

Vulnerability Assessment in Karst Aquifers with EPIK and COP Indices Calibration

H. Kardan Moghadam^{*1}, A. Nemati Mansour²,
A. Akbarzadeh³, and A. Mirarabi⁴

Abstract

One of the most important sources of water for extraction and exploitation is karst water resources, the exploitation of which has grown greatly due to the trends in exploiting aquifers and the decline in those resources. This exploitation increase has the potential to pollute water resources due to the set of man-made interventions. Therefore, the recognition of development potentials should be based on the vulnerability of these resources. This study aims to determine the vulnerability of the Dorfak Karst aquifer with two indices of Epikarst (EPIK) and Coefficient of Permeability (COP). According to the geological studies, the type of karst formations and the karst network in the region, the parameters of each extraction index were obtained and the final index was calculated. After determining each index, the level of vulnerability based on the quality of water in the springs as the output of a karst basin was used for calibration. Using the whale optimization algorithm aiming at maximized correlation between the vulnerability index and the qualitative index, the calibration was done by changing the weights and ranks of each index. The results showed that the correlation between the two vulnerability indices and the quality index was improved in the calibration process and the EPIK index has higher accuracy. It is also shown that the correlation index increased and improved from 0.34 to 0.57 for the EPIK index. Based on the results the vulnerability index calibration approach based on regional springs offers appropriate capabilities for evaluation in karst environments.

Keywords: Vulnerability, EPIK, COP, Groundwater Quality Index (GQI).

Received: January 22, 2025
Accepted: February 25, 2025

ارزیابی آسیب پذیری منابع آب کارستی با واسنجی دو شاخص آسیب پذیری EPIK و COP

حمید کاردان مقدم^{۱*}، امیررضا نعمتی منصور^۲،
عباس اکبرزاده^۳ و علی میرعربی^۴

چکیده

یکی از مهمترین منابع آب برای استحصال و بهره برداری، منابع آب کارستی است که با توجه به روند بهره برداری از آبخوانها و افت این منابع، بهره برداری از این منابع رشد زیادی داشته است. این افزایش بهره برداری با توجه به مجموعه عوامل انسان ساز، پتانسیل آلودگی منابع آب را دارد. لذا شناخت پتانسیل های توسعه می بایست مبتنی بر آسیب پذیری این منابع باشد. این مطالعه با هدف تعیین آسیب پذیری آبخوان کارستی درفک با دو شاخص ایپی کارست (EPIK) و ضریب نفوذپذیری (COP) مورد آنالیز قرار گرفته است. براین اساس با توجه به مطالعات زمین شناسی، نوع سازندهای کارستی و شبکه کارستی در منطقه، پارامترهای هر شاخص استخراج و شاخص نهایی محاسبه شد. پس از تعیین هر شاخص میزان آسیب پذیری براساس کیفیت آب در چشمه ها به عنوان خروجی یک حوضه کارستی برای واسنجی استفاده شد. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی نهنگ با هدف حداکثرسازی همبستگی بین شاخص آسیب پذیری و شاخص کیفی واسنجی با تغییر وزن و رتبه های هر شاخص انجام گرفت. نتایج نشان داد که میزان همبستگی دو شاخص آسیب پذیری با شاخص کیفی در فرایند واسنجی ارتقاء یافته و شاخص EPIK دارای دقت بالاتری است. نتایج نشان داد که میزان همبستگی از مقدار ۰/۳۴ به ۰/۵۷ برای شاخص EPIK افزایش و بهبود داشته است. نتایج نشان داد که رویکرد واسنجی شاخص آسیب پذیری در محیط کارستی مبتنی بر چشمه های منطقه قابلیت مناسبی را برای ارزیابی ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: آسیب پذیری، EPIK، COP، شاخص کیفی GQI.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۷

1- Department of Water Resources Studies and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: h.kardan@wri.ac.ir
2- Graduate, Water resource management, University of Tehran, Iran.
3- Research Assistant Professor, Water and Wastewater Research Center (WWRC), Water Research Institute, Tehran, Iran.
4- Water Resources Management Company (WRM), Tehran, Iran.
*- Corresponding Author
Doi: [10.22034/iwrr.2025.501604.2824](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.501604.2824)

۱- استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، پژوهشکده هیدرولیک و محیط های آبی، تهران، ایران.
۲- دانش آموزانه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، ایران.
۳- استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، مرکز آب و فاضلاب، تهران، ایران.
۴- معاون مطالعات پایه و تخصیص حوزه فلات مرکزی و شرقی، شرکت مدیریت منابع آب ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۴ امکان پذیر است.

شاخص‌های EPIK و COP از جمله معروف‌ترین شاخص‌ها معرفی می‌شود. روش COP نیز در ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های کارستی در مناطق مختلف استفاده شده و نتایج نشان داده که این روش می‌تواند آسیب‌پذیری را در طیفی از کم تا بسیار بالا ارزیابی کند. محققان با استفاده از روش‌های متنوع و گاه ترکیبی، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی در نقاط مختلف پرداخته‌اند.

این مطالعات نه تنها به درک بهتر وضعیت آبخوان‌های خاص کمک کرده، بلکه امکان مقایسه و ارزیابی کارایی روش‌های مختلف را در شرایط متفاوت فراهم آورده است. مطالعات در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری مبتنی بر شاخص‌های مربوطه به آبخوان‌های کارستی نسبت به مطالعات آبرفتی بسیار محدوده انجام شده است. در ایران ارزیابی آبخوان کارستی خورین با استفاده از مدل‌های COP و EPIK انجام شد که نتایج نشان داد که مناطق با بیشترین آسیب‌پذیری شامل سنگ‌آهک‌های ضخیم‌لایه با پوشش گیاهی کم‌تراکم و بیشترین میزان بارش بودند (Ghadimi et al., 2022). Ghezelayagh et al. (2021) روش جدیدی به نام COP*KAT را توسعه دادند که عملکرد بهتری در تحلیل آسیب‌پذیری نشان داد. در آبخوان کارستی گیلانغرب، استفاده از روش‌های EPIK و KDI نشان داد که ۷۱ درصد از منطقه دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد است (Ghadimi, 2020). Zandangen et al. (2020) مطالعات انجام شده در سطح بین‌الملل نیز باتوجه به حجم بالای منابع آب محدود به این سازندها بسیار متنوع‌تر مورد تحلیل قرار گرفته است. Gazal and Eslamian (2022) مقایسه بین شاخص‌های آسیب‌پذیری COP و DRASTIC را تحلیل کردند که باتوجه به ذات آبرفتی قالب در منطقه، شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC در مناطق خشک مناسب‌تر ارزیابی شد. مقایسه شاخص‌های آسیب‌پذیری کارستی نیز حاکی از این موضوع است که در پهنه‌های کوچک شاخص COP و در پهنه‌های متوسط شاخص PaPRIKa نتایج مناسبی را دارد (Nanou et al., 2024). مطالعه Naranjo et al. (2024) نشان داد که موضوع نفوذ در شاخص آسیب‌پذیری EPIK بسیار حائز اهمیت است و به عنوان یک عامل حساس شناخته می‌شود. این موضوع از طرفی نیز ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی اردن با شاخص آسیب‌پذیری COP نشان داد که فاکتور تمرکز جریان (C) مهم‌ترین پارامتر در این شاخص است (Khazaa'lah et al., 2023). در صربستان، بررسی آسیب‌پذیری در کوه سووا پلانینا^۲ نشان داد که مناطق کارستی با توسعه‌یافته‌ترین اپیکارست و تعداد زیادی دولین، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند (Petrović, 2020).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به اهمیت منابع کارستی، بحث آسیب‌پذیری این منابع با روش‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما ارزیابی و واسنجی این شاخص‌ها مورد

امروزه با توجه به گسترش شهرنشینی و توسعه‌های انجام گرفته حجم بهره‌برداری از منابع آب برای تأمین نیازها افزایش قابل توجهی داشته است. یکی از منابع بهره‌برداری از آب، سازندهای سخت و کارستی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد حدود ۱۲ درصد از سطح زمین (غیر از یخچالها)، دارای سنگ‌های کربناته بوده که این سطح در واقع تأمین کننده حدود ۲۵ درصد از منابع آب مصارف جمعیت پیرامون آن است (Kavousi et al., 2018). کارستی و سیستم کارستی بیانگر وضعیت سنگ‌شناسی و هیدرولوژیکی در سازندهای انحلال‌پذیر نظیر سنگهای کربناته و تبخیری است که منجر به تشکیل آبخوان می‌شود (Javadi et al., 2019). علت ایجاد چنین پدیده‌ای وجود شکستگی‌ها و قابلیت انحلال توده سنگ مربوطه است که در نتیجه آن یک سیستم آب زیرزمینی می‌تواند شکل بگیرد. مدیریت بهره‌برداری از سیستم آبخوان کارستی از دو جنبه کمی و کیفی حائز اهمیت است. کمیت آب برای مقاصد تأمین آب و برنامه‌ریزی مطمئن برای تخصیص و کیفیت آب برای استفاده پایدار از منابع آب به عنوان اهداف بهره‌برداری برشمرده می‌شود. براین اساس یکی از جنبه‌های مهم در مدیریت منابع آب کارستی، ارزیابی وضعیت کیفی و مدیریت این شرایط است. آبخوان‌های کارستی با توجه به لایه‌بندی در سطح و معمولاً دارابودن لایه نازک خاک، تمرکز جریان در بخش کارستی و تغذیه متمرکز از طریق حفره‌های بلعنده، در معرض خطر آلودگی بالایی قرار دارند (Zhang et al., 2016). این امر سبب تسریع در انتقال آلودگی می‌شود و این وضعیت در شرایطی است که با رشد جمعیت حجم بار آلودگی روند افزایشی داشته است و لذا ارزیابی وضعیت کیفی را لازم و ضروری کرده است.

استفاده از مفهوم آسیب‌پذیری در ۴ دهه اخیر توانسته رویکرد مناسبی را برای ارزیابی پتانسیل کیفی منابع آب ارائه دهد و در این خصوص استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری، روشی مناسبی برای این موضوع است. با بررسی این شاخص‌ها، می‌توان ارزیابی قابل قبولی از سیستم آب زیرزمینی و وضعیت تأمین آب ارائه داد. مطالعات انجام شده از اوایل دهه ۹۰ میلادی تاکنون نشان می‌دهد که ارزیابی آسیب‌پذیری روشی قدرتمند و کم‌هزینه در شناسایی نواحی مستعد به آلودگی است. روش‌های متعددی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی ارائه شده که هر یک براساس فاکتورهای تأثیرگذار بر کارستی، وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان را ارائه می‌دهند. در سالهای اخیر مطالعات روی توسعه شاخص‌های آسیب‌پذیری کارستی افزایش داشته و شاخص‌هایی نظیر EPIK^۱، COP^۲، LEPT^۳، PI، GOD^۴، KAVA^۵ و PaPRIKa^۶ نیز از سایر شاخص‌هایی بودند که در آسیب‌پذیری کارستی مورد استفاده قرار گرفتند (Taheri et al., 2017).

بررسی قرار نگرفته و بحث کیفیت آب خروجی در یک سیستم کارستی که عملاً در سیستم چشمه‌ها دیده می‌شود، می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای تحلیل و بومی‌سازی نتایج شاخص‌های آسیب‌پذیری از نظر کاربردی باشد. در یک سیستم کارستی، چشمه‌ها به عنوان خروجی حوضه آبریز یک سیستم کارستی تعریف و نشان‌دهنده کیفیت آب تغذیه‌شده و جریان‌یافته از بالادست خود هستند (Galleani et al., 2011). از این رو، می‌توان از آن‌ها به عنوان بهترین منبع برای ارزیابی وضعیت کیفی منطقه که تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی کارست است، استفاده شود. در مطالعه حاضر ضمن ارزیابی دو شاخص EPIK و COP برای آسیب‌پذیری آبخوان کارستی براساس نمونه‌برداری کیفی چشمه‌های منطقه، واسنجی وزن‌های در نظر گرفته شده در دو شاخص با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نیز برای کاربردی‌سازی پتانسیل توسعه منطقه استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها
 ۲-۱- روش پژوهش

هدف این پژوهش، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان درفک با استفاده از دو شاخص COP و EPIK است. این دو شاخص با توجه به قابلیت محاسبه و دارا بودن آمار و اطلاعات و نتایج مناسب برای پهنه‌بندی باتوجه به مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی کیفی آب، نمونه‌برداری از چشمه‌ها به عنوان خروجی‌های اصلی حوضه‌های آبریز انجام شد و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)^۸

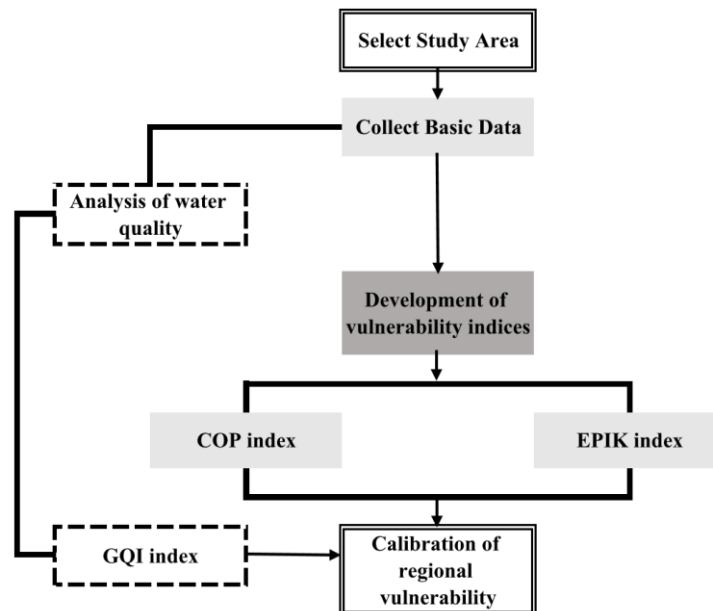


Fig. 1- Research workflow
 شکل ۱- روندنمای انجام تحقیق

۲-۲- آسیب پذیری

۱-۲-۲ شاخص آسیب پذیری EPIK

کارستی را فراهم می‌آورد. رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های EPIK بر اساس جداول (۱) تا (۴) انجام می‌شود. محاسبات مربوط به این شاخص‌ها به کمک نرم‌افزار ArcGIS انجام می‌شود. با استفاده از فرمول (۱) و در نظر گرفتن رتبه و وزن هر یک از چهار عامل مؤثر، شاخص EPIK تعیین می‌شود:

$$EPIK = \alpha \cdot E + \beta \cdot P + \gamma \cdot I + \delta \cdot K \quad (1)$$

در این شاخص، به پارامترهای α ، β ، γ و δ به ترتیب وزن‌های ۳، ۱، ۳ و ۲ اختصاص داده شده است. شاخص آسیب‌پذیری این روش، عددی بین ۹ تا ۳۴ است که به چهار دسته خیلی زیاد (۱۹ و بالاتر)، زیاد (۱۹ تا ۲۵)، متوسط (۲۰ تا ۲۵) و کم (کمتر از ۲۵، به‌ویژه در صورت P4 بودن عامل P) تقسیم می‌شود.

روش ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی EPIK، توسط Dorfliger and Zwahlen (1996) توسعه داده شده است. این شاخص ابزاری کارآمد برای ارزیابی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری منابع آب کارست است. این روش با تمرکز بر چهار عامل کلیدی اپی‌کارست (E)، پوشش حفاظتی (P)، شرایط نفوذ (I) و درجه توسعه شبکه کارست (K)، به تحلیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی می‌پردازد. عامل اپی‌کارست با بررسی مورفولوژی سطحی کارست، پوشش حفاظتی با ارزیابی وجود، ضخامت و تراوایی پوشش خاک، شرایط نفوذ با توجه به الگوی تغذیه متمرکز یا پراکنده آب و عامل شبکه کارستی با بررسی ویژگی‌های مجاری کارستی، در این روش مورد توجه قرار می‌گیرند. به طور خلاصه، روش EPIK با در نظر گرفتن این چهار عامل، امکان ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌پذیری منابع آب

Table 1- Ranking of epikarst factors

جدول ۱- رتبه‌بندی فاکتور اپی‌کارست

| Rank | Epikarst Factor | Karst Morphology |
|------|-------------------|---|
| 1 | E1: Extensive | Shafts, sinkholes, karren, and sloping plains |
| 3 | E2: Moderate | Areas between sinkhole corners, dry valleys, and poljes |
| 4 | E3: Not developed | Other areas |

Table 2- Ranking of protective cover factors

جدول ۲- رتبه‌بندی فاکتور پوشش حفاظتی

| Soil Profile | Soil Condition | | Notes |
|--------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | Low Permeability | High Permeability | |
| P1 | 0-20 cm soil on a formation less than 1 m thick | 0-20 cm soil | No protective cover |
| P2 | 20-100 cm soil and formations with low hydraulic conductivity | 20-100 cm soil | |
| P3 | More than 100 cm soil and formations with low hydraulic conductivity | 100-200 cm soil | With protective cover |
| P4 | More than 100 cm soil with very low hydraulic conductivity (requires point measurement) or more than 6-8 m of silt and clay or formations with very low hydraulic conductivity | More than 200 cm soil | |

Table 3- Ranking of infiltration factors

جدول ۳- رتبه‌بندی فاکتور نفوذ

| Index | Type of Infiltration | Description |
|-------|---------------------------|--|
| I1 | Concentrated Infiltration | Temporary and permanent puddles, temporary and permanent subsurface flows, and the watershed including the flow path within artificial drainage |
| I2 | Concentrated Infiltration | Watershed areas where there is no artificial drainage and the slope is greater than 10% for cultivated fields and 25% for grasslands and pastures |
| I3 | Scattered Infiltration | Watershed areas where there is no artificial drainage and the slope is less than 10% for cultivated fields and 25% for grasslands and pastures. Outside the watershed, the surface flow path is based on steep slopes (greater than 10% for cultivated fields and 25% for grasslands and pastures) where runoff infiltrates. |
| I4 | - | The remaining part of the watershed |

Table 4- Ranking of karst network development

جدول ۴- رتبه‌بندی توسعه شبکه کارستی

| Classification | Description |
|----------------|--|
| K1 | Well-developed karst network with conduits ranging from decimeters to meters in size, exhibiting low clogging and good connectivity. |
| K2 | Poorly developed karst network with poor connectivity, blocked conduits less than a decimeter in size. |
| K3 | Discharge zones with porous media, potentially offering protective effects - fractured or combined non-karst aquifers. |

۲-۲-۲- شاخص آسیب‌پذیری COP

شاخص آسیب‌پذیری COP، یک شاخص اروپایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی مناطق کارستی است که توسط Vias et al. (2010) توسعه یافته است. در این روش، آسیب‌پذیری از سه عامل اصلی C، O و P مشتق می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده تمرکز جریان، لایه‌های پوششی و رژیم بارندگی هستند. عامل O نشان‌دهنده درجه حفاظت لایه‌های غیراشباع آبخوان (لایه‌های خاک و سنگ پوششی) از ورود آلاینده‌ها است. عوامل C و P تأثیرات انتشار متمرکز یا گسترده و رژیم بارندگی بر آلودگی آبخوان را تعیین می‌کنند (Ghezelayagh et al., 2021). از آنجایی که هدف اصلی این روش حفاظت از مخازن آب زیرزمینی است، توسعه شبکه‌های کارستی و آبخوان‌های آب زیرزمینی در آن به طور مستقیم در نظر گرفته نشده است. پارامتر C نشان‌دهنده مقدار بارندگی نفوذی به حفره‌ها و عبور مستقیم از منطقه غیراشباع است. پارامتر O با توجه به خصوصیات فیزیکی منطقه (خاک، لیتولوژی) و ضخامت لایه‌های غیراشباع، وضعیت حفاظت آبخوان را تعیین می‌کند. پارامتر P نیز مقدار بارندگی و عواملی را که بر نفوذپذیری تأثیر می‌گذارند، شامل می‌شود.

فاکتور C شرایط سطحی را براساس جریان آب به طرف زمین‌هایی با نفوذپذیری زیاد نشان‌دهنده ظرفیت کمتر میرایی آلاینده در آن زون‌ها است. نفوذ به روش پخش از طریق لایه‌های فوقانی صورت می‌گیرد ولی در سازندهای کارستی می‌تواند بوسیله ورود از طریق دولین‌ها، شافت‌ها، و فروچاله‌ها متمرکز شود. فاکتور C بیانگر درجه تمرکز جریان بوده و از طریق عوارض کارستی که امکان ورود مستقیم آب‌های سطحی را فراهم می‌کنند و پارامترهایی که رواناب را کنترل می‌کنند، (مانند شیب، پوشش گیاهی، خصوصیات فیزیکی خاک) ارزیابی می‌شود. برای محاسبه این پارامتر رواناب و نفوذ نقش داشته و براساس عوارض سطح زمین^۹ (sf)، شیب (s) و پوشش گیاهی (v) در تعیین C مؤثرند.

$$C = sf \times s \times v \quad (۲)$$

فاکتور O به حفاظت زون غیراشباع سفره در مقابل وقوع آلاینده اشاره دارد به طوری که ظرفیت زون غیراشباع را به فیلتر کردن و

میرایی آلودگی نشان می‌دهد و در نتیجه توان کاهش اثرات مخرب توسط زون غیراشباع را آشکار می‌سازد. برای ارزیابی فاکتور O در روش COP، تنها دو لایه با نقش مهم هیدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد: خاک‌ها (O_s) و لایه‌های لیتولوژیک زون غیراشباع (O_L). زیرعامل O_s بخش فعال بیولوژیک خاک سطحی را شامل می‌شود که در آن فرآیندهای میرایی صورت می‌گیرد. پارامترهایی از قبیل بافت، دانه‌بندی، ضخامت خاک سطحی در ارزیابی این عامل بکار برده می‌شود. زیرعامل لیتولوژی O_L نشان‌دهنده ظرفیت میرایی هر لایه در زون غیراشباع است. معیارهای ارزیابی برای کمی‌سازی آن، نوع سنگ (تخلخل مؤثر، هدایت هیدرولیکی و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی)، درجه درز و شکاف (I_y)، ضخامت هر لایه (m) و سایر شرایط محدوده کننده است. جمع متوالی حاصلضرب ضخامت و لیتولوژی هر لایه شاخص حفاظت را تشکیل می‌دهد. ضریب O بین ۱ تا ۱۵ تغییر می‌کند. ارزش ۱ بیانگر حداقل حفاظت در برابر آلودگی است و ارزش ۱۵ حداکثر میزان حفاظت را نشان می‌دهد. فاکتور P به عنوان بارش عامل محرک تغذیه، نشأت عمودی و جریان از طریق سیستم‌های کارستی است. در این روش این عامل بیانگر کمیت، تناوب، مدت و حداکثر شدت بارش است. فاکتور P قابلیت حفاظت آبخوان را بسته به میزان و شدت بارش اصلاح می‌کند. ضرایب C و O در مورد مشخصات زمین که در انتقال آلودگی مؤثرند بحث می‌کند، ولی عامل P نشان‌دهنده در دسترس بودن آب برای انتقال آلودگی است. عامل P توسط دو ضریب میزان (کمیت) بارش (PQ^{۱۰}) و شدت بارش (PI^{۱۱}) ارزش‌گذاری می‌شود. PQ تأثیر میزان بارش و تغذیه سالانه منتج از آن در آلودگی آب زیرزمینی را توصیف می‌کند. شدت متوسط سالانه بارش براساس متوسط بارش سالانه به متوسط تعداد روزهای بارانی محاسبه می‌شود.

$$P = [PQ] \times [PI] \quad (۳)$$

مقادیر بیشتر فاکتور P اثر کمتری بر سطح حفاظتی ماثرا از فاکتور O را نشان می‌دهد. به هر حال، مقادیر کمتر نشان می‌دهد که بارش (به عنوان تابعی از مقدار و شدت) محافظت ناشی از فاکتور O را کاهش داده و آسیب‌پذیری آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد.

۱)، کم (۲-۴) و بسیار کم (۴-۱۵) تقسیم‌بندی می‌شود. در نهایت شاخص آسیب‌پذیری COP از حاصلضرب مقادیر ارزش‌گذاری شده برای عوامل C، O، P و به دست می‌آید. در شکل (۲) فلوچارت محاسبه شاخص COP ارائه شده است.

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

در این مدل، هر پارامتر به زیرعامل‌هایی تقسیم می‌شود که هر یک به چند کلاس با رتبه‌های مشخص دسته‌بندی می‌شوند. این کلاس‌ها در نرم‌افزار ArcGIS به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی شده نمایش داده می‌شوند. در نهایت، با ترکیب نمرات اختصاص داده شده به هر یک از پارامترها، یک اندیس عددی بین صفر تا ۱۵ محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده میزان آسیب‌پذیری آبخوان است. این اندیس به پنج کلاس آسیب‌پذیری بسیار زیاد (۰-۰/۵)، زیاد (۰/۵-۱)، متوسط (۱-۲)

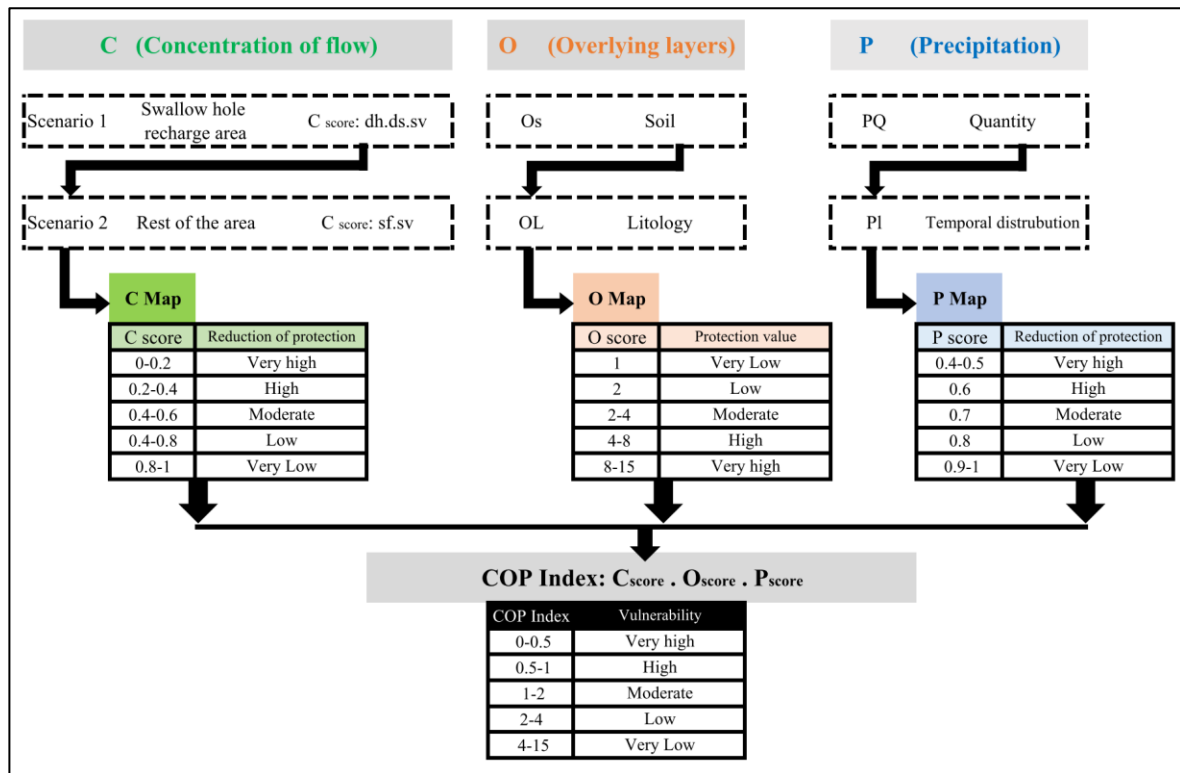


Fig. 2- COP method flowchart

شکل ۲- دیاگرام روش COP

به این معنی است که افزایش غلظت این پارامترها تأثیر بیشتری بر کاهش کیفیت کلی آب خواهد داشت. برای محاسبه GQI، ابتدا غلظت هر یک از پارامترهای انتخاب شده در نمونه آب اندازه‌گیری می‌شود. سپس، این غلظت‌ها با مقادیر استاندارد مجاز تعیین شده در استاندارد ملی ایران مقایسه می‌شوند. با استفاده از فرمول (۳)، شاخص کیفی هر پارامتر محاسبه شده و سپس با وزن‌دهی مناسب، شاخص کلی GQI برای نمونه آب بدست می‌آید. در جدول (۵) پارامترهای کیفی مورد استفاده از شاخص GQI و در جدول (۶) کلاس‌بندی کیفی شاخص GQI ارائه شده است:

$$GQI = 100 - \left(\frac{r_1 W_1 + r_2 W_2 + \dots + r_n W_n}{n} \right) \quad (۳)$$

۳-۲- شاخص کیفی GQI

شاخص کیفی GQI یکی از مهم‌ترین ابزارها برای ارزیابی و پایش مداوم کیفیت آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. در این پژوهش، از شاخص GQI که توسط Babiker پیشنهاد شده بود، برای ارزیابی کیفیت آب استفاده شد (Babiker et al., 2007). این شاخص با ترکیب و تحلیل چندین پارامتر کیفی کلیدی، تصویری جامع از وضعیت کیفی آب ارائه می‌دهد. GQI با تمرکز بر پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر قابلیت شرب آب دارند، طراحی شده است. پارامترهایی مانند نیترات، سولفات، اسیدیت و کل جامدات محلول (TDS¹²) به دلیل اهمیت بالای آن‌ها در سلامت انسان و محیط‌زیست، وزن بیشتری در محاسبه شاخص دارند. این وزن‌دهی

Table 5- Standard values of main parameters in drinking water quality and their assigned weights
جدول ۵- مقادیر استاندارد پارامترهای اصلی در کیفیت آب شرب و وزن‌های اختصاص یافته آن‌ها

| Row | Chemical Parameter | Desired Maximum (mg/L) | Allowable Maximum (mg/L) | Weight | Normalized Weight |
|-----|--------------------|------------------------|--------------------------|--------|-------------------|
| 1 | TH | 150 | 500 | 1 | 0.05 |
| 2 | Na+ | 200 | 200 | 1 | 0.05 |
| 3 | Mg++ | 50 | 150 | 1 | 0.05 |
| 4 | Ca++ | 75 | 200 | 1 | 0.05 |
| 5 | SO4-- | 200 | 400 | 3 | 0.14 |
| 6 | Cl- | 200 | 600 | 2 | 0.09 |
| 7 | HCO3- | 250 | - | 2 | 0.09 |
| 8 | pH | 7 | 9 | 3 | 0.11 |
| 9 | TDS | 500 | 1500 | 3 | 0.14 |
| 10 | NO3- | - | 50 | 5 | 0.23 |

Table 6- Classification of drinking water quality based on quality index (Babiker et al., 2007)
جدول ۶- گروه‌بندی کیفیت آب شرب براساس شاخص کیفی (Babiker et al., 2007)

| GQI Range | Water Quality | GQI Range | Water Quality |
|-----------|---------------|-----------|-------------------------|
| < 50 | Excellent | 200-300 | Poor |
| 50-100 | Good | 300-400 | Very Poor |
| 100-200 | Moderate | > 400 | Unsuitable for Drinking |

شکار نهنگ‌های گوژپشت طراحی شده است. مدل شکار حباب-تور در شکل ۳ نشان داده شده است.

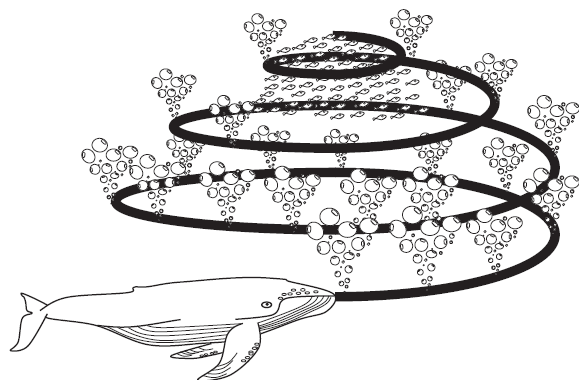


Fig. 3- Bubble network in the whale optimization algorithm (Mirjalili and Lewis, 2016)

شکل ۳- شبکه حباب در فرآیند شکار نهنگ (Mirjalili and Lewis, 2016)

در این شکل مشاهده می‌شود که یک نهنگ گوژپشت با حرکت در مسیر مارپیچی به دور طعمه‌ها و ایجاد حباب‌ها در طول مسیر، تله‌ای

به منظور ارزیابی کیفی و تحلیل شاخص GQI از ۲۶ چشمه موجود در این منطقه نمونه‌برداری در دو دوره تر و خشک انجام و آنالیز کیفی در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب انجام شد.

۲-۴- واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری

رویکردهای متنوعی برای واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری ارائه شده است که در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA¹³) استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی است که توسط Mirjalili and Lewis (2016) ارائه شد. این الگوریتم با الهام از رفتار شکار نهنگ‌های گوژپشت، به دنبال یافتن بهترین راه حل برای مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم با ایجاد گروهی از راه‌حل‌های اولیه تصادفی آغاز می‌شود و سپس با تقلید از روش شکار حباب-تور نهنگ‌ها، این راه‌حل‌ها را به تدریج بهبود می‌بخشد. در این روش، نهنگ‌ها حباب‌هایی را به سمت طعمه شلیک می‌کنند تا آن را در یک دایره محصور کنند و سپس به سمت آن حمله می‌کنند. WOA نیز با ایجاد حلقه‌هایی به دور بهترین راه‌حل‌های فعلی، به دنبال یافتن راه حل بهینه می‌گردد. تفاوت اصلی WOA با سایر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت در قوانین به روزرسانی راه‌حل‌ها است که بر اساس رفتار

بهبودهای محلی است. با توجه به این ویژگی‌های منحصر به فرد، در پژوهش حاضر از الگوریتم WOA برای واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری استفاده شده است (Aljarah et al., 2018).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه با استفاده از شاخص EPIK

در این پژوهش، برای ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه کارستی درفک، از شاخص EPIK بهره گرفته شد. این شاخص بر اساس چهار پارامتر کلیدی که بر جریان آب زیرزمینی و میزان آلودگی در محیط‌های کارستی تأثیرگذارند، تدوین شده است. داده‌های مورد نیاز برای محاسبه این شاخص از منابع زمین‌شناسی، تکتونیک، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، ژئوفیزیک استخراج شدند (Doerfliger and Zwahlen, 1995). پارامترهای این شاخص آسیب‌پذیری بشرح زیر تحلیل و محاسبه شد.

الف) اپی کارستی: تخلخل‌های مؤثر معمولاً در بالاترین بخش یک منطقه آهکی در نزدیکی سطح زمین قرار می‌گیرد و به طور شدید با عمق کاهش پیدا می‌کند. این کاهش متناظر با کاهش کارستی شدن با افزایش عمق است. این کارست‌های سطحی در بعضی مناطق به طور مستقیم قابل مشاهده نیستند و توسط خاک و گیاه پوشیده شده‌اند به طوری که حتی با روش‌های غیرمستقیم از جمله ژئوفیزیک نیز قابل شناسایی نیستند. طبقه‌بندی اپی کارستی در سه بخش E1، E2 و E3 براساس شکستگی‌های ژئومورفولوژیکی، در یک منطقه تعیین می‌شود. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای لندست و گوگل ارث به همراه نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه برای شناسایی محدوده‌هایی که دارای خطواره‌ها و شکستگی‌ها است استفاده شد.

ب) پوشش محافظ: پارامتر پوشش محافظ با استفاده از تلفیق برداشت‌های صحرایی ضخامت خاک، زمین‌شناسی، نقشه شیب و توپوگرافی منطقه محاسبه شد. پارامتر پوشش حفاظتی دارای دو نوع طبقه‌بندی است که در طبقه‌بندی نوع اول براساس هدایت هیدرولیکی خاک، پوشش حفاظتی و در طبقه‌بندی دوم براساس ضخامت خاک رده‌بندی می‌شود (در دو گروه A و B). در طبقه‌بندی اول در گروه A منظور تمامی سازندهای آواری و خاک باقیمانده روی سازندها است که دارای هدایت هیدرولیکی بالایی باشند که در این شرایط این گروه از قدرت پوشش محافظتی ضعیفی برخوردار است و آب را از خود به راحتی عبور داده و وارد آبخوان کارستی می‌شود. در گروه B خاک‌های باقیمانده روی سازندهای آهکی و همچنین سازندهایی که هدایت هیدرولیکی ضعیفی دارند. این گروه از لحاظ توانایی در محافظت آبخوان کارستی در درجه بالاتر نسبت به گروه A قرار می‌گیرد. در

طبقه‌بندی دوم گروه A و B به چهار بخش P1، P2، P3 و P4 بر اساس ضخامت تقسیم‌بندی می‌شوند. خاکی که تا ۲۰ سانتیمتر ضخامت داشته باشد نمی‌تواند از آبخوان محافظت کند و با عنوان "نبود پوشش محافظ" بیان شده است. خاکی که بیش از ۱ متر ضخامت داشته باشد، عامل مهمی در حفاظت آبخوان به شمار می‌رود. ج) شرایط نفوذ: ارزیابی میزان نفوذ و کلاس‌بندی آن در یک آبخوان کارستی در سه حالت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. حالت اول مربوط به مناطقی است که با نفوذ متمرکز یا نقطه‌ای از حفره‌های بلعنده با لایه‌ها یا حفره‌های موقت یا دائمی در بخش‌های زهکشی شده به طور مصنوعی تشکیل شده است. بخش I1، در مجموعه نفوذپذیری نقطه‌ای داده شده است. حالت دوم مربوط به مناطق با نفوذ حدواسط است که به وسیله ضریب رواناب تعیین می‌شود، ضریب رواناب به شیب و پوشش گیاهی بستگی دارد. براساس مطالعات انجام شده در این روش ضریب رواناب برای چمن‌زارها و مراتع برابر ۲۲٪ و برای کشتزارها برابر ۳۴٪ است که ضرایب مذکور در شیب‌های ۲۵٪ برای چمن‌زارها و مراتع و ۱۰٪ برای کشتزارها محقق می‌شود. بخش‌های I2 و I3 در مجموعه نفوذ حدواسط داده شده است. حالت سوم مربوط به مناطق با نفوذ پراکنده است که سایر بخش‌های حوضه آبخیز منطقه را شامل می‌شود. بخش I4 در مجموعه نفوذپذیری پراکنده داده شده است.

د) توسعه شبکه کارستی: آسیب‌پذیری این پارامتر در شرایط وجود یا فقدان یک شبکه کارستی و درجه‌ای که کارستی شدن توسعه یافته در منطقه درفک، ارزیابی می‌شود. توسعه شبکه کارستی به سه کلاس طبقه‌بندی می‌شود به منظور تعیین اهمیت شبکه نسبت به حجم سنگ‌های کم نفوذپذیر احاطه کننده (خرد شده یا توده‌ای) اندکس‌های گوناگونی مطرح شده است. در آبخوان کارستی درفک برای بررسی توسعه شبکه کارستی براساس شواهد مستقیم از قبیل غارها، حفره‌های بلعنده، کارن‌ها، دولین، پولیه و سایر عوارض کارستی فعال در حوضه آبخیز کمک گرفته شده است.

در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1، شاخص EPIK قالب شکل ۵ تهیه شد. این نقشه‌ها، میزان آسیب‌پذیری هر بخش از منطقه کارستی درفک را به صورت کمی و مکانی نشان می‌دهند.

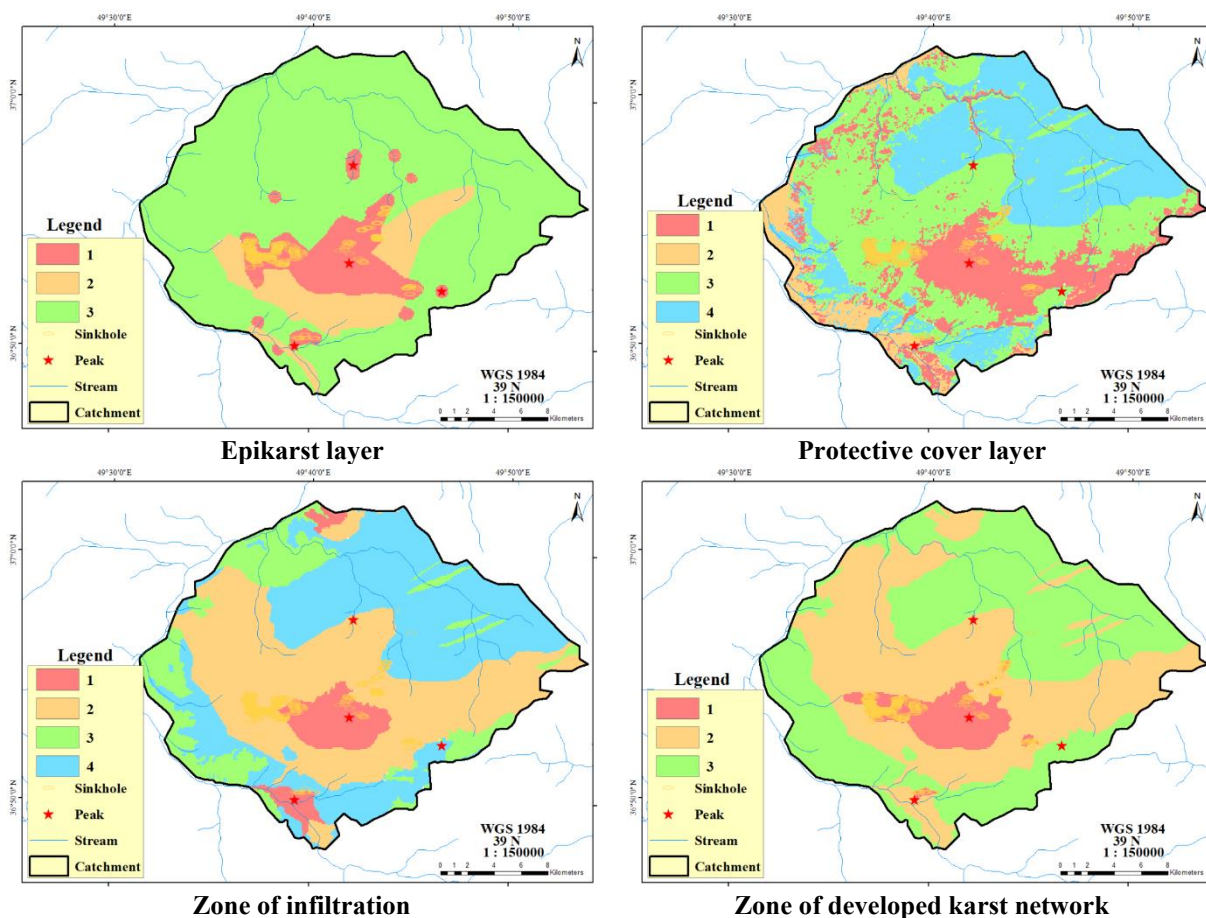


Fig. 5- EPIK vulnerability index parameters
شکل ۵- پارامترهای شاخص آسیب پذیری EPIK

عنوان یک لایه محافظ مؤثر عمل می‌کند. در منطقه درفک، تحلیل جامعی با تلفیق داده‌های متنوع انجام شد. این داده‌ها شامل موقعیت و پراکندگی فروچاله‌ها، شبکه رودخانه‌ها، دره‌های کارستی منطقه، کاربری اراضی، نفوذپذیری نسبی سازندها و مدل ارتفاعی رقومی منطقه بودند. با توجه به چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های موجود در ارتفاعات درفک، نفوذ آلاینده‌ها در این منطقه به صورت متمرکز و با شدت بیشتری رخ می‌دهد. به دلیل این ویژگی زمین‌شناسی، ارتفاعات درفک از حساسیت بالایی نسبت به انتقال و پخش آلودگی برخوردار است. در بخش‌های میانی اطراف ارتفاعات درفک نیز، به دلیل ادامه‌دار بودن ساختارهای زمین‌شناسی و ضخامت مناسب رسوبات، نفوذ آلاینده‌ها در کلاس I2 قرار دارد و به صورت نسبتاً متمرکز انجام می‌شود. نتایج حاصل نشان داد که شبکه کارستی در منطقه ارتفاعات درفک به‌طور قابل‌توجهی توسعه و گسترش یافته است. این توسعه‌یافتگی به‌ویژه در بخش ارتفاعات و محدوده آبروچاله‌ها مشهود است، به‌طوری که این مناطق را می‌توان به‌عنوان بخش‌های دارای

ارزیابی شاخص اپی‌کارست حاکی از آن است که بخش عمده‌ای از منطقه دارای آسیب‌پذیری E1 در ارتفاعات مرکزی منطقه درفک واقع شده است. به‌طور کلی، لایه‌های خاک با ضخامت کمتر از ۲۰ سانتی‌متر قادر به محافظت از آبخوان نیستند و این وضعیت به‌عنوان "نبود پوشش محافظ" شناخته می‌شود. از سوی دیگر، لایه‌های خاک با ضخامت بیش از ۱ متر نقش بسیار مهمی در حفاظت از آبخوان ایفا می‌کنند. بررسی پوشش محافظ لایه‌های کارستی در منطقه درفک نشان داد که دامنه‌های شرقی ارتفاعات درفک بیشترین حساسیت را به فرآیندهای کارستی دارند. بخش اعظم این منطقه در کلاس P1 قرار گرفته است، که نشان‌دهنده کمترین ضخامت پوشش محافظ و بیشترین آسیب‌پذیری است. در سایر مناطق آبخوان نیز به‌صورت پراکنده، مناطقی با پوشش محافظ ضعیف یا بدون پوشش مشاهده می‌شود. برعکس، بخش‌های جنوبی و مرکزی (غربی) درفک به دلیل ضخامت مناسب پوشش محافظ، کمتر تحت تأثیر فرآیندهای کارستی قرار دارند. این مناطق عمدتاً پوشیده از جنگل‌های طبیعی است که به

۴ لایه اطلاعاتی شاخص آسیب پذیری EPIK مطابق شکل ۶ محاسبه شد. همچنین، در جدول ۷، گسترش هر یک از کلاس‌های آسیب پذیری نمایش داده شده است.

شبکه کارستی پیشرفته در نظر گرفت. با این حال، در سایر قسمت‌های آبخوان کارستی درفک، توسعه کارست چندان چشمگیر نبوده و در نتیجه، این مناطق از نظر آسیب پذیری حساسیت کمتری دارند. با تلفیق

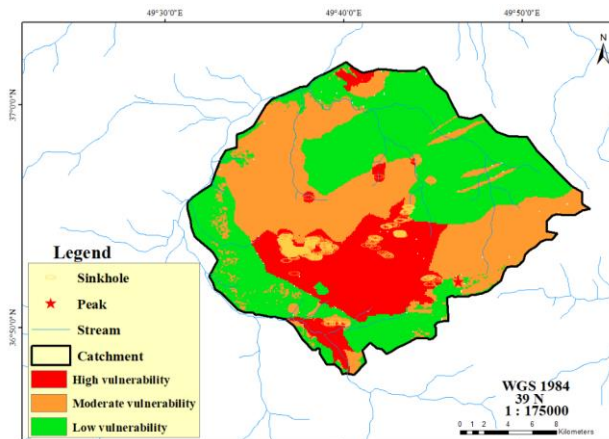


Fig. 6- Vulnerability zoning of Dorfak Aquifer using EPIK Method

شکل ۶- پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان درفک با روش EPIK

Table 7- Area of vulnerability classes using EPIK Method

جدول ۷- مساحت کلاس بندی آسیب پذیری به روش EPIK

| Vulnerability Level | Rank Range | Area (km ²) | Percentage of Total Area |
|----------------------|------------|-------------------------|--------------------------|
| Low Vulnerability | 26-34 | 227.1 | 44.30% |
| Medium Vulnerability | 20-25 | 181.3 | 35.30% |
| High Vulnerability | 9-19 | 104.6 | 20.40% |

(sf) براساس بازدهی‌های میدانی و خصوصیات ژئومرفولوژی منطقه تعیین می‌شود. همچنین، شبکه درز و شکاف و رخساره‌های انحلالی منطقه امتیازدهی می‌شوند. برای تعیین زیرعامل sv، از ترکیب و ارزش گذاری نقشه شیب و کاربری اراضی استفاده شد، با توجه به اینکه شیب عمومی منطقه، به‌ویژه در بخش مرکزی آبخوان درفک، زیاد و با تراکم بالای پوشش گیاهی همراه است. با ترکیب دو زیرعامل sf (عوارض سطحی) و sv (شیب و کاربری اراضی)، لایه تمرکز جریان (C) در محیط ArcGIS محاسبه و در شکل ۷ نمایش داده شده است. این نقشه تلفیقی، توزیع مکانی تمرکز جریان در منطقه مورد مطالعه را به طور جامع نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده از شاخص تمرکز جریان حاکی از این موضوع است که بخش مرکزی آبخوان کارستی درفک دارای کمترین امتیاز و بخش شمالی منطقه که در اراضی جنگلی و سازندهای زمین شناسی دوران اتوسن قرار دارند دارای بیشترین ضریب تمرکز جریان است. بخش مرکزی و ارتفاعات درفک با حداقل امتیاز دارای بیشترین میزان پتانسیل آسیب پذیری را دارند.

نتایج به دست آمده نشان داد که ارتفاعات درفک با توجه به حساسیت و توسعه شبکه کارستی دارای آسیب پذیری زیادی هستند و این آسیب پذیری در هر چهار فاکتور شاخص EPIK نیز مشاهده شد. پراکنش مکانی شاخص آسیب پذیری EPIK نشان می‌دهد که سرچشمه کلیه منابع آب سطحی در کلاس آسیب پذیری زیاد و متوسط قرار دارد که این موضوع از نظر بهره برداری منابع آب بسیار حائز اهمیت است.

۳-۲- ارزیابی آسیب پذیری منطقه با استفاده از شاخص COP

فروچاله‌ها از مهم‌ترین عوارض در شناسایی مناطق تمرکز جریان هستند. در منطقه درفک، با توجه به تمرکز آبروچاله‌ها در بخش مرکزی و توسعه ناکافی شبکه کارست آبخوان، عامل تمرکز جریان (C) بر وضعیت کارست‌شدگی منطقه متکی است. هرچه کارست منطقه متکامل‌تر باشد، نفوذ باران یا رواناب به درون آبخوان سریع‌تر و بیشتر خواهد بود، که این امر می‌تواند به نفوذ آلاینده‌ها و آلودگی منبع آب منجر شود. برای ارزیابی این وضعیت، ابتدا زیرعامل عوارض سطحی

به دست می‌آید که در شکل ۸ ارائه شده است. بارش به عنوان یک پارامتر کلیدی در فرآیندهای تغذیه و انتقال آلاینده‌ها، تحت تأثیر دو عامل اصلی مدت زمان بارش (PQ) و توزیع زمانی آن (PI) قرار دارد. در این مطالعه، با استفاده از منحنی‌های همباران مستخرج از دوره ۲۰ ساله منتهی به سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ و تحلیل ایستگاه باران‌سنجی شاه‌شهیدان که به عنوان ایستگاه مبنا انتخاب شده است، شاخص بارشی P برای کل منطقه محاسبه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار شاخص P در مناطق مختلف متفاوت بوده و توزیع مکانی آن در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است.

پارامتر لایه پوششی در مدل COP، ترکیبی از دو مؤلفه اصلی خاک و لیتولوژی است. مؤلفه خاک، که به عنوان زیرعامل خاک نیز شناخته می‌شود، تحت تأثیر فعالیت‌های زیستی سطحی خاک قرار دارد و براساس ویژگی‌هایی مانند بافت، دانه‌بندی و ضخامت لایه‌های خاک تعیین می‌شود. از سوی دیگر، مؤلفه لیتولوژی، با در نظر گرفتن ضخامت و نوع سنگ‌های لایه‌های لیتولوژیکی محدوده غیر اشباع، تعیین می‌شود. برای محاسبه شاخص محافظت، حاصلضرب ضخامت و لیتولوژی هر لایه به صورت تجمعی محاسبه می‌شود. در نهایت، با جمع مؤلفه‌های خاک و لیتولوژی، پارامتر لایه پوششی در مدل COP

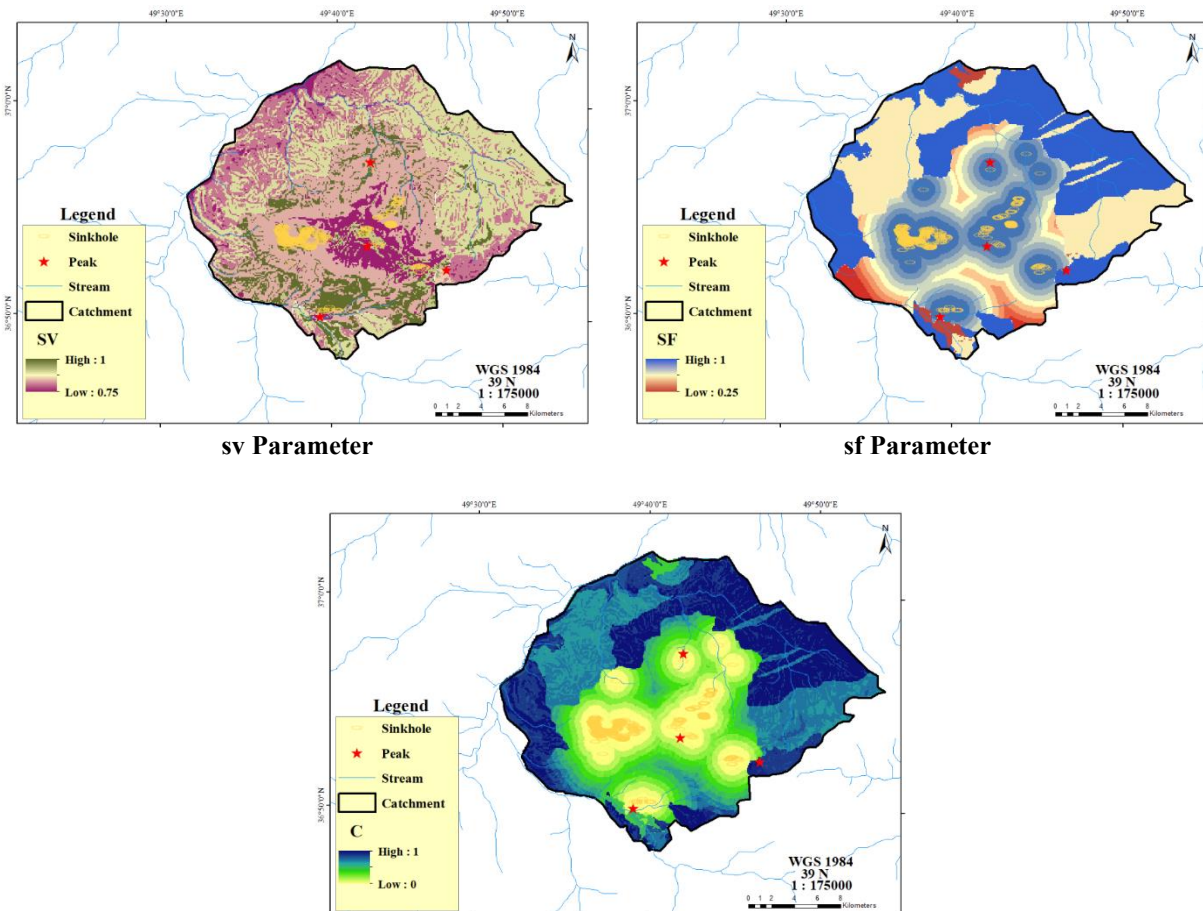


Fig. 7- Flow Concentration Parameter in Dorfak Area
 شکل ۷- پارامتر تمرکز جریان در منطقه درفک

کمتری را نشان می‌دهند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که امتیاز آسیب‌پذیری در این منطقه بین صفر (کمترین) تا ۹ (بیشترین) متغیر است.

مطالعه تلفیقی لایه‌های خاک و لیتولوژی در آبخوان درفک نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت و آسیب‌پذیری در پوشش سطحی مناطق پراکنده‌ای در شمال آبخوان متمرکز شده است. در مقابل، ارتفاعات کارستیک درفک به دلیل وجود پوشش مناسب، آسیب‌پذیری

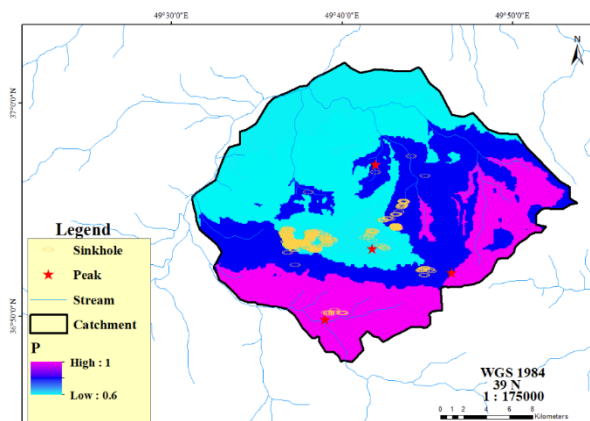


Fig. 9- Rainfall Impact Parameter
 شکل ۹- پارامتر تأثیر بارش

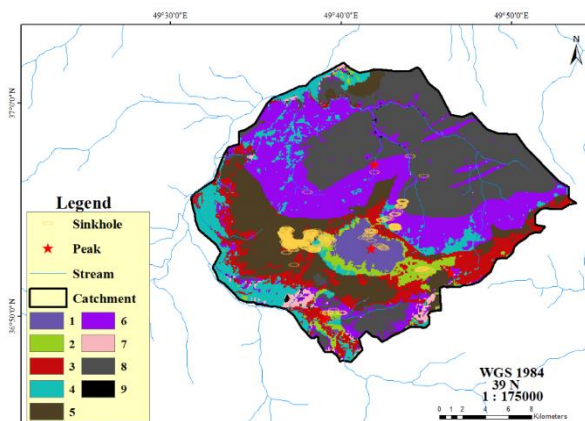


Fig. 8- Overlay Parameter
 شکل ۸- پارامتر لایه پوششی

درفک بوده و این مناطق از حساسیت بیشتری نسبت به سایر آبخوان درفک را دارا است. بخش مرکزی منطقه درفک که ارتفاعات و بیشتر عوارض کارستی در آن قرار دارد دارای آسیب‌پذیری بالایی بوده و این عامل با بررسی سه فاکتور تشکیل دهنده این شاخص آسیب‌پذیری نشان‌دهنده این موضوع است که لایه پوششی نسبت به دو لایه دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. مقایسه نتایج بدست آمده از شاخص آسیب‌پذیری COP نسبت به شاخص EPIK حاکی از همبستگی بالای مکانی در تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیر است.

مطالعه تلفیقی لایه‌های خاک و لیتولوژی در آبخوان درفک نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت و آسیب‌پذیری در پوشش سطحی مناطق پراکنده‌ای در شمال آبخوان متمرکز شده است. در مقابل، ارتفاعات کارستیک درفک به دلیل وجود پوشش مناسب، آسیب‌پذیری کمتری را نشان می‌دهند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که امتیاز آسیب‌پذیری در این منطقه بین صفر (کمترین) تا ۹ (بیشترین) متغیر است.

با تلفیق سه لایه بارش، لایه پوششی و تمرکز جریان، شاخص آسیب‌پذیری COP محاسبه می‌شود. این شاخص در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج بدست آمده از شاخص COP نشان می‌دهد که بیشترین میزان آسیب‌پذیری مربوط به بخش‌های مرکزی آبخوان

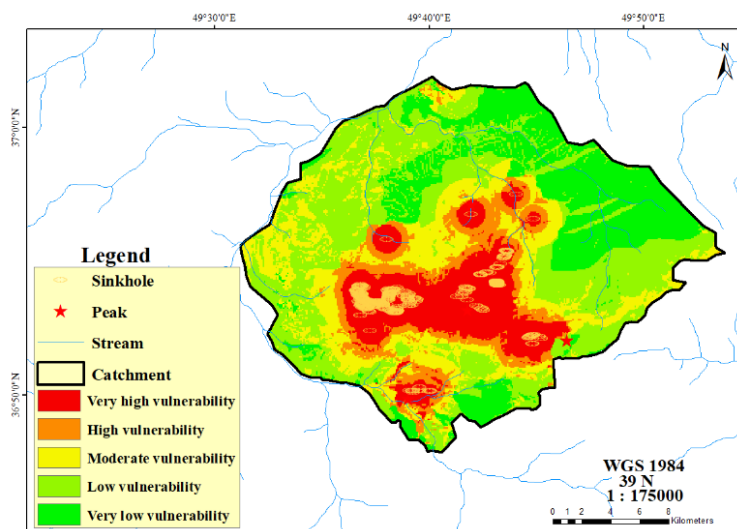


Fig. 10- COP vulnerability index in Dorfak Area
 شکل ۱۰- شاخص آسیب‌پذیری COP در منطقه درفک

۳-۳- تحلیل کیفی منابع آب حوضه با شاخص GQI

یکی از ابزارهای ارزیابی کیفی منابع آب استفاده از شاخص‌های کیفی است. شاخص‌های کیفی دربرگیرنده مجموعه‌ای از پارامترهای کیفی هستند که برای تعیین وضعیت کلاس‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور ارزیابی وضعیت کیفی منابع آب محدوده کارستی درفک، از آمار کیفی چشمه‌های این منطقه استفاده و مقدار شاخص کیفی GQI محاسبه شد. بررسی کلی کیفیت منابع آب در چشمه‌های

منطقه حاکی از وضعیت مناسب برای بهره‌برداری است. شاخص کیفی در اکثر چشمه‌ها کمتر از ۵۰ بوده و حاکی از عالی بودن کیفیت آب برای بهره‌برداری و مصارف است. نکته حائز اهمیت در این منطقه بالادست بودن و پائین بودن فعالیت‌های انسانی است. با توجه به نتایج بدست آمده از شاخص GQI در چشمه‌های مورد آنالیز شده در منطقه درفک، پهنه‌بندی کیفی شاخص GQI مطابق شکل ۱۱ ارائه شده است.

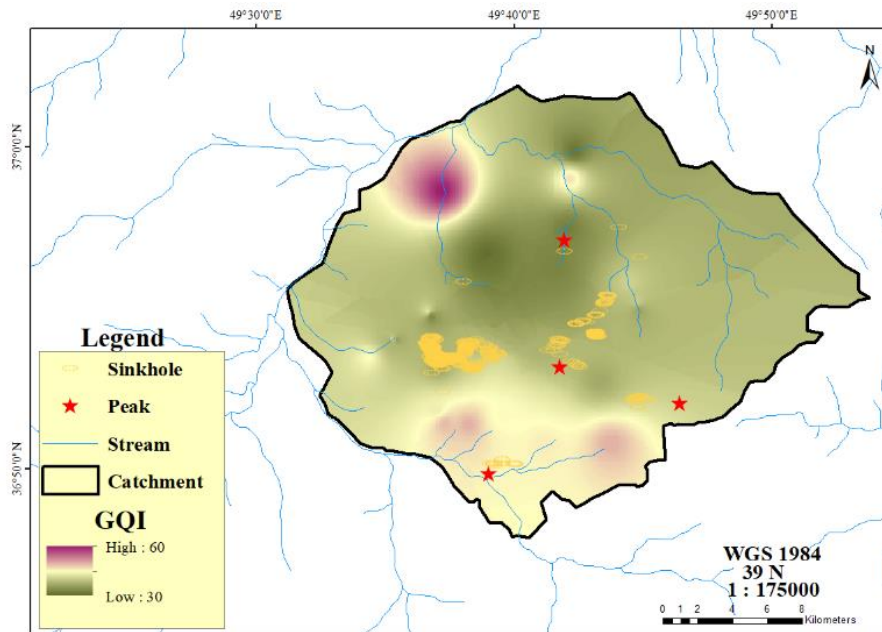


Fig. 11- Qualitative zoning of GQI Index in Dorfak Area

شکل ۱۱- پهنه‌بندی کیفی شاخص GQI در منطقه درفک

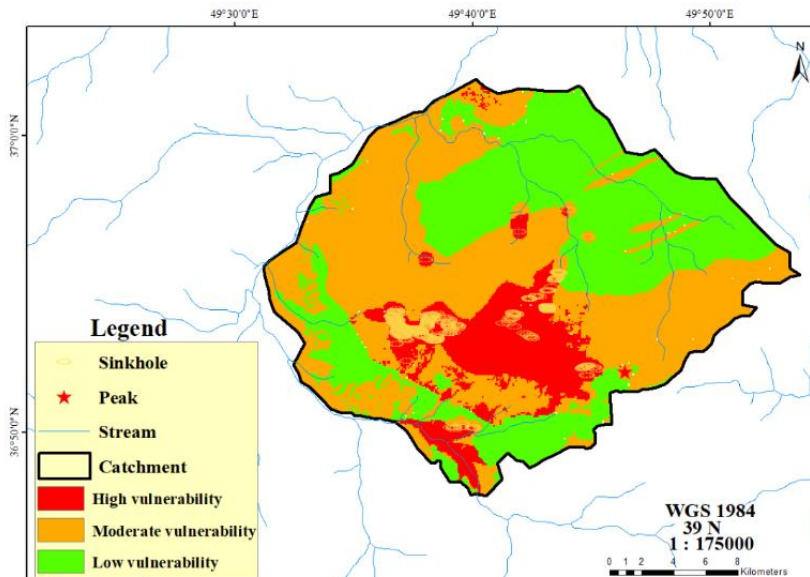
۳-۴- واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری

در مورد شاخص EPIK، الگوریتم‌ها مستقیماً برای بهینه‌سازی وزن پارامترها استفاده شدند، در حالی که برای شاخص COP، که وزن‌های از پیش تعیین شده ندارد، الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی نحوه تلفیق پارامترها به کار گرفته شدند. پس از اجرای الگوریتم و یافتن بهترین وزن‌ها و نحوه تلفیق پارامترها، همبستگی بین شاخص کیفی GQI و این دو شاخص آسیب‌پذیری قبل و بعد از واسنجی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۲). مبنای واسنجی براین اساس تعریف شد که تابع هدف به عنوان محاسبه حداکثر همبستگی بین هر شاخص آسیب‌پذیری و شاخص کیفی GQI به عنوان شاهد است. براین اساس وزن و رتبه‌های هر شاخص آسیب‌پذیری به عنوان متغیر تصمیم در الگوریتم بهینه‌سازی بکار برده شد. نتایج نشان داد که استفاده از این الگوریتم‌های بهینه‌سازی منجر به بهبود قابل توجهی در دقت و کارایی شاخص‌های آسیب‌پذیری شده است.

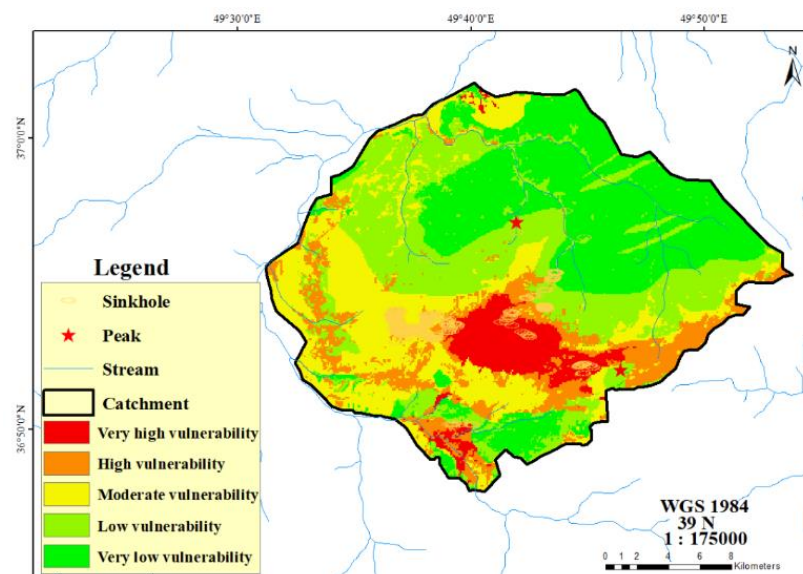
نتایج بدست آمده نشان داد که شاخص EPIK نسبت شاخص COP دارای همبستگی بالاتر بین مقدار شاخص محاسباتی و مقدار شاخص کیفی QGI دارد. این موضوع باتوجه به محاسبه همبستگی اسپیرمن باتوجه به غیرپارامتریک بودن داده‌ها بدست آمد. تغییرات ایجاد شده در وزن و رتبه‌ها دو شاخص آسیب‌پذیری برای دستیابی به وزن و رتبه بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ این موضوع را نشان می‌دهد که شاخص EPIK بدلیل محدود بودن پارامترها نسبت به روش COP دارای کارایی بالاتری است. نتایج شاخص همبستگی نشان داد که میزان همبستگی بین شاخص EPIK و شاخص کیفی QGI از مقدار ۰/۳۴ قبل از واسنجی به مقدار ۰/۵۷ پس از واسنجی رسیده است. این افزایش و ارتقای شاخص آسیب‌پذیری بیانگر کارایی بهتر شاخص EPIK نسبت به شاخص COP است. افزایش میزان همبستگی تنها از لحاظ تغییر در میزان همبستگی حائز اهمیت بوده و تحلیل مبتنی بر آزمون آماری مدنظر نیست. نتایج بدست آمده نشان

به عنوان خروجی، می‌تواند به عنوان مهمترین مؤلفه در ارزیابی آسیب‌پذیری بکار برده شود. استفاده از آنالیز کیفی چشمه‌ها در صحت‌سنجی شاخص آسیب‌پذیری کارستی بسیار مناسب ارزیابی شد.

داد که در شاخص EPIK مقدار وزن α از ۳ به $\frac{3}{4}$ ، مقدار وزن β از ۱ به $\frac{1}{7}$ ، مقدار وزن γ از ۳ به $\frac{2}{8}$ و مقدار وزن δ از ۲ به $\frac{2}{4}$ تغییر و بصورت بهینه تعیین شده‌اند. از طرفی نیز نتایج این مطالعه نشان داد که چشمه‌ها به عنوان یک رکن اصلی در حوزه یک سیستم کارستی



Calibrated EPIK index



Calibrated COP index

Fig. 12- EPIK and COP vulnerability indices after calibration

شکل ۱۲- شاخص‌های آسیب‌پذیری EPIK و COP بعد از واسنجی

و کشاورزی است مورد بررسی قرار گرفته است. دو شاخص آسیب‌پذیری EPIK و COP بدین منظور انتخاب و برای این منطقه مورد سنجش قرار گرفت. براین اساس با در نظر گرفتن پارامترهای

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به رشد و توسعه انجام گرفته شده در شمال کشور، ارزیابی از آسیب‌پذیری آبخوان درفک که یک منطقه توریستی

- 8- Groundwater Quality Index
- 9- Surface Features
- 10- Precipitation Quantity
- 11- Precipitation intensity
- 12- Total Dissolved Solids
- 13- Whale Optimization Algorithm

مؤثر بر هر شاخص، میزان آسیب‌پذیری در آبخوان محاسبه شد. نتایج کلی محاسبه شده نشان داد که بخش مرکزی این آبخوان که ارتفاعات درفک است دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد بوده و سایر بخش‌ها دارای آسیب‌پذیری کمتری است. پس از محاسبه شاخص آسیب‌پذیری مشخص شد که با استفاده از شاخص EPIK، حدود ۲۰٪ در کلاس آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد که این مقدار در شاخص COP حدود ۱۵ درصد است. پس از تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری و تشخیص عدم تطابق کامل این روش‌ها با شرایط منطقه مورد مطالعه، فرآیند واسنجی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ انجام شد. این واسنجی با بهره‌گیری از شاخص کیفی GQI، که شامل چندین پارامتر کیفی است، و براساس نمونه‌برداری از چشمه‌های منطقه صورت گرفت. در این واسنجی هدف حداکثرسازی میزان همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و شاخص کیفی با تغییر در وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری انجام شد. پس از مقایسه و بهینه‌سازی وزن‌ها و رتبه‌های اختصاص یافته، دو شاخص نهایی محاسبه شدند. نتایج نهایی نشان داد که شاخص EPIK پس از واسنجی، همبستگی بیشتری نسبت به شاخص COP با شاخص کیفی GQI داشت. این برتری عمدتاً به دلیل تنوع بالای پارامترهای کیفی و دامنه‌های گسترده‌تر در رتبه‌بندی EPIK است. با این حال، شاخص EPIK بیشترین بهبود را در میزان همبستگی نشان داد، با افزایش از ۳۴٪ قبل از واسنجی به ۵۷٪ پس از آن، که نشان‌دهنده اثربخشی قابل توجه فرآیند واسنجی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. نتایج تغییر در میزان همبستگی براساس واسنجی انجام شده نشان داد که این فرآیند تنها در افزایش میزان شاخص همبستگی از نظر مقدار مورد بحث بوده و از نظر آماری با توجه به پهنه‌بندی شاخص کیفی در چشمه‌ها و عدم قطعیت ناشی از پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری قابل تحلیل نیست. نتایج محاسباتی نشان داد که توسعه در بخش ارتفاعات درفک با توجه به پتانسیل بالای توریستی می‌بایست مبتنی بر آمایش آب محور و در نظر گرفتن ساختار زمین‌شناسی منطقه باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Epikarst
- 2- Coefficient of Permeability
- 3- Karst Aquifer Vulnerability Assessment
- 4- Leaching Potential
- 5- Groundwater Occurrence and Development
- 6- Parameters and Pattern Recognition for Index-based Karst vulnerability assessment
- 7- Suva Planina Mountain

- Aljarah I, Faris H, and Mirjalili S (2018) Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm. *Soft Computing* 22(1-15)
- Babiker IS, Mohamed MAA, and Hiyama T (2007) Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management* 21(699-715)
- Emadoddin F and Safari A (2023) Vulnerability assessment of karst aquifer using COP and PI model (Case study: Bisotun and Paraw aquifers). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 9(4):41-56
- Gazal O and Eslamian S (2022) Assessing groundwater vulnerability based on modified DRASTIC-model and COP-model in arid areas. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 13:(146-190)
- Ghadimi M, Zangenehtabar S, Malekian A, and Kiani M (2022) Groundwater vulnerability assessment in a karst aquifer: a case study of western Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19(12):7503-7516
- Ghadimi M and Zangenetar S (2020) vulnerability assessment of Gilangharb karstic aquifer using EPIK and KDI methods. *Journal of Range and Watershed Management, University of Tehran* 73(1):125-137
- Ghezelayagh P, Javadi S, and Kavousi A (2021) COP* KAT: A modified COP vulnerability mapping method for karst terrains using KARSTLOP factors and fuzzy logic. *Environmental Earth Sciences* 80(17):592
- Heidari AA, Mirjalili S, Faris H, Aljarah I, Mafarja M, and Chen H (2019) Harris Hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems* 97:849-872
- Khazaa'lah M, Talozhi S, and Hamdan I (2023) Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan. *Modeling Earth Systems and Environment* 9(1):19-40
- Kiaei M and Javadi S (2022) Assessment of vulnerability and risk mapping in a karst watershed using combination of VESPA & EPIK indices. *Hydrogeology, University of Tabriz* 7(1):151-164
- Marín AI, Dörfliker N, and Andreo B (2012) Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain). *Environmental Earth Sciences* 65:2407-2421
- Ministry of Energy (2021) Report of the reduction program and the balance of groundwater.
- Mirjalili S and Lewis A (2016) The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software* 95:51-67
- Nanou E A, Zagana E, Pouliaris C, and Kazakis N (2024) Development of a hybrid karst aquifer vulnerability map by using geospatial and statistical tools, The case study of Ziria aquifer in northern Peloponnese. *Groundwater for Sustainable Development* 27:101319.
- Naranjo E, Conicelli B, Moulatlet G M, and Hirata R (2025) Comparative analysis of EPIK, DRASTIC, and DRASTIC-LUC methods for groundwater vulnerability assessment in karst aquifers of the Western Amazon Basin. *Environmental Earth Sciences* 84(3):1-16.
- Nekkoub A, Baali F, Hadji R, and Hamed Y (2020) The EPIK multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 13:1-15
- Petrović B (2020) Intrinsic groundwater vulnerability assessment by multiparameter methods, a case study of Suva Planina Mountain (SE Serbia). *Environmental Earth Sciences* 79(4):85
- Riyanto IA, Widyastuti M, Cahyadi A, Agniy RF, and Adji TN (2020) Groundwater management based on vulnerability to contamination in the tropical karst region of Guntur Spring, Gunungsewu Karst, Java Island, Indonesia. *Environmental Processes* 7(4):1277-1302
- Steiakakis E, Vavadakis D, and Mourkakou O (2023) Groundwater vulnerability and delineation of protection zones in the discharge area of a karstic aquifer-application in Agyia's Karst System (Crete, Greece). *Water, MDPI* 15(2):231
- Taheri K, Taheri M, and Komail M S (2017) Sin-DRASTIC: A modified vulnerability mapping method for alluvial aquifer hosted by karst in the north of Hamadan province, west of Iran. In *EuroKarst 2016, Neuchâtel: Advances in the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs* (pp. 255-271). Springer International Publishing

- Vías J, Andreo B, Ravbar N, and Hötzl H (2010) Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management* 91(7):1500–1510
- Vías JM, Andreo B, Perles MJ, Carrasco F, Vadillo I, and Jiménez P (2006) Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: Application in two pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14:912–925
- Yogafanny E and Legono D (2021) Assessment of groundwater vulnerability using COP method to support the groundwater protection in Karst Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 012036
- Zhang YZ, He QF, Jiang YJ, and Li Y (2016) Characteristics and transport patterns of ammonia, nitrites, nitrates and inorganic nitrogen flux at Epikarst Springs and a subterranean stream in Nanshan, Chongqing. *Huanjing Kexue* 37(4):1379–1388