده در بازدیدهای میدانی را در حوضه آبرگیر چشمه ماراب نشان می‌دهد.

نوع تغذیه آبخوان مورد مطالعه به علت عدم رخنمون سازندهای دیگر در سطح تاقدیس و جاری نشدن آب از سطح سازندهای غیرکارستی از نوع خودزا است. در آبخوان ماراب تغذیه به دو صورت منتشر از طریق درزه و شکاف‌ها و کارنها و متمرکز از طریق فروچاله‌ها انجام گرفته و بیشتر تغذیه آبخوان به صورت منتشر است. مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های ماراب بر مبنای داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی سال آبی (۱۳۸۳-۱۳۸۴) و براساس روش کریمی و همکاران [۱۵]، ۴۹ کیلومتر مربع برآورد شد (جدول ۱). با توجه به وجود فروچاله‌ها و اپی کارست توسعه‌یافته ضریب نفوذ آبخوان کارستی ماراب ۰/۷۵ برآورد شد. بر مبنای داده‌های دوره آماری (۱۳۹۰-۱۳۷۰) حداکثر دبی چشمه ماراب در اردیبهشت و حداقل دبی آن در شهریور بوده و ضریب تغییرات دبی این چشمه ۱/۴۱ است.



شکل ۳. نقشه پلژه و فروچاله‌های حوضه آبخیز چشمه ماراب

جدول ۱. ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه ماراب

چشمه	دبی متوسط	دبی ماکزیمم	دبی مینیمم	دبی سالانه ^۱	ضریب نفوذ	بارش	مساحت حوضه آبخیز چشمه
ماراب	۷۰۰	۱۲۶۸	۳۲۷	۲۲/۰۷	۰/۷۵	۶۰۰	۴۹

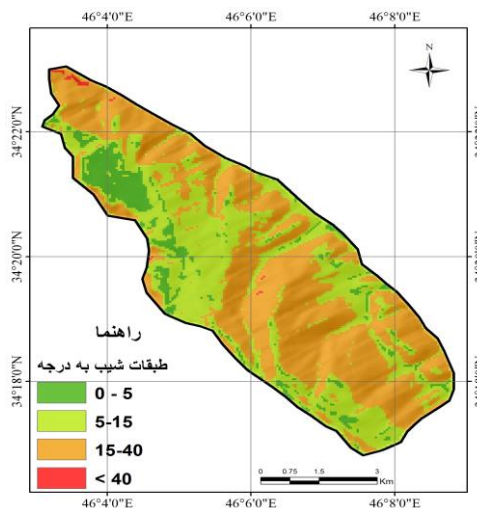
- عامل سنگ آبخوان: R

برای ارزیابی معیار R و تهیه لایه ی لیتولوژی آبخوان از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ استفاده شد (شکل ۲). بر این اساس به سازندهای آهکی به دلیل نفوذپذیری زیاد به علت وجود درز شکاف و توسعه کارست امتیاز بیشتر، و به سازندهای غیر کارستی با نفوذپذیری کم امتیاز کمتری اختصاص داده شد. به سازند آهکی آسماری- شهبازان به عنوان سنگ مادر آبخوان ماراب امتیاز ۳ و به سازندهای پابده (مارن) و نهشته‌های کواترنری امتیاز ۱ اختصاص داده شد (شکل ۲).

۱. حجم کل آبدهی سالانه‌ی چشمه به میلیون متر مکعب

I - عامل نفوذپذیری:

با توجه به مبانی نظری، شیب توپوگرافی و توسعه‌یافتگی کارست، دو عامل تأثیرگذار بر میزان و چگونگی نفوذند [۱۰]، به عبارت دیگر هر چه شیب کمتر باشد، جریان رواناب کمتر و در نتیجه نفوذ بیشتر است. از طرف دیگر هر چه کارست توسعه‌یافته‌تر و تعداد فروچاله‌ها زیادتر باشد، نفوذ آب بیشتر و سریع‌تر صورت می‌گیرد. به منظور امتیازدهی به عامل نفوذ، نقشه شیب منطقه تهیه (شکل ۴) و با نقشه توسعه کارست منطقه تطبیق داده شد و براساس میزان شیب و وجود لندفرم‌های کارستی، امتیاز مورد نظر اختصاص داده شد (جدول ۲). به پلژه‌های رأس تاقدیس به علت شیب کمتر و کارست توسعه‌یافته‌تر و وجود لندفرم‌هایی همچون فروچاله‌ها، بیشترین امتیاز؛ و به نواحی پرشیب بدون مورفولوژی کارست کمترین امتیاز اختصاص داده شد.



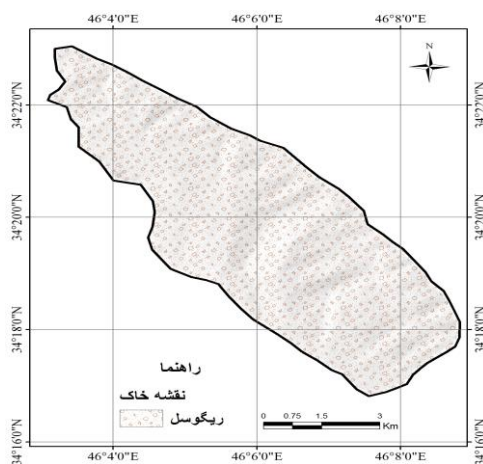
شکل ۴. نقشه شیب منطقه

جدول ۲. امتیازدهی به پارامتر نفوذ

امتیاز	مورفولوژی کارست	میزان شیب
۳	فاصله ۰ - ۱۰۰ متری شافت	شیب کم ۰-۵ درصد
۲	پلژه، سینک‌هول	شیب متوسط ۵-۱۵ درصد
۱	مناطق با مورفولوژی آشکار کارست	شیب زیاد ۱۵-۴۰ درصد
۰	مناطق بدون مورفولوژی کارست	شیب خیلی زیاد ۴۰ درصد >

– عامل خاک: S

به منظور وزن دهی به معیار خاک از نقشه خاک استان کرمانشاه به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شد. خاک منطقه مورد مطالعه از نوع ریگسول است که دارای بافت درشت، با درصد به نسبت زیادی از شن و سنگ مادر آهکی و کاربری جنگل است که به علت شیب زیاد عموماً کم ضخامت است (شکل ۵). براساس نوع خاک، سازند زیرین آن و کاربری اراضی به این عامل امتیاز داده شد و امتیاز ۴ به خاک ریگسول اختصاص یافت.



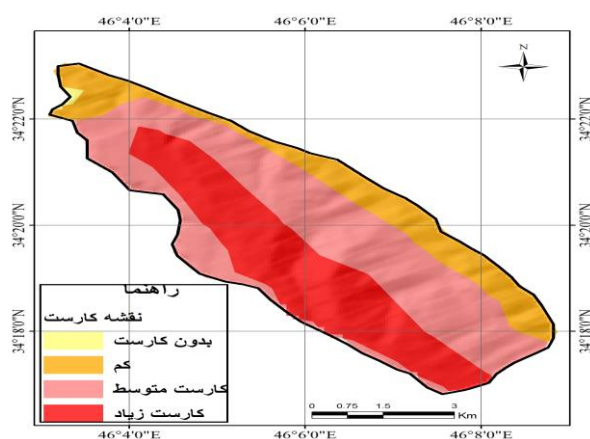
شکل ۵. نقشه خاک منطقه

– عامل توسعه کارست: K

توسعه کارست دارای پیامدهایی برای آسیب پذیری آبخوان‌های کارستی به صورت انتقال سریع آب‌های آلوده به زیر زمین است [۴]، به طوری که هر چه کارست توسعه یافته تر باشد، تماس آب نفوذی با سطح سنگ کمتر و نفوذ سریع تر است و در نتیجه آلودگی بیشتر و سریع تر به آبخوان کارستی منتقل می‌شود. برای اختصاص امتیاز به این عامل از نقشه پهنه بندی کارست منطقه استفاده شد (شکل ۶). نقشه توسعه کارست براساس فروچاله‌ها و پلزه‌ها ترسیم شده است (شکل ۳). براساس نقشه توسعه کارست به رأس تاقدیس که دارای کارست توسعه یافته بود و لندفرم‌هایی همچون فروچاله‌ها و پلزه‌ها در آن واقع شده‌اند، بیشترین امتیاز اختصاص داده شد (جدول ۳).

جدول ۳. امتیاز لایه کارست

امتیاز	کارست
۰	منطقه بدون کارست
۱	کارست کم
۳	کارست متوسط
۴	کارست زیاد



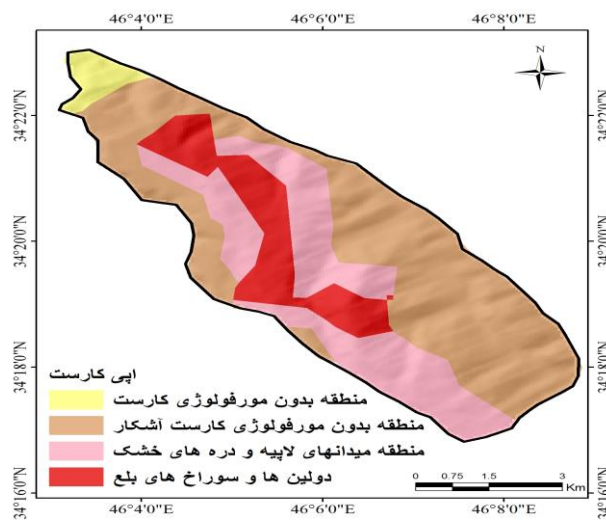
شکل ۶. نقشه تحول کارست

E - معیار اپی کارست:

در حال حاضر ده متر اولیه سطح کارست که تحت تأثیر قدرت انحلالی آب باران است، منطقه اپی کارست شناخته شده است. اپی کارست فوقانی‌ترین لایه سنگ‌های کارستی شده است که درزه و شکاف‌های آنها در اثر فرسایش شیمیایی گسترش پیدا کرده است و امکان نفوذ سریع و ذخیره‌سازی مقدار زیادی آب را دارد [۱۹]. ضخامت این لایه کارستی ممکن است بین چندین سانتی‌متر تا چندین متر باشد و گسترش جانبی آن همیشه پیوسته نیست. برای امتیازدهی به اپی کارست در منطقه از نقشه توسعه کارست منطقه استفاده شد (شکل ۷). بیشترین امتیاز (۳) به رأس تاقدیس که دارای اپی کارست توسعه‌یافته و لندفرم‌هایی همچون فروچاله‌ها بود اختصاص داده شد. به دره‌های کارستی منطقه که در سازند آسماری شهبازان گسترش یافته‌اند امتیاز ۲ و به نواحی‌ای که دارای مورفولوژی کارست مشخصی نیستند، اما از نظر سنگ‌شناسی از آنهاک تشکیل شده‌اند امتیاز ۱ اختصاص شد (جدول ۴).

جدول ۴. امتیاز اپی کارست

امتیاز	ویژگی معیار	اپی کارست
۰	منطقه بدون مورفولوژی کارست	E0
۱	منطقه بدون مورفولوژی کارست آشکار	E1
۲	مناطق کارنی و دره های خشک	E2
۳	دولین و سوراخ های بلع	E3
۴	شفت یا چاه های عمودی	E4



شکل ۷. نقشه اپی کارست منطقه

محاسبه شاخص جامع آسیب پذیری

پس از اختصاص دادن امتیاز به پنج پارامتر مؤثر و طبقه بندی آنها، لایه های اطلاعاتی به رستر تبدیل شدند. در ادامه ضریب های α , β , δ , γ , ϵ با توجه به اهمیت نسبی معیارها و براساس رابطه $I > E = K > R = S$ محاسبه و شاخص میزان حفاظت F به شرح زیر محاسبه شد:

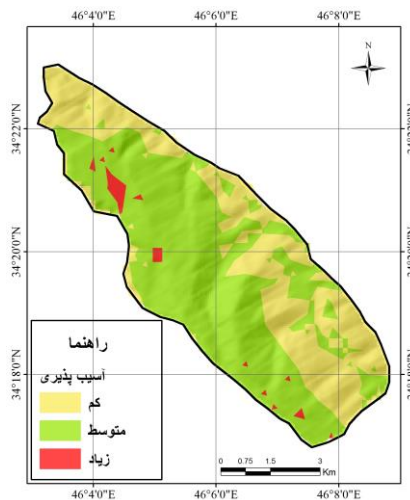
$$F = 0.09R + 0.05I + 0.08S + 0.16K + 0.18E \quad (4)$$

با محاسبه شاخص F ، همپوشانی و جمع لایه های اطلاعاتی، نقشه نهایی آسیب پذیری منطقه ترسیم شد (شکل ۸). میزان آسیب پذیری منطقه بین 0.3 تا $3/45$ به دست آمد که در نهایت به

سه طبقه کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند. جدول ۵ مساحت و درصد هر یک از طبقات سه‌گانه را در سطح آبخوان ماراب نشان می‌دهد.

جدول ۵. مساحت پهنه‌های نقشه آسیب‌پذیری آبخوان ماراب

درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	طبقه آسیب‌پذیری	شاخص ریسک
۳۷/۷	۱۸/۵	کم	۰/۳-۲
۷۵/۵	۲۸/۲	متوسط	۲-۳
۴/۸	۲/۳	زیاد	۳-۳/۴۵

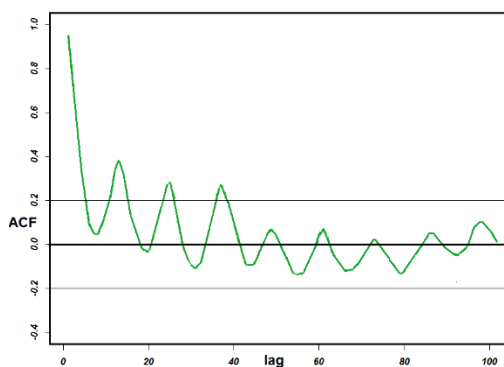


شکل ۸. نقشه نهایی آسیب‌پذیری

تابع خودهمبستگی

مانجین مدت زمان لازم برای افت کرولوگرام به زیر $R_k = 0/2$ را اثر حافظه نامید [۲۰]. به نظر مانجین «حافظه» زیاد یک سیستم نشان‌دهنده عدم توسعه شبکه‌ای و مجراهای کارستی در یک آبخوان (ذخیره زیاد) است، اما میزان «حافظه» کم نشان‌دهنده ذخیره‌سازی کم در آبخوان و توسعه زیاد کارست آن است. بررسی‌ها نشان داده که توزیع مکانی و زمانی بارش و نسبت بین نفوذ منتشر و متمرکز تأثیر زیادی بر شکل کرولوگرام دارد [۹]. در واقع شکل کرولوگرام به میزان توسعه سیستم کارستی مرتبط است. کرولوگرام چشمه ماراب براساس دبی‌های ماهانه دوره زمانی

(۱۳۷۰-۱۳۹۰) ترسیم شده است. کرولوگرام چشمه ماراب غیریکسان و دارای رفتار چندگانه است. بخش اول کرولوگرام به سرعت و در عرض ۱۰ روز کاهش می‌یابد و به کمتر از ۰/۲ متر مکعب بر ثانیه می‌رسد (شکل ۹) و نشان‌دهنده وجود جریان سریع در مجراها و نوسانات کرولوگرام در lag ۱۵ تا ۴۰ نشان‌دهنده جریان نیمه‌سریع در شکستگی‌ها و از lag ۴۰ به بعد شکل یکنواخت می‌یابد و حاکی از ذخیره دینامیکی و وجود جریان پایه در آبخوان است. این مدل رفتار تابع خودهمبستگی، چندگانگی سیستم کارست در آبخوان ماراب را نشان می‌دهد و حاکی از وجود جریان سریع و پایه در آبخوان است. جریان سریع می‌تواند نقش مهمی در انتشار آلودگی در آبخوان داشته باشد و تأثیر نفوذپذیری طبیعی آبخوان را کاهش دهد.



شکل ۹. کرولوگرام تابع خودهمبستگی چشمه ماراب

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری سطحی آبخوان کارستی نوا از مدل RISKE متشکل از پنج پارامتر محیطی استفاده شد. بعد از امتیازدهی به عوامل پنج‌گانه و تبدیل آنها به رستر با استفاده از شاخص میزان حفاظت F، میزان شاخص RISKE بین ۰/۳ تا ۳/۴۵ محاسبه و آسیب‌پذیری به سه گروه کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. توزیع فضایی کلاس‌های آسیب‌پذیری نقشه نهایی نشان می‌دهد که ۳۷/۷ درصد مساحت منطقه دارای آسیب‌پذیری کم است، ۵۷/۵ درصد مساحت منطقه در طبقه متوسط جای دارد و ۴/۸ درصد از مساحت منطقه در طبقه زیاد آسیب‌پذیری واقع شده و در مجموع ۶۲/۳ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط و بالاتر است. این امر حاکی از آسیب‌پذیری متوسط آبخوان ماراب به آلودگی است. طبقات با آسیب‌پذیری متوسط و زیاد در پلژه‌ها و پهنه‌های کارستی هموار رأس تاقدیس واقع

شده‌اند و در این قسمت لندفرم‌هایی همچون فروچاله‌ها و اپی کارست توسعه‌یافته وجود دارد. طبقه با آسیب‌پذیری کم در نواحی پرشیب و یال‌ها واقع شده که در این نواحی لندفرم توسعه‌یافته کارستی وجود ندارد، اپی کارست کم ضخامت و قدرت ذخیره‌سازی آن کم است. ارزیابی تابع خودهمبستگی نشان‌دهنده وجود جریان سریع و پایه در آبخوان است، اما غلبه با جریان پایه است. جریان سریع نشان‌دهنده نفوذ سریع از طریق فروچاله‌ها و اپی کارست توسعه‌یافته در نواحی مرتفع حوضه آبرگیر بوده و غلبه جریان پایه نشان‌دهنده نفوذ منتشر در سایر نواحی حوضه آبرگیر است. در واقع می‌توان انطباقی نسبی بین نتایج پهنه‌بندی سطحی و تابع خودهمبستگی پیدا کرد. به طوری که نواحی با آسیب‌پذیری زیاد و تا حدی متوسط دارای نفوذ بیشتر و سریع‌ترند و چون این نواحی دارای مجراهای کارستی‌اند، انتشار و انتقال آلودگی سریع‌تر است و آبخوان این نواحی هم به دلیل توسعه کارست سطحی و وجود جریان سریع در کارست درونی آسیب‌پذیر است. توسعه کمتر کارست سطحی در سایر نواحی حوضه آبرگیر آبخوان سبب نفوذ منتشر (پراکنده) می‌شود که این امر، قدرت خودپالایی طبیعی آبخوان را افزایش می‌دهد و چون جریان پایه غلبه دارد، انتشار و انتقال آلودگی کمتر رخ می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت توسعه کارست سطحی و توسعه‌یافته بودن شبکه کارست درونی، عوامل آسیب‌پذیری آبخوان ماراب به‌شمار می‌روند.

منابع

- [1]. Adams, B. and S. S. D. Foster. 1992. "Land-surface zoning for groundwater protection." *Journal of Institution of Water and Environmental Management* 6: 312-320.
- [2]. A frasiabian, A.(2007). The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environ Geol*, 52:673-677.
- [3]. Angelini, P., 1997, Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in central Italy, *Hydrol* , Vol 42(3), PP:425-438.
- [4]. Cooper, A.H., Farrant A.R. & Price S.J., 2011 - The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain. *Geomorphology*, 134: 118-131.
- [5]. de Jong, C., Cappy, S. and Funk, D.(2008). A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Engineering Geology* 99, 228-238.
- [6]. De Ketelaere, D., Hotzl, H., Neukum, C., Civita, M. and Sappa, G.(2004). Hazard analysis and mapping. In: Zwahlen F, editor. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*, EUR 20912. Brussels7

- European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; p. 86–105.
- [7]. Doerfliger, N.(1996). Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. The 5th cycle, Universite' de Neuchâtel, Suisse, 292 pp.
- [8]. Eastman, J.,R., Kyem, P.A.K. and Toledano, O.J.(1993). A Procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives. In: EGIS'93, pp. 438–447.
- [9]. Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Kiraly, L., Rossier, Y., 1997. Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system, Hydrology, Vol, 202, 244–262.
- [10]. Ford, D. C., Williams, P., 2007, "Karst Hydrogeology and Geomorphology", John Wiley & Sons, 576 pp.
- [11]. Gerth, J., Förstner, U. (2004) Long-term forecast: Key to groundwater protection. Environmental Science and Pollution Research 11(1):49-56.
- [12]. Gogu, R. and Dassargues, A. (1998). Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer. In: Workshop: Vulne' rabilite' et rotection des Eaux Karstiques. Neuchâtel (Suisse), vol. 37. American Water Resources Association, pp. 139–408. 1.
- [13]. Goldscheider, N., Drew, D., 2004, Methods in Karst Hydrogeology, Taylor & Francis.
- [14]. Kovacic, G., 2009, Hydrogeological study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia) by means of a time series analysis, ACTA CARSOLOGICA, Vol, 39/2, Pp:201–215.
- [15]. Karim, H. Raeisi, E. Bakalowicz, M. (2004). Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach, Hydrogeology Journal, Volume 13, Issue 5-6, pp 787-799.
- [16]. Lee, JY., Lee, KK., 2002, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, Hydrol, Vol, 229, PP.190–201.
- [17]. Liu, L., Chen, X., Xu, G., Shu, L., 2011, Use of hydrologic time-series data for identification of hydrodynamic function and behavior in a karstic water system in China, Hydrogeology, Vol 19, PP: 1577–1585.
- [18]. Mangin, A., 1971, Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique, Annales de spéléologie, Vol 28(1), PP. 21-40.
- [19]. Mangin, A., 1975, Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon.
- [20]. Mangin, A., 1982. L'approche systemique du karst, consequences conceptuelles et methodologiques. Reunion monografica sobre el karst, Larra. 141-157.
- [21]. Waele, J., Plan., Lukas. and Audra, PH.(2009). Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. Geomorphology, vol 106, 1–8.
- [22]. Zhang C, Yuan DX, Cao JH (2005) Analysis of environmental sensitivities of a typical dynamic epikarst system at Nongla monitoring site, Guangxi, China. Environ Geol 47:615–619