



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۴۷۰-۴۵۹)

[DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.334823.669145](https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.334823.669145)

(مقاله علمی - پژوهشی)

Assessment of Spring Quality Privacy with the Combined Approach of VESPA Vulnerability Index and MDHT Method

FARZANEH JAN MOHAMMADI¹, ROXANA MOGOUEI^{*2}, HAMID KARDAN MOGHADDAM^{1,3}

1. Department of Environment, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Environmental Planning, Management and Education, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran.

(Received: Nov. 30, 2021- Revised: Feb. 22, 2022- Accepted: March. 7, 2022)

ABSTRACT

Unsustainable development without considering regional planning can create adverse environmental effects, especially in karst water resources of a region from a qualitative point of view. Accordingly, in this study, a combination of two methods for determining spring vulnerability and qualitative zoning by MDHT method was used. This study was performed for three springs downstream of Seymareh Dam for a period of 5 years. The results showed that the value of vulnerability index in S1 spring was higher than the other two springs and the value was 150.4. Analysis of the results showed that the degree of vulnerability was an inverse function of spring discharge. By increasing the amount of discharge, the vulnerability index decreases. Considering the choice of MDHT method for qualitative zoning of the spring and the role of flow rate in determining the zoning scenario, the highest flow rate was related to S3 spring. The value of obtained MDHT index was also higher than the other two sources and the value of 417 has been calculated. The lowest flow rate was related to S1 spring and the MDHT index value was 14.75. The highest level is related to spring S1 and the lowest level is related to springs S2 and S3. The results show that the karst network of springs in the region is vulnerable, which affects the quality of these resources and sensitive areas of the region to develop exploitation are strongly associated with the risk of pollution.

Keywords: Vulnerability, Discharge, Karst, VESPA, MDHT

* Corresponding Author's Email: moogouei_roxana@yahoo.com

ارزیابی حریم کیفی چشمه با رویکرد تلفیق شاخص آسیب‌پذیری VESPA و روش MDHT (منطقه مورد مطالعه: چشمه‌های کارستی در حوضه سد سیمره)

فرزانه جان‌محمدی^۱، رکسانا موگوئی^{۲*}، حمید کاردان مقدم^۳

۱. گروه محیط‌زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳. پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶)

چکیده

توسعه ناپایدار بدون در نظر گرفتن آمایش منطقه‌ای می‌تواند اثرات نامطلوب محیطی بخصوص در منابع آب کارستی یک منطقه از نقطه نظر کیفی ایجاد کند. بر این اساس در این مطالعه با استفاده از تلفیق دو روش تعیین آسیب‌پذیری چشمه و حریم کیفی به روش MDHT، پهنه‌بندی حریم کیفی برای چشمه‌ها به عنوان خروجی سیستم کارستی انجام گرفت. این مطالعه برای سه دهه چشمه در پایین دست سد سیمره برای یک دوره پنج ساله انجام شده است. نتایج نشان داد که مقدار شاخص آسیب‌پذیری در چشمه S1 نسبت به دو چشمه دیگر بالاتر و مقدار ۱۵۰/۴ به دست آمده است. تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که میزان آسیب‌پذیری تابعی معکوسی از آبدهی چشمه بوده است. با افزایش میزان آبدهی شاخص آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. با توجه به انتخاب روش MDHT برای تعیین حریم کیفی چشمه و نقش میزان آبدهی در تعیین سناریو حریم، بیشترین میزان آبدهی مربوط به چشمه S3 بوده است. مقدار شاخص MDHT به دست آمده نیز نسبت به دو چشمه دیگر بیشتر و مقدار ۴۱۷ محاسبه شده است. کمترین میزان آبدهی نیز مربوط به چشمه S1 بوده که مقدار شاخص MDHT نیز ۱۴/۷۵ به دست آمد و بیشترین سطح و حریم مربوط به چشمه S1 و کمترین سطح حریم مربوط به چشمه‌های S2 و S3 است. نتایج نشان می‌دهد شبکه کارستی چشمه‌های منطقه دارای آسیب‌پذیری بوده که باعث می‌شود حریم کیفی این منابع تحت تأثیر قرار گرفته و پهنه‌های حساس منطقه برای توسعه بهره‌برداری به شدت با خطر آلودگی همراه شود.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، آبدهی، کارست، VESPA، MDHT.

مقدمه

باتوجه به روند نامناسب عرضه در مقابل تقاضا، روند بهره‌برداری از آن شدت گرفته است. تأمین آب حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان از این منابع بوده و این موضوع در شناخت و پتانسیل‌یابی بهره‌برداری مؤثر است (Kiaee and Javadi, 2021). کارست و سیستم کارست بیانگر وضعیت سنگ‌شناسی و هیدرولوژیکی در سازندهای انحلال‌پذیر نظیر سنگ‌های کربناته و تبخیری است که منجر به تشکیل محدوده‌هایی به نام آبخوان کارستی می‌شود (Karimi vardnjani, 2010). ایجاد آبخوان کارستی وابسته به پدیده‌های شکستگی‌ها و قابلیت انحلال توده سنگ مربوط می‌شود که در نتیجه آن یک سیستم آب زیرزمینی می‌تواند شکل بگیرد. این عوامل سبب می‌شود تا پتانسیل بهره‌برداری در این منابع بالا باشد و از طرفی نیز مشکلات کمی و کیفی نیز در آن به سرعت نمایان گردد؛ لذا اعمال مدیریت صحیح (کمی و کیفی) و ارائه برنامه‌ریزی‌های بلندمدت جهت بهره‌برداری مطمئن و

رشد و توسعه‌های انجام شده در جامعه امروزی باتوجه به افزایش تقاضای آبی در مقابل حجم منابع آب در دسترس سبب شده تا تعادل بین عرضه و تقاضای آبی به هم خورده و سبب تنش‌های آبی و در نتیجه بحران در تأمین آب گردد. این موضوع باعث شده تا متولیان تصمیم‌گیری در بخش آب کشور را به این موضوع سوق دهد تا استفاده از منابع آب جدید خصوصاً منابع کارست که در دهه‌های قبل کمتر مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند را به عنوان یک منبع جدید برای تأمین در نظر گیرند. این منابع با کمیت و کیفیت مناسب و دارا بودن پتانسیل مناسب برای بهره‌برداری در مناطق مختلف جهان مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند به طوری که این منابع به عنوان یکی از منابع استراتژیک و تجدیدپذیر جهت تأمین آب شناخته می‌شوند. بررسی‌های موضوعی در این زمینه نشان می‌دهد که استفاده از منابع آب در سازندهای کارستی

کیفی چشمه‌ها باشد؛ لذا باتوجه به اهمیت بهره‌برداری از چشمه‌های کارستی، بحث تعیین حریم کیفی مناسب برای این منابع آب بسیار مهم بوده که این مطالعه ارائه روشی مبتنی بر آسیب‌پذیری چشمه‌ها را در کنار روش ریاضی MDHT است؛ لذا این مطالعه با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری چشمه‌های پایین‌دست سد سیمره به منظور بهره‌برداری مناسب در سه دهانه چشمه با تعریف مناسب حریم کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند در پهنه‌بندی حریم کیفی چشمه‌ها با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای حفاظت و بهره‌برداری مناسب از این منابع آب بکار گرفته شود. همچنین نتایج به دست آمده می‌تواند یک ابزار تصمیم‌گیری در خصوص روش‌های حفاظت از منابع آب و دستورالعمل‌های مربوطه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

باتوجه به هدف این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری چشمه‌های پائین‌دست سد سیمره و تعیین حریم کیفی این منابع، روش پژوهش در چهار گام مطابق شکل (۱) تقسیم‌بندی می‌شود.

گام اول: بررسی روند تغییرات کمی و کیفی چشمه‌های منطقه (شامل آبدهی و پارامترهای کیفی: pH, EC, دما، دبی) باتوجه به سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون غیرپارامتریک من-کندال تحلیل انجام خواهد شد. این تحلیل هم برای داده‌های کمی و هم برای داده‌های کیفی انجام خواهد شد.

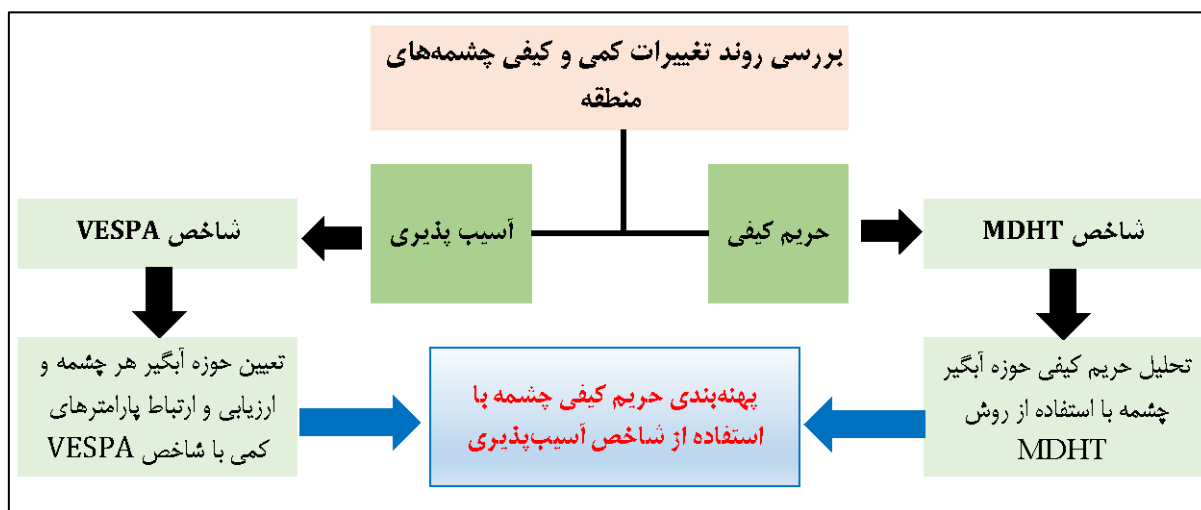
گام دوم: بررسی آسیب‌پذیری چشمه‌ها با استفاده از شاخص VESPA: آسیب‌پذیری چشمه به عنوان بخش خروجی یک سیستم کارستی با استفاده از شاخص VESPA مورد سنجش قرار می‌گیرد. در این شاخص آسیب‌پذیری چشمه نسبت به آلاینده‌ها محاسبه و در نتیجه میزان آسیب‌پذیری چشمه باتوجه به شرایط هیدرولوژیکی چشمه مشخص می‌گردد. این روش بر اساس تجزیه و تحلیل پاسخ‌های هیدروگراف چشمه با در نظر گرفتن فرآیند نفوذ در منطقه تغذیه است.

گام سوم: تعیین حوزه آبرگیر هر چشمه و ارزیابی و ارتباط پارامترهای کمی با شاخص VESPA: باتوجه به بررسی‌های میدانی و سازندهای زمین‌شناسی، موقعیت حوزه آبرگیر هر چشمه تعیین و ارتباط شاخص آسیب‌پذیری با وضعیت حوزه از نظر کاربری و مصارف ارزیابی می‌شود.

گام چهارم: تحلیل حریم کیفی حوزه آبرگیر چشمه با استفاده از روش MDHT: با استفاده از استاندارد روش MDHT و طبقه‌بندی آسیب‌پذیری هر چشمه در حوزه آبرگیر چشمه حریم

پایدار یکی از ملزومات استفاده از پتانسیل‌های منابع کارستی است. یکی از روش‌های مدیریت کمی و کیفی این منابع آب ارزیابی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی به عنوان نقطه بهره‌برداری یا خروجی این نوع از آبخوان‌ها است. یکی از روش‌های ارزیابی وضعیت بهره‌برداری از این منابع آب، تحلیل و بررسی آسیب‌پذیری است (Moghaddam et al., 2020). بررسی آسیب‌پذیری این منابع از نقطه نظر حساسیت به تأثیرات انسانی و طبیعی می‌تواند ارزیابی قابل قبولی از سیستم آب زیرزمینی و تأمین آب را ارائه دهد (Kardan moghaddam et al., 2017). مطالعات زیادی که از اوایل دهه ۹۰ میلادی تاکنون انجام شده‌اند، نشان داده‌اند که ارزیابی آسیب‌پذیری روشی قدرتمند و کم‌هزینه در شناسایی نواحی مستعد به آلودگی است. از طرف دیگر ارزیابی آسیب‌پذیری ابزار مهمی برای طرح‌های محیط زیستی و تصمیمات مدیریتی است (Javadi et al., 2020). آبخوان‌های کارستی به علت لایه نازک خاک، تمرکز جریان در اپی کارست و تغذیه متمرکز از حفره‌های بلعنده در معرض آلودگی قرار داشته که این در معرض قرار بودن سبب تسریع در انتقال آلودگی می‌شود. امروزه با رشد جمعیت و توسعه‌های متنوع انجام گرفته که باعث شده میزان بهره‌برداری از منابع آب افزایش و در اثر این افزایش بهره‌برداری حجم بار آلودگی نیز افزایش یابد؛ لذا تعیین میزان آسیب‌پذیری یک چشمه و تعریف یک محدوده یا حریم برای بهره‌برداری و حفاظت از این منابع بسیار ضروری است. مطالعه مختلف انجام شده نشان می‌دهد که یکی از شاخص‌های مناسب جهت ارزیابی آسیب‌پذیری چشمه، شاخص آسیب‌پذیری VESPA است (Gallebni et al., 2011). این شاخص بر اساس پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب در طی زمان مورد آنالیز قرار گرفته و نتایج آن به منظور طبقه‌بندی آسیب‌پذیری چشمه برای مصارف بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. باتوجه به آماده‌سازی سری زمانی پیوسته سالانه داده‌های چشمه، مطالعات در خصوص آسیب‌پذیری این منابع کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی نیز مطالعات Civita (۱۹۹۵) طبقه‌بندی حریم بهره‌برداری از منابع آب را در ۴ سناریو تعریف کرده است. این سناریوها بر اساس پتانسیل پخش آلودگی در حفاظت از چشمه‌های تقسیم‌بندی شده است. Javadi و همکاران (۲۰۱۹) با تلفیق شاخص آسیب‌پذیری چشمه و حریم کیفی، چارچوب مناسبی را برای تعیین حریم کیفی چشمه‌ها ارائه دادند. بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بحث آسیب‌پذیری چشمه‌ها مبتنی بر پارامترهای فیزیکی چشمه‌ها در طول یک دوره نمونه‌برداری درازمدت (حداقل یک ساله) می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد که نتایج آن می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای بحث تعیین حریم

کیفی هر چشمه در مظهر و حوزه آبخیز تعیین می‌شود.

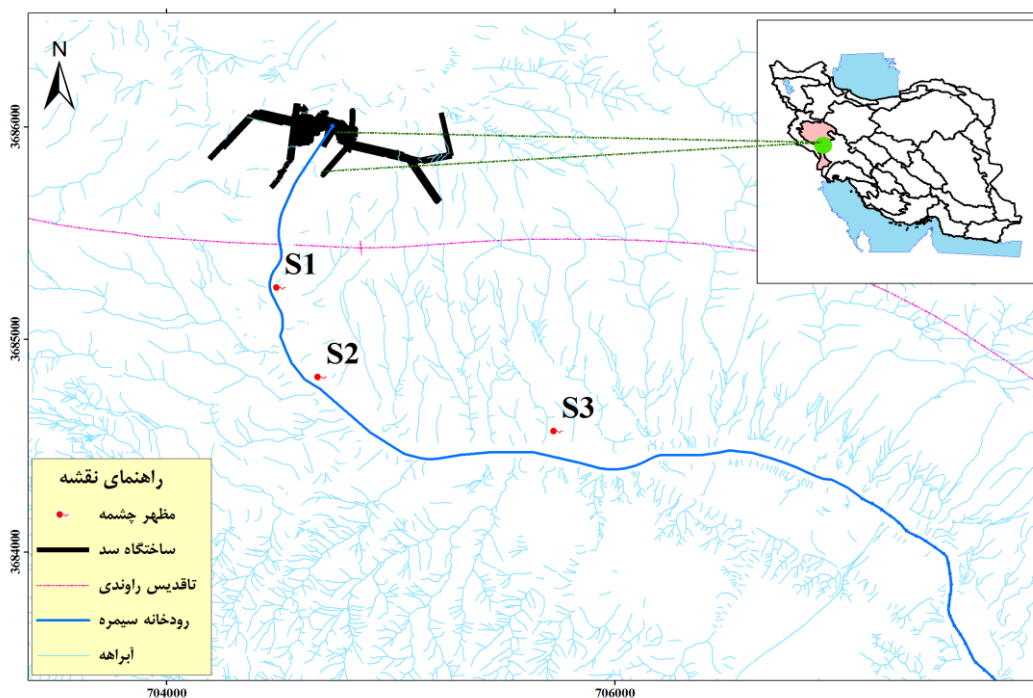


شکل ۱- روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

سزایی در برآورد حجم آب نشتی محتمل دارد. از سوی دیگر با شروع آبخیز سد، تغذیه آب زیرزمینی توسط آب دریاچه منجر به بالا آمدن تراز آب زیرزمینی در پی و تکیه‌گاه‌ها شده و از طرفی کیفیت آب در چشمه‌های پائین دست نیز تأثیرگذار است. در این مطالعه سه حلقه چشمه در پایین دست ساختگاه سد جهت ارزیابی آسیب‌پذیری مورد آنالیز قرار گرفته است. در شکل (۲) و (۳) موقعیت ساختگاه سد سیمره و سه چشمه انتخابی نشان داده شده است.

مجموعه سد و نیروگاه سیمره در غرب ایران در رشته‌کوه‌های زاگرس بر روی تاق‌دیس راوندی از اوایل دهه ۹۰ شمسی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. پی و تکیه‌گاه‌های سد بر روی سازند آهکی آسماری قرار دارد که از جمله معروف‌ترین سازندهای کارستی در ایران است. قبل از آبخیز، تخلیه آب‌های ورودی به تاق‌دیس از طریق رودخانه و چشمه‌هایی که بر روی یال جنوبی تاق‌دیس قرار گرفته است صورت می‌گرفت که اهمیت اندازه‌گیری و کنترل میزان دبی این چشمه‌ها هم‌زمان با آبخیز نقش به



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه و چشمه‌های انتخابی



ب- چشمه S2



الف- چشمه S1



ج- چشمه S3

شکل ۳- مظهر ۳ چشمه S1، S2 و S3 در منطقه مورد مطالعه

(۴) بیان شده‌اند (Galleani et al., 2011).

$$\text{Vespa index} = C(p) \cdot \beta \cdot \gamma \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\beta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\gamma = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_m} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Q_m = \sum_{i=1}^n Q(t) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این روابط t_0 زمان اندازه‌گیری که حداقل یک سال، Q_{\max} و Q_{\min} : دبی ماکزیمم و مینیمم تا زمان t_0 بر حسب لیتر در ثانیه، T_{\max} و T_{\min} دمای ماکزیمم و مینیمم تا زمان t_0 بر حسب سانتیگراد و Q_m دبی متوسط تا زمان t_0 بر حسب لیتر در ثانیه است. در نهایت بر اساس سه مقدار $C(p)$ ، β و γ شاخص نهایی VESPA محاسبه و بر اساس جدول (۱) تقسیم‌بندی و سطح آسیب‌پذیری مشخص می‌شود.

جدول ۱- مقادیر شاخص VESPA و سطح آسیب‌پذیری

بسیار زیاد	زیاد	متوسط	کم	آسیب‌پذیری
$V \geq 10$	$1 \leq V < 10$	$0.1 \leq V < 1$	$0 \leq V < 0.1$	شاخص VESPA

شاخص آسیب‌پذیری VESPA

شاخص VESPA به‌عنوان یک شاخص آسیب‌پذیری برای چشمه‌های مورد بهره‌برداری استفاده می‌شود. این شاخص به‌منظور ارائه روش توسعه‌یافته‌ای برای تعیین آسیب‌پذیری و مناطق حفاظتی جهت بهره‌برداری از منابع آب ارائه می‌گردد. در این روش ابتدا پاسخ‌های هیدروگراف چشمه به فرآیند نفوذ بررسی می‌گردد. تجزیه و تحلیل کیفی هیدروگراف و ارتباطات مشاهده شده بین سرعت جریان، دما و EC به‌عنوان تابعی از ورودی نفوذ، سبب نوع رفتار چشمه و پاسخ آن نسبت به انتقال آلودگی مشخص شود. این شاخص وضعیت آسیب‌پذیری چشمه را بیان می‌کند اما از آنجاکه آسیب‌پذیری چشمه تابعی از حوضه آبرگیر در بالادست خود است لذا تعیین آسیب‌پذیری حوضه یک چشمه نیز بسیار حائز اهمیت است.

مقدار شاخص آسیب‌پذیری VESPA به‌صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Galleani et al., 2011). در این رابطه مقدار $C(p)$ همبستگی (پیرسون یا اسپیرمن) بین مقدار هدایت الکتریکی و دبی تخلیه از چشمه را نشان می‌دهد. شاخص β به‌عنوان شاخص تغییرات درجه حرارت در بازه اندازه‌گیری دبی چشمه منظور می‌شود که به‌صورت رابطه (۲) ارائه می‌شود (Galleani et al., 2011). γ به‌عنوان فاکتور تخلیه چشمه‌ها معرفی می‌شود که به‌صورت تابعی از حداقل، حداکثر و میانگین دبی در طول دوره نمونه‌برداری می‌باشد که به‌صورت رابطه (۳) و

می‌رسد را در نظر می‌گیرد. در این روش چهار سناریوی پایه آلودگی مطابق جدول (۲) با دامنه سرعت جریان آب ارائه شده است.

جدول ۲- سناریوهای پایه خطر آلودگی

سناریو	A	B	C	D
MDHT (d)	MDHT < 5	5 ≤ MDHT ≤ 20	20 ≤ MDHT ≤ 50	MDHT > 50

در هر سناریوی آلودگی بر مبنای نوع بهره‌برداری فواصل تعریف شده برای حریم کیفی مطابق جدول (۳) تعریف شده است. این فواصل از محل چشمه و ساختمان آن یک حریم به فاصله D انتخاب و از انتهای آن به فاصله L به طرف بالادست حوضه آبرگیر چشمه و فاصله d به طرف پایین دست چشمه محدوده حفاظتی چشمه را تشکیل می‌دهد. بر اساس فواصل تعریفی مطابق شکل (۴) محدوده ترسیمی به صورت شماتیک برای فواصل طرح کنترل منطقه حفاظتی چشمه ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر پیشنهادی از D و d برای طرح کنترل کامل منطقه چشمه در وضعیت خطر بر اساس سناریوهای آلودگی (Civita- 1995)

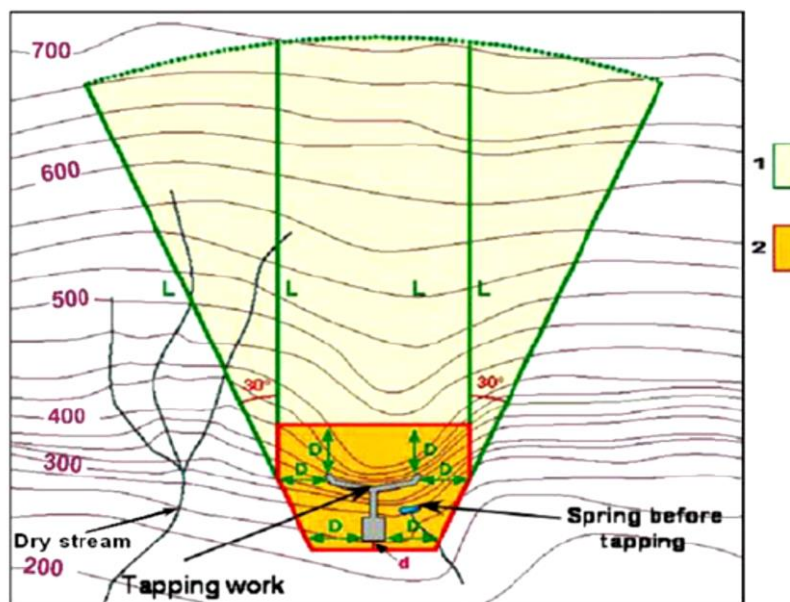
نوع بهره‌برداری	سناریو	D (m)	d (m)	L (m)
مستقیم	A	۴۰	۱۰	کل محدوده
	B	۳۰	۵	۲۰۰۰
	C	۲۰	۵	۴۰۰
	D	۱۰	۲	۲۰۰
آبخوان کامل	A	۳۰	۵	کل محدوده
	B	۳۰	۴	۲۰۰۰
	C	۱۵	۳	۴۰۰
	D	۱۰	۲	۲۰۰

مناطق حفاظتی با استفاده از روش MDHT

Civita (2008) به منظور تعیین حریم کیفی روش MDHT را که بر اساس زمان انتقال آلودگی در مسیر آبی، با استفاده از منحنی افت و یک سری فرمول‌های محاسباتی خصوصیات چشمه از جمله نرخ تخلیه، ظرفیت خالی، سرعت و زمان تجدیدپذیری ارائه داده است. در این روش زمان انتقال آلودگی مبنای تعریف سناریوهای خطر آلودگی چشمه است که بر اساس سرعت‌های مختلف جریان آب زیرزمینی تعریف می‌شود. این شاخص معادل حداکثر دبی تخلیه در نصف زمان در نظر گرفته شده که محدوده سرعت‌های معادل نیز برای آن ارائه می‌گردد. محیط هیدرودینامیکی کارست مشابه محیط اشباع عمل کرده و در زمان افزایش و تشدید تغذیه حوضه بالادست چشمه، افزایش آبدهی هیدروگراف تخلیه از چشمه به صورت مشهود بوده و نقطه اوج هیدروگراف به صورت کشیده است. روش MDHT برای تعریف سناریوهای آلودگی به صورت رابطه (۵) بر مبنای سرعت‌های مختلف جریان آب زیرزمینی پیشنهاد شده است.

$$\text{MDHT} = \frac{Q_{\max}}{2} \cong t_i \quad (\text{رابطه } 5)$$

روش MDHT (حداکثر دبی تخلیه در نصف زمان): یعنی زمان (روز) سپری شده از لحظه‌ای که در آن دبی حداکثر سالانه Q_{\max} رخ داده است تا زمانی که میزان دبی تخلیه برابر $Q_{\max} / 2$ ثبت شده است. در این زمان روند نفوذ از طریق منطقه غیراشباع ناچیز می‌شود یعنی مسیر ترجیحی، مستقیم و سریع‌ترین طریق که آلاینده بدون هیچ‌گونه میرایی به چشمه



شکل ۴- فواصل و مناطق حفاظتی تعیین شده (Civita 1995)

تلفیق آسیب‌پذیری و حریم کیفی

ارزیابی و تحلیل نتایج دو شاخص آسیب‌پذیری VESPA و حریم کیفی با روش MDHT حاکی از این موضوع است که وابستگی بین سرعت جریان در هر دو روش و ارتباط بین آسیب‌پذیری و کلاس آلودگی وجود دارد؛ لذا در این بخش با تلفیق این دو شاخص جهت تعیین حریم کیفی بر مبنای میزان آسیب‌پذیری چشمه تعریف شده است. این تلفیق بدین معنا است که میزان آسیب‌پذیری چشمه (شاخص VESPA) که مبین پارامترهای کمی و کیفی آب است بر اساس زمان که از شاخص MDHT ارزیابی می‌شود رابطه مستقیمی دارد. به طوری که در چشمه‌هایی که آسیب‌پذیری زیاد و حساس‌تری دارند می‌بایست سناریوی خطر آلودگی حساس‌تری و سطح وسیع‌تری از نظر حفاظت کیفی اختصاص داده شود. بر این اساس پس از تعیین آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص VESPA، سناریوهای پایه آلودگی در شاخص MDHT بر مبنای میزان آسیب‌پذیری چشمه مطابق جدول (۴) طبقه‌بندی می‌شود. در نهایت با استفاده از روش سناریو خطر آلودگی (MDHT)، پهنه‌های در معرض خطر آلودگی تعیین و

مناطق آسیب‌پذیر حوضه چشمه نسبت به آلودگی مشخص می‌شود.

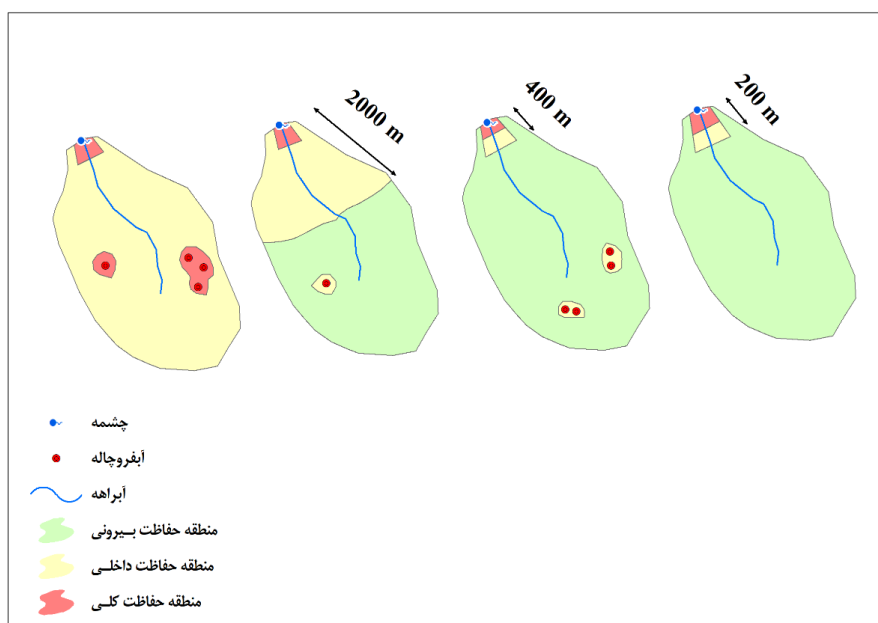
جدول ۴- تعیین سناریوهای خطر آلودگی بر اساس شاخص VESPA

شاخص VESPA	سناریوهای پایه خطر آلودگی
$V \geq 10$	A
$1 \leq V \leq 10$	B
$0.1 \leq V \leq 1$	C
$0 \leq V \leq 0.1$	D

با تلفیق شاخص آسیب‌پذیری VESPA و حریم کیفی MDHT مناطق حفاظتی در سه دسته با خصوصیات زیر تعریف می‌شود که در شکل (۵) نیز به صورت تصویری ارائه شده است. الف) منطقه حفاظت کلی: این منطقه باید به طور کامل محافظت گردد و دسترسی به آن به صورت محدود امکان‌پذیر باشد.

ب) منطقه حفاظت داخلی: این منطقه به شدت محدود بوده و عملیات حفاری و کارهای زیرسطحی مجاز نیست.

ج) منطقه حفاظت بیرونی: تنها اجازه فعالیت‌های جزئی داده شده است و اقدامات حفاظت در برابر آلودگی برای ساختمان‌های جدید لازم است.



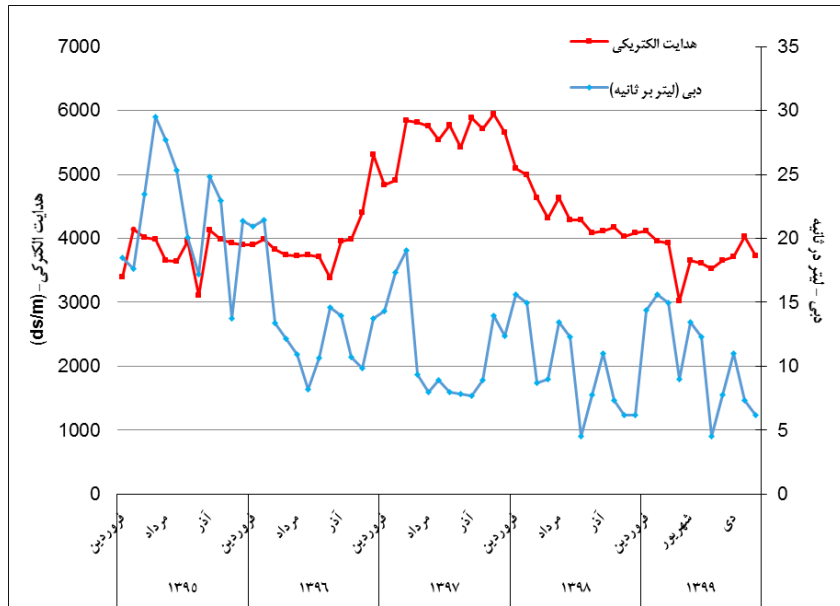
شکل ۵- نمونه مناطق حفاظتی تحت اجرای ۴ سناریوی خطر آلودگی (Civita 1995)

نتایج و بحث

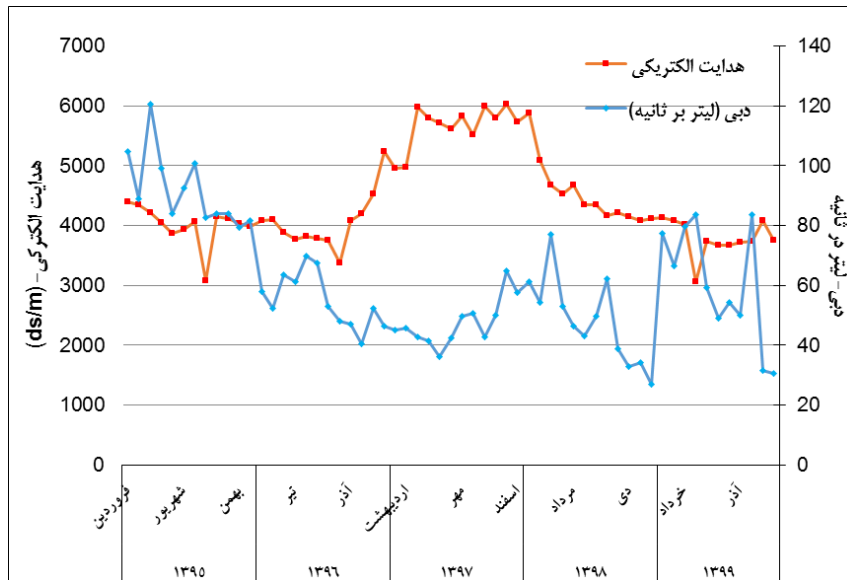
ارزیابی آسیب‌پذیری چشمه

به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری چشمه‌های منطقه با استفاده از شاخص VESPA، دو رویکرد اتخاذ شد. در رویکرد اول شاخص آسیب‌پذیری نمونه‌برداری به صورت میانگین سری زمانی ۵ ساله آنالیز

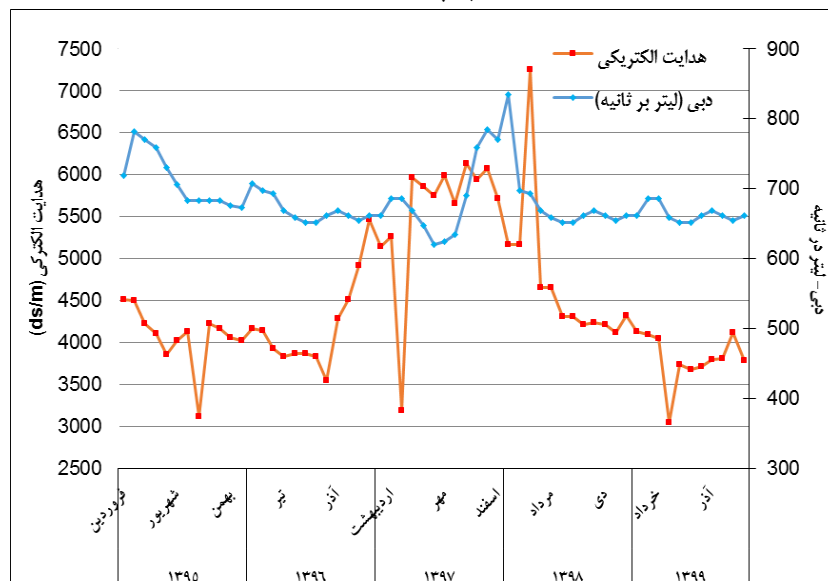
گردید و در رویکرد دوم، شاخص آسیب‌پذیری برای هر سال به صورت مجزا محاسبه شد. بر این اساس روند تغییرات ماهانه پارامترهای اندازه‌گیری شده برای سه چشمه در شکل (۶) ارائه شده است.



الف - چشمه S1



ب) چشمه S2



ج) چشمه S3

شکل ۶- تغییرات آبدهی و هدایت الکتریکی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

نتایج به دست آمده از شاخص آسیب پذیری VESPA در این رویکرد نشان دهنده این موضوع است که در چشمه S1 با افزایش مقدار β و γ مقدار شاخص VESPA افزایش پیدا کرده (VESPA=150.4)، اما در چشمه های S2 و S3 با کم شدن β و γ شاخص VESPA کاهش پیدا کرده است (VESPA S2=98.02 و VESPA S3=24.4)؛ لذا میزان آبدهی در تعیین شاخص آسیب پذیری بسیار حائز اهمیت است. به طور کلی نتایج نشان داد که هر سه چشمه دارای آسیب پذیری در کلاس خیلی زیاد بوده و باتوجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص آسیب پذیری و تحلیل وضعیت شبکه توسعه یافتگی کارست در حوضه آبرگیر چشمه ها حاکی از بحرانی بودن وضعیت آسیب پذیری و خطر آلودگی بسیار بالا در این چشمه ها است.

باتوجه به طول دوره آماری ۵ ساله جهت آنالیز، شاخص آسیب پذیری VESPA برای هر سال در سه دهه چشمه مطابق جدول (۶) محاسبه شد. این موضوع از این جهت مورد بررسی قرار گرفت که میزان تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی هر چشمه متنوع بوده است. به طوری که بررسی سری زمانی نشان می دهد که دامنه تغییرات آبدهی در چشمه بیش از ۲ برابر و دامنه تغییرات هدایت الکتریکی بیش از ۵۰٪ در طول دوره نمونه برداری تغییر کرده است؛ لذا ارزیابی میزان آسیب پذیری در هر سال می تواند روند تغییرات این شاخص را باتوجه به اینکه، این شاخص تابعی از سه پارامتر است بیان کند.

نتایج به دست آمده از شکل (۶) نشان داد که دو چشمه S1 و S2 از سال ۱۳۹۵ روند تغییرات آبدهی و هدایت الکتریکی تقریباً یکسانی داشته ولی در سال های بعد با کاهش میزان آبدهی، مقدار هدایت الکتریکی افزایش داشته است. که این موضوع عملاً باتوجه به کاهش حجم جریان آب برقرار است. در چشمه S3 به علت میزان افزایش آبدهی میزان هدایت الکتریکی کاهش پیدا کرده است که این موضوع باتوجه به افزایش حجم آب منتقلی از حوضه آبرگیر چشمه منطقی به نظر می رسد. به طور کلی روند کاهشی جریان و آبدهی چشمه ها در این منطقه حاکم است. نتایج نشان می دهد که علاوه بر آبدهی چشمه، نوع سازندهای زمین شناسی منطقه در افزایش هدایت الکتریکی تأثیرگذار بوده که این موضوع دقیقاً در سال ۱۳۹۷ وجود دارد. بر اساس تحلیل وضعیت سری زمانی ۵ ساله، با در نظر گرفتن رویکرد اول در تعیین میزان آسیب پذیری مطابق جدول (۵) شاخص VESPA برای سه دهه چشمه محاسبه شده است.

جدول ۵- تحلیل آسیب پذیری چشمه های منطقه طرح بر اساس شاخص VESPA

وضعیت آسیب پذیری	VESPA Index	γ	β	c(p)	ρ	چشمه
	۱۵۰/۴	۱/۸۶	۱۸۲/۲۵	۰/۴۴	۰/۸۸	S1
خیلی زیاد	۹۸/۲	۱/۵۴	۱۳۹/۲۴	۰/۴۵	۰/۹۱	S2
	۲۴/۴	۰/۳۱	۱۵۸/۷۶	۰/۴۹	۰/۹۸	S3

جدول ۶- تحلیل آسیب پذیری چشمه های مورد بررسی در طول دوره نمونه برداری بر اساس شاخص VESPA

نام چشمه	سال	ρ	c(p)	β	γ	VESPA Index	وضعیت آسیب پذیری
S1	۱۳۹۵	۰/۹۸	۰/۴۹	۱۹/۳۶	۰/۷۲	۶۱/۸۶	زیاد
	۱۳۹۶	۰/۹۵	۰/۴۷	۱۳۴/۵۶	۰/۹۹	۶۳/۷۰	بسیار زیاد
	۱۳۹۷	۰/۹۳	۰/۴۶	۱۲۷/۶۹	۱	۶۰/۲	بسیار زیاد
	۱۳۹۸	۰/۹۵	۰/۴۷	۶/۲۵	۱/۱۳	۳/۴۱	زیاد
	۱۳۹۹	۰/۹۵	۰/۴۷	۰/۸۱	۱/۰۴	۰/۴۰	متوسط
S2	۱۳۹۵	۰/۹۹	۰/۴۹	۳/۲۴	۰/۴۴	۰/۷۱	متوسط
	۱۳۹۶	۰/۹۷	۰/۴۸	۱۰۸/۱۶	۰/۵۳	۲۸/۱۵	بسیار زیاد
	۱۳۹۷	۰/۹۸	۰/۴۹	۹۶/۰۴	۰/۶۰	۲۸/۸۳	بسیار زیاد
	۱۳۹۸	۰/۹۷	۰/۴۸	۵/۷۶	۱/۰۳	۲/۹۰	زیاد
	۱۳۹۹	۰/۹۴	۰/۴۷	۳/۶۱	۰/۸۷	۱/۵۰	زیاد
S3	۱۳۹۵	۰/۹۹	۰/۴۹	۸۸/۳۶	۰/۱۵	۶/۷۳	زیاد
	۱۳۹۶	۰/۹۹	۰/۴۹	۱۲۷/۶۹	۰/۰۸	۵/۳۵	زیاد
	۱۳۹۷	۰/۹۸	۰/۴۹	۱۳۲/۲۵	۰/۲۴	۱۵/۶۹	بسیار زیاد
	۱۳۹۸	۰/۹۸	۰/۴۹	۳/۶۱	۰/۲۶	۰/۴۷	متوسط
	۱۳۹۹	۰/۹۹	۰/۴۹	۷/۲۹	۰/۰۵	۰/۱۹	متوسط

میزان شاخص آسیب پذیری VESPA در سال ۱۳۹۵ زیاد، در سال های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ بسیار زیاد، در سال ۱۳۹۸ و در سال

بررسی ها نتایج به دست آمده برای تعیین میزان شاخص آسیب پذیری VESPA برای هر سال نشان داد که در چشمه S1

پیشنهادی در کنترل کامل حریم چشمه‌ها در نظر گرفته شد. باتوجه به میزان حریم تعریف شده، بیشترین سطح و حریم مربوط به چشمه S1 و کمترین سطح حریم مربوط به چشمه‌های S2 و S3 است.

جدول ۷- ارزیابی میزان حریم و سناریوی روش MDHT

نام چشمه	حداکثر آبدهی	MDHT	سناریو	L(m)	d (m)	D (m)
S1	۲۹/۵	۱۴/۷۵	B	۲۰۰۰	۵	۳۰
S2	۱۲۰/۳۸	۶۰/۲	D	۲۰۰	۲	۱۰
S3	۸۳۴/۰۷	۴۱۷	D	۲۰۰	۲	۱۰

تلفیق شاخص آسیب‌پذیری و حریم کیفی

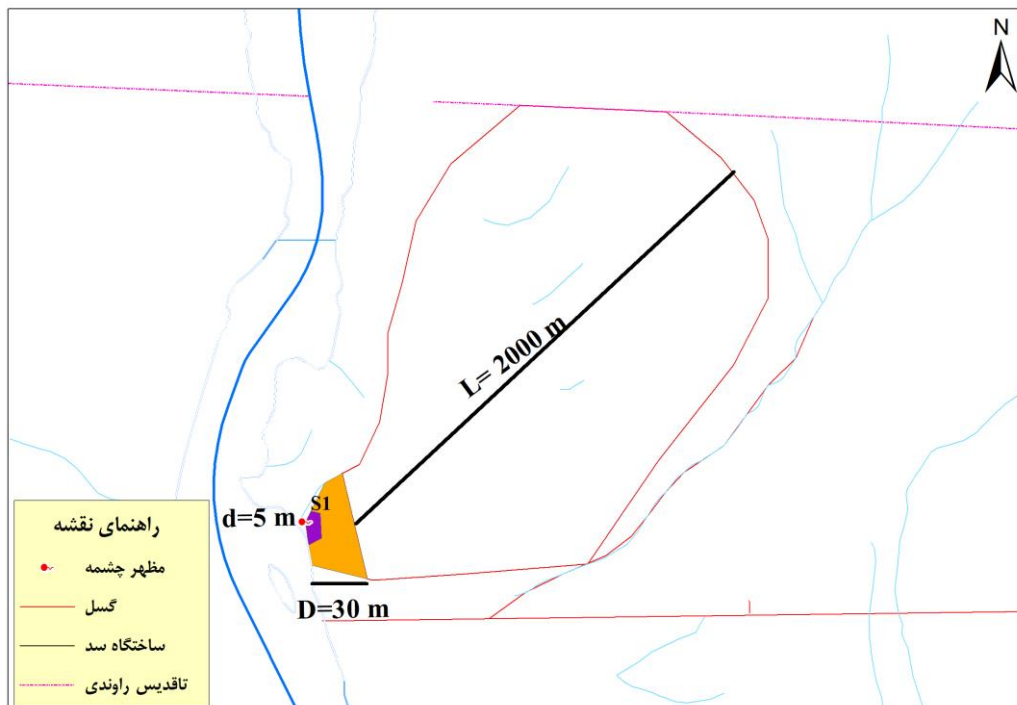
باتوجه به رویکرد در نظر گرفته شده برای این مطالعه، با تلفیق شاخص آسیب‌پذیری VESPA و شاخص حریم کیفی MDHT، پهنه‌بندی حریم کیفی در سه دهانه چشمه انجام گرفت. براین اساس برای هر چشمه باتوجه به مقدار شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص VESPA، سناریوی آلودگی با استفاده از روش MDHT تعریف و براین اساس مقادیر فواصل حریم کیفی تعریف شد. شکل (۷) تا (۹) حریم کیفی تعریف شده برای سه دهانه چشمه را در این منطقه نشان می‌دهد.

۱۳۹۹ متوسط است. در چشمه S2 میزان شاخص آسیب‌پذیری VESPA در سال ۱۳۹۵ متوسط، در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ بسیار زیاد، در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ زیاد است. در چشمه S3 میزان شاخص آسیب‌پذیری VESPA در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ زیاد، در سال ۱۳۹۷ بسیار زیاد و در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ متوسط است.

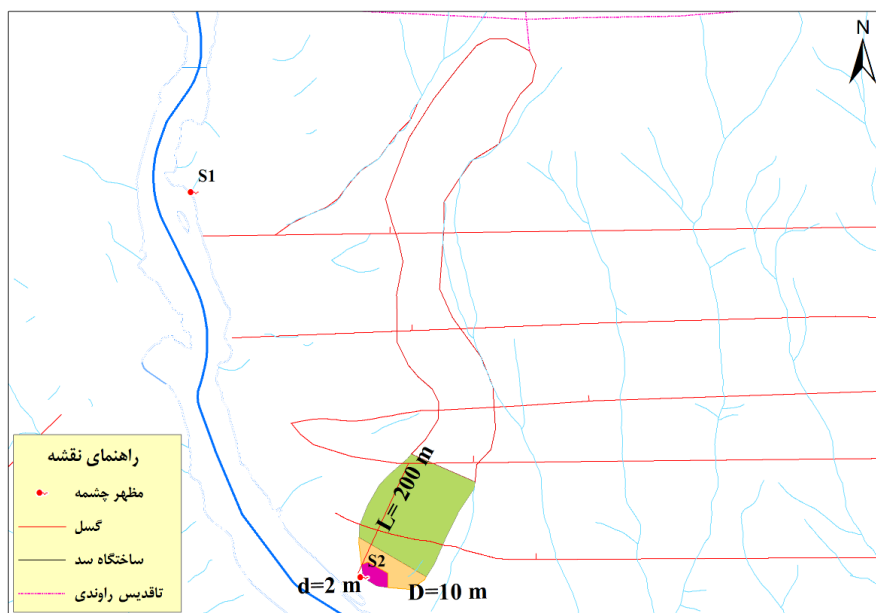
پهنه‌بندی حریم کیفی با روش MDHT

به منظور تعیین حریم کیفی در سه دهانه چشمه با استفاده از روش MDHT استفاده شد. براین اساس باتوجه به میزان آبدهی چشمه‌های منطقه، سناریوی خطر آلودگی برای هر چشمه تعیین و براین اساس فواصل تعریف شده برای حریم هر چشمه مطابق جدول (۷) مشخص شد.

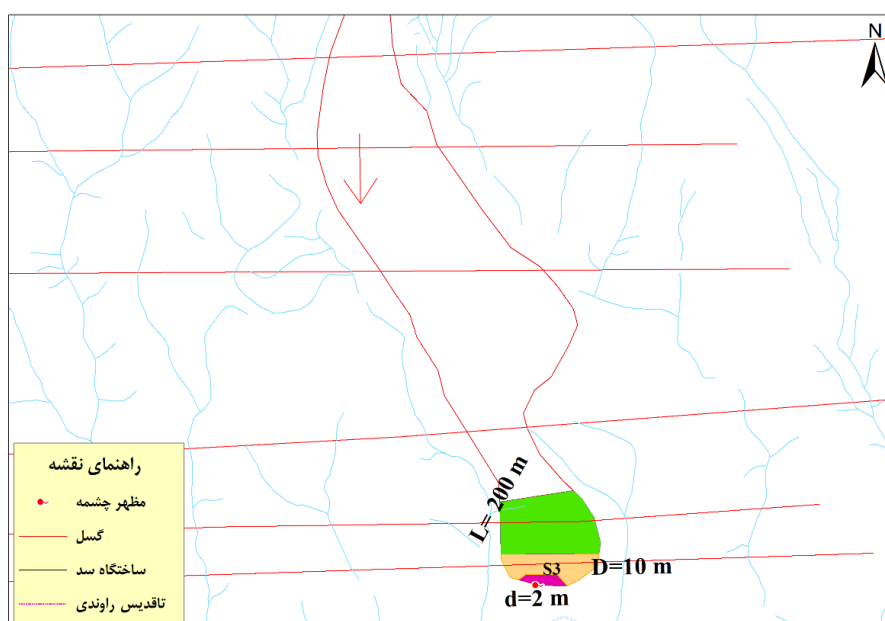
نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین میزان آبدهی مربوط به چشمه S3 بوده لذا مقدار شاخص MDHT به دست آمده نیز نسبت به دو چشمه دیگر بیشتر و مقدار ۴۱۷ به دست آمد. کمترین میزان آبدهی نیز مربوط به چشمه S1 بوده که مقدار شاخص MDHT نیز ۱۴/۷۵ به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده و انتخاب سناریو، مطابق جدول (۳) مقادیر



شکل ۷- حریم کیفی تعریف شده بر مبنای شاخص VESPA در چشمه S1



شکل ۸- حریم کیفی تعریف شده بر مبنای شاخص VESPA در چشمه S2



شکل ۹- حریم کیفی تعریف شده بر مبنای شاخص VESPA در چشمه S3

نتیجه‌گیری

و از آسیب‌پذیری منطقه با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری VESPA مورد بررسی قرار گرفته و این شاخص در سه چشمه این منطقه S1، S2 و S3 مورد ارزیابی قرار گرفت. سه پارامتر آبدهی چشمه، دما و هدایت الکتریکی به‌عنوان سه پارامتر مهم در تعیین آسیب‌پذیری چشمه‌ها تعیین شده‌اند که تحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان آسیب‌پذیری تابعی معکوسی از میزان آبدهی چشمه بوده به‌طوری‌که با افزایش میزان آبدهی میزان شاخص آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که شاخص

در چندین سال اخیر مشکلات کم‌آبی و بهره‌برداری از منابع آب کارستی بدون مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح باعث ایجاد بستر آلودگی در منابع آبی گردیده است. از ابزارهای مهم جهت این موضوع استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و تعیین میزان خطرپذیری بهره‌برداری می‌باشد. در این مطالعه به ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری سه چشمه واقع در پایین‌دست سد و نیروگاه سیمره در غرب ایران در رشته‌کوه‌های زاگرس پرداخته شده است

باعث شده تا در چشمه‌هایی که دارای آسیب‌پذیری زیادی باشند میزان پوشش حریم با روش MDHT افزایش داشته باشد و این موضوع سبب افزایش خطرپذیری بهره‌برداری می‌شود. بررسی نتایج این مطالعه با سایر مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهد که آبدهی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در تعیین آسیب‌پذیری چشمه‌های کارستی مطرح بوده و این موضوع در مطالعات Javadi et al., (2019), et al., (2019), و Banzato et al., (2017) و Galleani et al., (2011) نیز دیده شده است. همچنین مطالعات انجام شده تنها به ارزیابی آسیب‌پذیری مظهر چشمه اکتفا کرده و ارزیابی وضعیت حوضه آبرگیر چشمه را با تلفیق روش MDHT را Javadi et al., (2019) مورد بررسی قرار دادند؛ لذا باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده تمهیدات مدیریتی جهت بهره‌برداری از منابع آب کارستی منطقه بر اساس میزان حریم کیفی تعریف شده و شرایط مختلف از نظر اقلیمی و بهره‌برداری می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین فاکتورهای تصمیم‌گیری در این منطقه مدنظر قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

اعضای این مقاله بر خود واجب می‌دانند از شرکت توسعه منابع آب و نیرو موسسه تحقیقات آب در جهت تامین و در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات نمونه‌برداری کیفی شبکه پایش سد سیمره تشکر و قدردانی نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Banzato, C., Butera, I., Revelli, R., & Vigna, B. (2017). Reliability of the VESPA index in identifying spring vulnerability level. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(6), 04017008.
- Civita, M., De Maio, M., & Vigna, B. (1999). Una metodologia GIS per la valutazione della ricarica attiva degli acquiferi. *Proceedings "III Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee"*, Parma, 1291-1303.
- Civita, M. V. (2008). An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal*, 16(5), 855-869.
- Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C., & Russo, S. L. (2011). Validation of a vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index. *Journal of hydrology*, 396(3-4), 233-245.
- Javadi, S., Moghaddam, H. K., & Roozbahani, R. (2019). Determining springs protection areas by combining an analytical model and vulnerability index. *Catena*, 182, 104167.
- Javadi, S., Kardan Moghaddam, H., & Neshat, A. (2020). A new approach for vulnerability assessment of coastal aquifers using combined index. *Geocarto International*, 1-23.
- Kardan Moghaddam, H., Jafari, F., & Javadi, S. (2017). Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 137-146.
- Karimi vardnani, H. (2010). *Karst Hydrogeology "Concepts and Methods"*. Eram Shiraz Publications. pp 414.
- Kiaee, M., & Javadi, S. (2021). Assessment of vulnerability and risk mapping in a karst watershed using combination of VESPA & EPIK indices. *Hydrogeology*.
- Moghaddam, H. K., kivi, Z. R., Bahreinimotlagh, M., & Moghaddam, H. K. (2020). Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International*, (just-accepted), 1-15.