



Journal of Regional Planning and Winter 2024. Vol 13. Issue 52

ISSN (Print): 2251-6735 - ISSN (Online): 2423-7051
<https://jzpm.marvdasht.iau.ir/>



Research Paper

Comparative Evaluation of the Vulnerability of Shahu and Manshet karst Masses Using the COP Method

AbdulMajid Ahmadi*: Assistant Professor of Geomorphology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

AbdulKarim Visi: Graduated with a PhD in geomorphology from Tehran University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 2020/10/31

Accepted: 2023/01/06

PP: 273-286

Use your device to scan and
read the article online



Keywords:

Karst vulnerability, COP method, statistical analysis, karst aquifers

Abstract

Vulnerability assessment is important for sustainable management of karst water resources and land use planning. Shahu and Manshet karst aquifers play a vital role in supplying drinking water and agriculture to local communities around them. The aim of this research is to evaluate vulnerability in two karst regions using the COP method. Hydrogeological parameters including alpha coefficient and dynamic storage volume were used to determine the type of karst system. They were also investigated using the coefficient of determination in order to determine the important factors in the vulnerability of these areas. The results show that carbonate aquifers with spray flow system are less vulnerable than karst aquifers with channel flow system. In conduit karsts, factor C has a high positive correlation with the vulnerability index, while factor O has a higher correlation with this index in oozing karsts. Due to the large extent of developed karst areas in Shahu region, factor C has the main role in the high level of vulnerability of this region compared to the Manshet karst mass. Also, the results of the vulnerability classes show that 43% of the Shahu karst mass is located in the high and medium vulnerability class, and in contrast, the area of these classes in Manshet region is much less (27%). The presence of developed karst forms, such as dolines, megakarns, deep caves and many cracks and crevices in the Shahu region indicates that this region is more developed than the Manshet karst mass. Finally, it can be said that the vulnerability assessment of karst aquifers, if accompanied by geophysical studies of aquifers as well as the correct implementation of land use planning policies, will provide significant results.

Citation: Ahmadi, A. M., Visi, A. (2024). **Comparative Evaluation of the Vulnerability of Shahu and Manshet karst Masses Using the COP Method**, Journal of Regional Planning, Vol 13, No 52, PP:273-286.

DOI: 10.30495/JZPM.2023.26434.3772

DOR:

* **Corresponding author:** Abdul majid Ahmadi, **Email:** a.ahmadi@razi.ac.ir, **Tel:** +989182310338

Extended Abstract

Introduction

The protection of environmental resources hinges on analyzing the risks of human activities to facilitate sustainable development. Risk involves factors such as hazard, vulnerability, exposure, and mitigation. For groundwater management, aquifer vulnerability maps are crucial, as they predict risks and prevent land misuse. Karst aquifers, in particular, are highly sensitive to pollution due to rapid transport times to saturated and unsaturated zones. Karst aquifers feature unique landforms that increase pollution risk by reducing protective cover. Despite the existence of various vulnerability models, a universal model applicable to all aquifers is lacking, complicating the determination of appropriate locations for vulnerability mapping. Researchers conduct extensive statistical analyses to identify relevant vulnerability indicators for each aquifer. For instance, sensitivity analysis helps ascertain the significance of different factors in vulnerability indices. Recent studies reveal that factors weakening environmental capacity strongly correlate with vulnerability indicators in fractured carbonate aquifers, while surface current concentration factors correlate more in karst aquifers. For example, Nukum and Hützel found significant differences in vulnerability maps using mean square analysis, emphasizing the importance of classification consistency. In northern Iran's Darfak region, research using the COPKAT model identified microbial and nitrate pollution from agriculture and livestock as major vulnerability sources. Similarly, in northern Italy, the COP+K model proved effective in highly sensitive karst systems. Other studies have linked vulnerability maps to groundwater quality maps. This research employs spatial and statistical analyses to create vulnerability maps using the COP method for two Zagros karst sites in Iran, a country facing a water scarcity crisis. With 11% of Iran's surface covered by high-quality groundwater-containing carbonate rocks, protecting these resources is critical. The studied areas differ in lithology, hydrogeology, climate, and karst evolution. Over the past decade, western Iran's semi-arid regions have faced severe pressure on karst water resources from overexploitation, pollution, and droughts. These vital water sources, essential for drinking and agriculture, are increasingly polluted by human activities. Given their geological and climatic context, safeguarding these aquifers through vulnerability assessment and management strategies is imperative.

Methodology

This applied development research uses various data sources, including a digital elevation model (10m resolution), geological maps (1:100,000), soil maps (1:250,000), vegetation maps, weather station rainfall and temperature statistics, karst spring discharge statistics, and field data. The COP method is employed to assess site vulnerability, based on concepts integral to European karst aquifer studies (Goldscheider et al., 2004). Developed under the European Cast 620 project, the COP model evaluates aquifer vulnerability and creates risk maps by considering three factors: covering layers (O), flow concentration layer (C), and precipitation regime (P). The covering layer includes soil thickness, porosity, permeability, and lithology of the unsaturated zone. The flow concentration factor pertains to areas with different infiltration conditions, especially where water infiltrates through protective layers. Two scenarios are distinguished: non-autogenous feeding from surface runoff via karst sinkholes, and areas of spontaneous feeding. The precipitation regime factor considers the amount and intensity of precipitation, influencing water's capacity to transport pollutants to groundwater. The vulnerability index for the COP method ranges from 0 to 15, categorized into five classes. ARC Gis software digitized maps of required factors, and calculated C, O, and P values. These were overlaid to derive final vulnerability scores. Results were compared with aquifer hydrogeological characteristics using Pearson's correlation coefficient to measure the vulnerability distribution of COP index data. Adobe Illustrator CS6 was used for diagram drawing.

Results and Discussion

In order to calculate the COP indices, different scenarios of this method were used. In this regard, in order to calculate the C index, scenario 2 was used (Figure 2). First, sf was calculated based on the karst geomorphological features of the area and sv index was calculated based on the slope and vegetation map of the area. The final score of this factor for Shahu region is between 0.2 and 0.9. The heights of the studied areas have evolved karst and landforms such as dolines, karst fields and smooth karst areas.

The middle parts of the Shahu karst massif, which is composed of Biston limestone formations and has metamorphosed karst, on the other hand, in the Manshet karst massif, which is mainly composed of Asmari limestone formation, metamorphosed karst landforms are less observed. and the variety of karst forms is less compared to the Shahu massif. Karst morphology has not been formed in the outcrops of marl formations and Quaternary deposits. In terms of vegetation, the Shahu region has less forest cover due to its stony and rocky terrain, while there is a semi-dense forest cover in the Manshet heights. The plains of both regions are used for agriculture. Vulnerable areas in factor C are located mainly corresponding to Biston limestone formations in Shahu and Asmari in Manshet, medium slope and dense to semi-dense vegetation. Zones with medium risk in the Shahu karst mass correspond to travertine formations and fossil limestones with semi-dense vegetation and moderate to high slopes. In the Manshet karst mass, the medium vulnerability class corresponds to carbonate karst with semi-dense vegetation and high slope. Low and very low risk zones in both regions mainly correspond to Quaternary and marl deposits that are mainly under agricultural land and lack karst geomorphology and have low slopes. In the C factor map in the study areas, karst geomorphology, slope and vegetation have the greatest effect on the amount of this factor. Figure 3 shows the area of C factor vulnerability classes in Shahu and Manshet karst masses.

Conclusion

Dependence on karst water resources in western Iran highlights the need to assess their vulnerability. This study uses the COP method to compare two karst sites with different hydrogeological, climatic, and lithological characteristics. The Shahu area is more vulnerable than Manshet due to higher karst development, reducing surface protective layers, and the presence of karst dolines that concentrate infiltration, weakening the unsaturated zone's protection. Hydrogeological indicators confirm these findings. Shahu's aquifers feature a channel system, indicating extensive karst development, while Manshet's aquifers have less development and a seam and fissure system. Shahu's vulnerability ranges from very low to high, whereas Manshet's ranges from very low to medium, owing to less karst development and more protective soil and sediments. Factor C (flow concentration) significantly influences high vulnerability due to extensive karst development. Factor O (covering layers) shows average vulnerability because of permeable limestone and sand-gravel formations. Factor P (precipitation) indicates that lower rainfall in Manshet reduces pollution penetration and vulnerability. The COP index in Manshet ranges from 1 to 6.34, classifying vulnerability as very low to moderate. In Shahu, vulnerability spans from very low to high, especially on southern slopes with limestone formations. GIS-based evaluation of the COP index helps identify pollution potential in karst areas, improving water resource management and land use planning. Effective management measures are crucial to balancing socio-economic development and protecting karst water resources from pollution.



فصلنامه علمی برنامه‌ریزی منطقه‌ای

دوره ۱۳، شماره ۵۲، زمستان ۱۴۰۲
شاپا چاپی: ۶۷۳۵-۲۲۵۱ - شاپا الکترونیکی: ۷۰۵۱-۲۴۲۳
<https://jzpm.marvdasht.iau.ir/>



مقاله پژوهشی

ارزیابی تطبیقی آسیب‌پذیری توده‌های کارستی شاهو و مانشت با استفاده از روش COP

عبدالمجید احمدی*، استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
عبدالکریم ویسی: دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ شماره صفحات: ۲۷۳-۲۸۶	ارزیابی آسیب‌پذیری امری مهم برای مدیریت پایدار منابع آب کارست و برنامه‌ریزی استفاده از زمین است. آبخوان‌های کارستی شاهو و مانشت نقش حیاتی در تامین آب شرب و کشاورزی جوامع محلی اطراف خود دارند. هدف این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری در دو منطقه کارستی با استفاده از روش COP است. از پارامترهای هیدروژئولوژیکی از جمله ضریب آلفا و حجم ذخیره دینامیکی برای مشخص کردن نوع سیستم کارستی استفاده گردید. همچنین با استفاده از ضریب تعیین بمنظور تعیین فاکتورهای مهم در آسیب‌پذیری این مناطق مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که آبخوان‌های کربناته دارای سیستم جریان افشان آسیب‌پذیری کمتری نسبت به آبخوان‌های کارستی دارای سیستم جریان مجرای دارند. در کارست‌های مجرای فاکتور C همبستگی مثبت بالایی را با شاخص آسیب‌پذیری دارد در حالی که در کارست‌های افشان فاکتور O همبستگی بیشتری با این شاخص دارد. عامل C به علت وسعت زیاد پهنه‌های کارست تکامل یافته در منطقه شاهو نقش اصلی را در بالابودن میزان آسیب‌پذیری این منطقه نسبت به توده کارستی مانشت دارا می‌باشد. همچنین نتایج طبقات آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که ۴۳ درصد توده کارستی شاهو در طبقه آسیب‌پذیری زیاد و متوسط واقع شده است و در مقابل مساحت این طبقات در منطقه مانشت به مراتب کمتر (۲۷ درصد) است. وجود اشکال کارستی توسعه یافته از جمله دولین‌ها، مگاکارن‌ها، غارهای عمیق و درزه و شکاف فراوان در منطقه شاهو دال بر توسعه یافتگی بیشتر این منطقه نسبت به توده کارستی مانشت می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی چنانچه با مطالعات ژئوفیزیکی آبخوان‌ها و همچنین اجرای صحیح سیاست‌های برنامه‌ریزی استفاده از زمین همراه باشد، نتایج قابل توجهی را ارائه می‌دهند.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

آسیب‌پذیری کارست، روش COP، تحلیل آماری، آبخوان-های کارستی.

استناد: احمدی عبدالمجید، عبدالکریم؛ ویسی (۱۴۰۲). ارزیابی تطبیقی آسیب‌پذیری توده‌های کارستی شاهو و مانشت با استفاده از روش COP، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال ۱۴، شماره ۵۳، مرودشت: صص ۲۷۳-۲۸۶.

DOI: 10.30495/JZPM.2023.26434.3772

DOR:

* نویسنده مسئول: عبدالمجید احمدی، پست الکترونیکی: a.ahmadi@razi.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۸۲۳۱۰۳۳۸

مقدمه

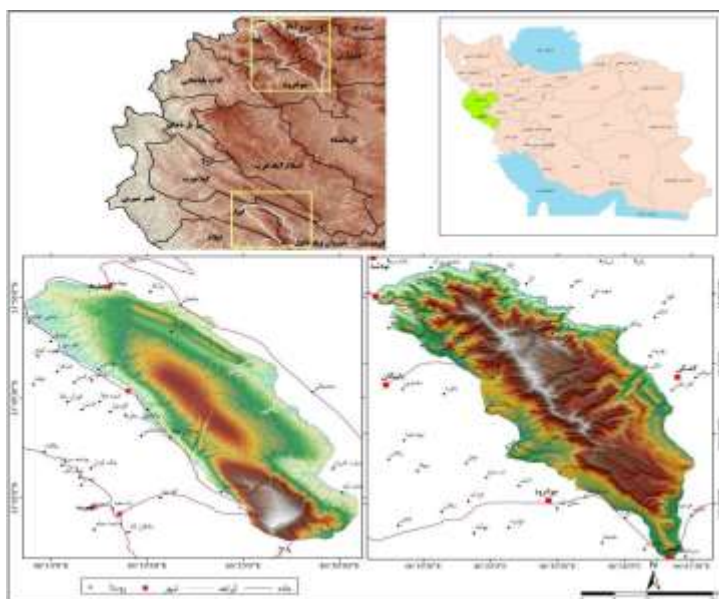
بطور کلی حفاظت محیط و منابع آن وابسته به تحلیل ریسک فعالیت‌های انسانی به منظور مدیریت و توسعه پایدار است (Daly et al, 2002:341). ریسک نتیجه ارتباط بین چندین مولفه است که شامل: مخاطره، آسیب‌پذیری، در معرض‌گذاری، کاهش و غیره است (Vias et al, 2006:915). در مورد منابع آب زیرزمینی، نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان‌ها یک ابزار مهم برای مدیریت و حفاظت آب‌های زیرزمینی هستند (Zhwlan, 2004:36). آسیب‌پذیری یکی از مولفه‌های ریسک برای آلودگی است که مستقل از عملکردهای انسانی است. از این رو پیش‌بینی ریسک با استفاده از نقشه‌های آسیب‌پذیری محتمل است که می‌تواند از استفاده نادرست از زمین جلوگیری کند (Perles et al, 2009:326). حفاظت آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی دارای یک اهمیت ویژه است، چرا که زمان حمل به زون اشباع و غیراشباع خیلی کوتاه است؛ بنابراین در برابر آلودگی بسیار حساس هستند (Tolga Pusatli et al, 2009:343). این همچنین برای مدیریت آب زیرزمینی مهم است. در آبخوان‌های کارستی لندفرم‌های خاصی وجود دارد (دولین، پلژه، میدان‌ها کارن و غیره) که موجب کاهش پوشش حفاظتی و در نتیجه افزایش خطر آلودگی می‌شوند (ghadimi et al: 2015,45). کشور ایران به عنوان یک کشور که با بحران کم‌آبی پیش‌رو است، نیازمند توجه زیاد به این منابع است. تقریباً ۱۱٪ از سطح کشور بوسیله سنگ‌های کربناته که مقادیر زیادی از آب‌های زیرزمینی با کیفیت مناسب است را در برمی‌گیرد (afraziabian, 1994:42). هدف از این پژوهش به کارگیری مدل COP به بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان یک روش موثر در ارزیابی خطر آلودگی منابع آب کارست و در نهایت تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی شاهو و مانشت است. مناطق مورد مطالعه از نظر لیتولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، ویژگی‌های آب و هوایی و همچنین میزان تحول‌یافتگی کارست دارای تفاوت هستند. در طول دهه گذشته در مناطق نیمه خشک غرب ایران منابع آب کارست به عنوان منبع اصلی تامین آب جوامع محلی، از لحاظ کمی و کیفی تحت فشار عواملی همچون بهره‌برداری بی‌رویه، آلودگی تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی و خشکسالی‌های متعدد بوده است. با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژی کارست منطقه، این منابع مهم و اصلی تامین آب منطقه، در معرض آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی انسان قرار گرفته‌اند. این مناطق با توجه به وجود سازندهای آهکی، شرایط اقلیمی گذشته و حال و ویژگی‌های تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی کارست، دارای منابع بارز آب زیرزمینی می‌باشند که منبع اصلی تامین آب شرب و کشاورزی سکونتگاه‌های شهری و دیگر نقاط انسانی این منطقه است. بنابراین بررسی آسیب‌پذیری و همچنین ارائه راهکارهای مدیریتی به منظور حفظ این آبخوان کارستی از آلودگی امر لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

پیشینه تحقیق و مبانی نظری

در حال حاضر مدل‌های آسیب‌پذیری زیادی وجود دارند اما مدل جهانی مطابق با آسیب‌پذیری آبخوان‌های مختلف وجود ندارد. هنگامی که مدل‌های مختلف بمنظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری بکار گرفته می‌شوند، تعیین مکان‌های مناسب بسیار مشکل است. بمنظور بررسی این مسئله بسیاری از محققین تحلیل‌های آماری زیادی برای تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری مناسب در هر آبخوان انجام داده‌اند (Vias et al, 2006:915). برای مثال korniilo, 2018 با تحلیل آماری همبستگی شاخص‌های آسیب‌پذیری را در مناطق مشابه به دست آوردند. دیگر تکنیک مورد استفاده در آبخوان‌های کربناته، تحلیل حساسیت است که به منظور تعیین اهمیت فاکتورهای مورد نظر در شاخص آسیب‌پذیری بکار گرفته شده است (Kufs, 1992:125). Vias et al, 2019 تحلیل‌های آماری مختلفی را با روش‌های متعددی برای تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری در دو منطقه مختلف به دست آوردند. امروزه محققین دریافته‌اند که فاکتورهای مرتبط با تضعیف ظرفیت کنونی محیط همبستگی بالایی را با شاخص‌های آسیب‌پذیری در آبخوان‌های کربناتی شکسته دارد در حالیکه آن‌هایی که با غلظت جریات در سطح مرتبط هستند همبستگی بالاتری با شاخص‌های آسیب‌پذیری در آبخوان‌های کارستی دارند (Daly et al, 2002:342). (Nokom and hotzel, 2007). تحلیل نقشه آسیب‌پذیری منطقه بوشلوتر با استفاده از میانگین مربعات دریافته‌اند که تفاوت در نقشه‌های آسیب‌پذیری بسیار مهم هستند؛ هنگامی که طبقه‌بندی‌های مشابه انجام می‌شود. ghezel eyagh et al, 2021 با ارزیابی آسیب‌پذیری کارست در منطقه درفک در شمال ایران با استفاده از مدل ترکیبی COPKAT دریافته‌اند که بیشترین آسیب‌پذیری در منطقه مورد مطالعه به آلودگی‌های میکروبی و نیتراتی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و دامی می‌باشد. keritini et al, 2021 با مطالعه آبخوان‌های کارستی شمال ایتالیا با استفاده از مدل COP+K دریافته‌اند که این مدل کارایی بسیار زیادی در سیستم‌های کارستی دارای حساسیت بالا دارند. دیگر محققین بین نقشه‌های آسیب‌پذیری با نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی همبستگی برقرار کردند (Leon et al, 2009; Tolga Pusatli et al, 2009; Almasri, 2008). در تحقیق حاضر تحلیل‌های فضایی و آماری بمنظور تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری با استفاده از روش COP در دو سایت کارستی زاگرس انجام شده است (شکل ۱).

مواد و روش تحقیق

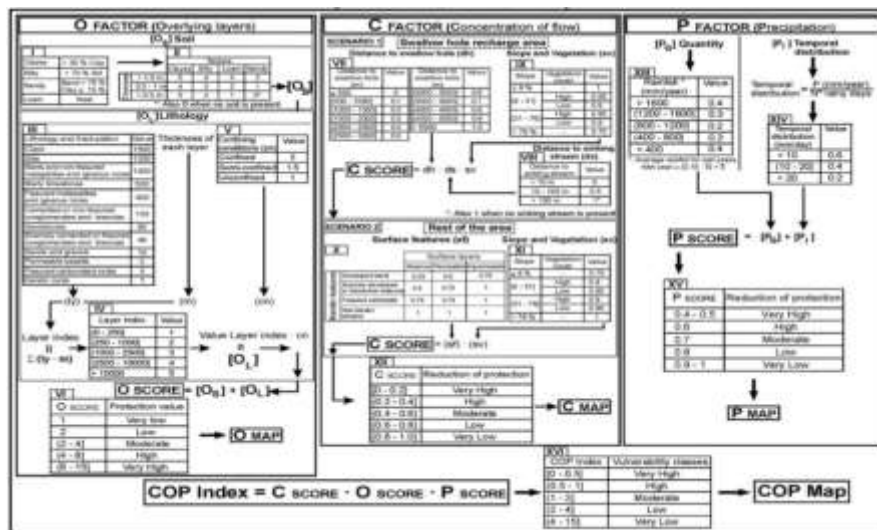
توده کارستی شاهو عمدتاً شامل یک توده کوهستانی آهکی با ضخامت نسبتاً زیاد است که سن آهک‌های آن به کرتاسه برمی‌گردد و با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی در حدفاصل استان‌های کردستان و کرمانشاه قرار گرفته است. شهرهای پاوه، روانسر و جوانرود در دامنه جنوبی این ناهمواری قرار گرفته‌اند و از مهم‌ترین مراکز استقرار انسانی در دامنه شمالی می‌توان به روستای پالنگان اشاره نمود. مساحت منطقه مورد بررسی در حدود ۶۳۲ کیلومترمربع است که بین عرض‌های ۳۴° ۴۷' تا ۳۵° ۷' ۵" و طول شرقی ۲۹° ۲۳' ۴۶" تا ۳۰° ۴۰' ۴۶" واقع شده است (شکل ۱). وسعت اشکال کارستی سطحی شاهو به اندازه‌ای است که به‌آسانی از روی نقشه‌های توپوگرافی قابل تشخیص می‌باشد. چشمه‌های کارستی متعددی با دبی بالا در پیرامون این ناهمواری وجود دارد و در سال‌های اخیر پروژه‌های چندی برای بهره‌برداری از منابع آب احداث گردیده است. جریان‌های خروجی از ارتفاعات شاهو از طریق دو شبکه جداگانه یکی در شرق (حوضه آبریز قره‌سو) و دیگری در غرب (حوضه آبریز سیروان) به حوضه آبریز خلیج فارس می‌پیوندند. توده کارستی مانشت، با ارتفاع ۲۶۲۹ متر، در ۶ کیلومتری شمال شرقی شهر ایلام واقع است و سرچشمه آب زنگاون، کنگیر و رودخانه مورت است. مانشت از شمال غربی به کوه بانکول و از جنوب غربی به کوه گاوهر متصل است و بین عرض‌های شمالی ۳۳° ۴۰' ۵" تا ۳۳° ۴۷' ۰" و طول شرقی ۳۴° ۴۰' ۰" تا ۳۴° ۳۳' ۲۵" واقع شده است. دامنه‌های شرقی و غربی آن را جنگل‌های بلوط پوشانیده‌اند (شکل ۱). مساحت محدوده مورد بررسی در حدود ۳۷۵ کیلومترمربع است. از نظر ساختاری این منطقه در قسمت زاگرس چین‌خورده قرار دارد و از نظر چینه‌شناسی رخنمون‌هایی از سنگ‌های کرتاسه بالایی تا پلیو - کواترنر دیده می‌شود. در این منطقه میانگین بارندگی سالیانه معادل ۶۳۲ میلی‌متر محاسبه شده است. مهم‌ترین مراکز انسانی در این منطقه شهرهای ایلام در جنوب و شهر ایوان‌غرب در غرب آن می‌باشند. وجود چشمه‌های کارستی، اشکال میکروکارن، مزوکارن و مگاکارن، غارهای افقی و عمودی (مانند غار قوری قلعه، غار کاراوت در شاهو)، دولین‌های متعدد کارستی و همچنین پولیه‌های کارستی از مهم‌ترین لندفرم‌های کارستی در هر دو منطقه محسوب می‌شوند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

پژوهش حاضر از نوع پژوهش‌های توسعه‌ای کاربردی است. داده‌های اصلی تحقیق شامل مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه خاک ۱:۲۵۰۰۰۰، نقشه پوشش گیاهی، آمار بارش و دمای ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، آمار دبی چشمه‌های کارستی و داده‌های برداشت میدانی می‌باشد. از روش COP به منظور بررسی آسیب‌پذیری برای سایت‌های ذکر شده بکار گرفته شده است. مفاهیم پایه این مدل یک تفسیر انتگرالی از رویکرد آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کارستی اروپا است (Goldscheider et al, 2004: 17). مدل COP به عنوان بخشی از پروژه کست ۶۲۰ اروپا، به منظور بررسی آسیب‌پذیری و تهیه نقشه ریسک در راستای حفاظت از آبخوان‌های کارستی آغاز شد.

این مدل سه فاکتور را برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع در نظر می‌گیرد که شامل: لایه‌های پوشاننده (O)، لایه تمرکز جریان (C) و رژیم بارشی (P) است. فاکتور لایه پوشاننده لایه‌های بالاتر از زون اشباع را دربرمی‌گیرد که حفاظت از آبخوان را برعهده دارند. ویژگی‌هایی از جمله ضخامت، تخلخل و نفوذپذیری خاک و همچنین لیتولوژی زون غیراشباع را دربرمی‌گیرد. فاکتور تمرکز جریان شامل مناطق مشخص دارای شرایط متفاوت به لحاظ نفوذ است؛ به ویژه در جایی که آب نفوذی از لایه‌های حفاظت‌کننده عبور می‌کند (Gogu et al, 2003:887). این دو سناریو می‌تواند تشخیص داده شود (شکل ۲). سناریو الف) در نظر گرفتن تغذیه غیرخودزا از رواناب سطحی در سطح حوضه که از طریق فروچاله‌های کارستی صورت می‌پذیرد. سناریو ب) مناطقی را که تغذیه خودزا صورت می‌گیرد در برمی‌گیرد. فاکتور رژیم بارشی شامل میزان بارش و توزیع مکانی آن است (شدت). این فاکتور تعیین‌کننده توانایی آب برای حمل آلودگی از سطح زمین به سمت آب‌های زیرزمینی است. شاخص آسیب‌پذیری برای روش COP، بین ۰ تا ۱۵ متغیر می‌باشد و به پنج کلاس آسیب‌پذیری تقسیم می‌شود. شکل ۲ چگونگی محاسبه روش COP را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه شاخص‌های مورد نظر مدل، از نرم‌افزار Arc Gis استفاده شد. نقشه عوامل مورد نیاز هر شاخص از روی نقشه‌های موجود رقومی گردید. سپس با استفاده از توابع توابع مختلف مقادیر شاخص‌های O، C و P محاسبه شد. در نهایت با هم‌پوشانی شاخص‌های به دست آمده، مقادیر نهایی آسیب‌پذیری به دست آمد. نقشه عوامل مورد نیاز هر شاخص از روی نقشه‌های موجود رقومی گردید. سپس با استفاده از توابع Geoprocessing مقدار شاخص‌های O، C و P در منطقه محاسبه شد. در نهایت با هم‌پوشانی نقشه‌ها امتیاز نهایی آسیب‌پذیری به دست آمد. در ادامه نتایج حاصل از روش COP با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها از جمله ضریب آلفا و حجم ذخیره دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. از نرم‌افزار Adobe illustrator cs6 برای ترسیم نمودارها استفاده شد.



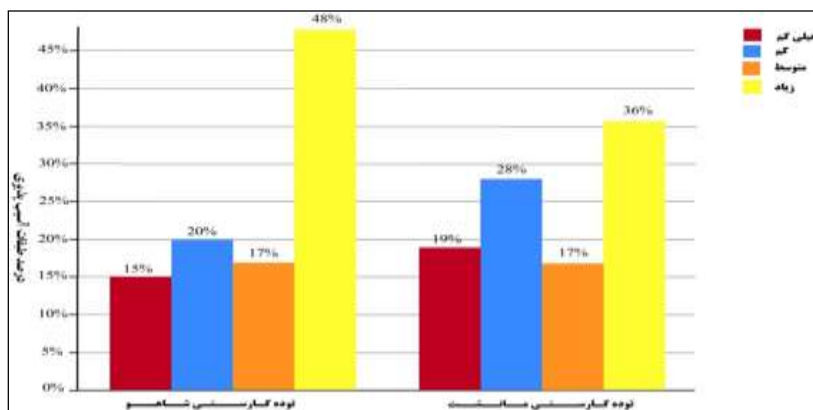
شکل ۲- فلوجارت ارزیابی آسیب‌پذیری کارست با روش COP (Vias et al, 2006)

ارتباط بین فاکتورها و شاخص آسیب‌پذیری برای هر آبخوان می‌تواند به صورت آماری با استفاده از ضریب همبستگی به دست بیاید (Kufs, 1992:122). در پژوهش حاضر ضریب تعیین (ضریب همبستگی پیرسون) به منظور سنجش آسیب‌پذیری در توزیع داده‌های شاخص COP با توجه به توزیع ارزش فاکتورهای سه‌گانه مدل به کارگرفته شده است.

بحث و یافته‌های تحقیق

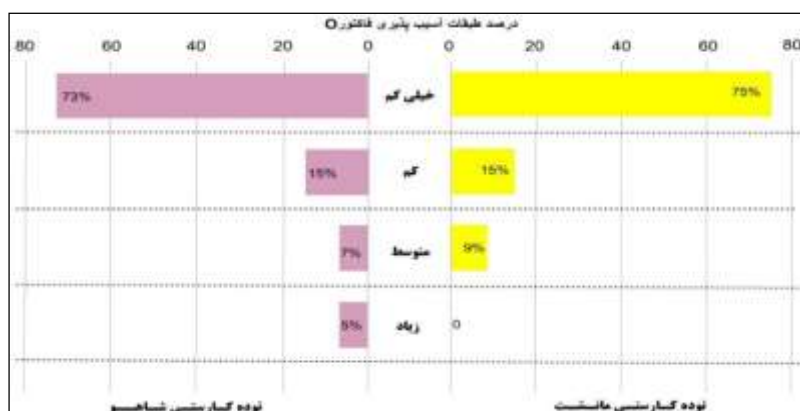
به منظور محاسبه شاخص‌های COP از سناریوهای مختلف این روش استفاده شد. در همین راستا به منظور محاسبه شاخص C از سناریو ۲ استفاده گردید (شکل ۲). ابتدا بر اساس ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست منطقه و شاخص SV بر اساس نقشه شیب و پوشش گیاهی منطقه محاسبه گردید. امتیاز نهایی این عامل برای منطقه شاهو بین ۰/۲ تا ۰/۹ می‌باشد. ارتفاعات مناطق مورد مطالعه دارای کارست تحول‌یافته و لندفرم‌هایی همچون دولین‌ها، میدان‌های کارن و پهنه‌های هموار کارستی می‌باشند. قسمت‌های میانی توده کارستی شاهو که از سازندهای آهکی بیستون تشکیل شده است و دارای کارست تحول‌یافته می‌باشد در مقابل در توده کارستی مانشت که عمدتاً از سازند آهکی آسماری تشکیل شده است، لندفرم‌های تحول‌یافته کارستی کمتر مشاهده می‌شود و تنوع اشکال کارستی نسبت به توده شاهو کمتر است. در محل‌های رخنمون سازندهای مارنی و نهشته‌های کواترنری، مورفولوژی کارستی شکل نگرفته است. از نظر پوشش گیاهی ارتفاعات منطقه شاهو

به واسطه سنگلاخی و صخره‌ای بودن پوشش جنگلی کمتری را دارا می‌باشد در مقابل پوشش نیمه انبوه جنگلی در ارتفاعات مانشت وجود دارد. سطوح دشتی هر دو منطقه دارای کاربری کشاورزی می‌باشند. مناطق آسیب‌پذیر در فاکتور C عمدتاً منطبق بر سازندهای آهکی بیستون در شاهو و آسماری در مانشت، شیب متوسط و پوشش گیاهی متراکم تا نیمه متراکم واقع شده است. پهنه‌های دارای خطر متوسط در توده کارستی شاهو منطبق بر سازندهای تراورتنی و آهک‌های فسیلی با پوشش گیاهی نیمه متراکم و شیب متوسط تا زیاد است. در توده کارستی مانشت طبقه آسیب‌پذیری متوسط منطبق بر کارست کربناتی با پوشش گیاهی نیمه متراکم و شیب زیاد است. پهنه‌های خطر کم و خیلی کم در هر دو منطقه عمدتاً منطبق بر نهشته‌های کواترنری و مارنی که عمدتاً تحت زمین‌های کشاورزی بوده و فاقد ژئومورفولوژی کارست و دارای شیب کم هستند. در نقشه فاکتور C در مناطق مورد مطالعه به ترتیب ژئومورفولوژی کارست، شیب و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را در میزان این فاکتور دارند. شکل ۳ مساحت طبقات آسیب‌پذیری فاکتور C را در توده‌های کارستی شاهو و مانشت نشان می‌دهد.



شکل ۳- درصد طبقات آسیب‌پذیری بر اساس فاکتور C (منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

فاکتور O بر اساس ضخامت، تخلخل، ویژگی‌های نفوذپذیری خاک و ضخامت و جنس لایه‌های لیتولوژی محاسبه می‌گردد. مجموع این دو فاکتور نشان‌دهنده درجه حفاظت آبخوان با لایه‌های پوشاننده است. شکل ۲ نحوه امتیازدهی به زیرفاکتورهای این شاخص را نشان می‌دهد. سازند بیستون در منطقه شاهو و سازند آسماری در منطقه مانشت از آهک تشکیل شده‌اند. پادگانه‌ها و مخروط‌افکنه‌های قدیمی مناطق مورد مطالعه عمدتاً از آبرفت‌های درشت‌دانه تا متوسط با درصد زیادی از ماسه و گراول تشکیل شده‌اند. شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی عامل O و شکل ۴ مساحت هریک از طبقات آسیب‌پذیری را در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. امتیاز نهایی این عامل در منطقه شاهو بین ۴ تا ۱۰/۲ و در منطقه مانشت ۱ تا ۶ می‌باشد. در منطقه شاهو مناطقی که در پهنه آسیب‌پذیری زیاد واقع شده‌اند؛ عمدتاً منطبق بر سازندهای آهکی بیستون و توده‌های تراورتنی است و در منطقه مانشت منطبق بر سازند آسماری بوده و بیشتر دارای خاک کامبیسوپیل با ضخامت کمتر از ۰/۵ بوده و ۱۱ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شود. پهنه با خطر آسیب‌پذیری متوسط منطبق بر دامنه‌های هر دو توده کارستی می‌باشد. در نقشه فاکتور O به ترتیب ضخامت سازندها، جنس سازندها و خاک نقش بیشتری را دارا می‌باشند. به این اساس منطقه شاهو در پهنه‌های با آسیب‌پذیری زیاد تا خیلی کم و منطقه مانشت در پهنه‌های آسیب‌پذیری خیلی کم، کم و متوسط قرار گرفته است.



شکل ۴- درصد طبقات آسیب‌پذیری بر اساس فاکتور O (منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

فاکتور P که شامل مقدار بارش و عواملی است که حمل آلاینده‌ها از سطح به آب زیرزمینی را افزایش می‌دهند. این فاکتور به‌وسیله دو زیرفاکتور مقدار بارش (PQ) و توزیع زمانی بارش (PI) ارزیابی می‌گردد. نقشه هم بارش منطقه شاهو بر اساس آمار ایستگاه‌های بارندگی روانسر، جوانرود، پاره، کامیاران، مریوان و تازه‌آباد و نقشه هم بارش منطقه مانشت بر اساس آمار ایستگاه‌های ایوانغرب، ایلام، سرابله، سومار و گیلان‌غرب تهیه گردید. با توجه به اختلاف ارتفاع در سطح مناطق مورد مطالعه میزان بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه قابل‌تعمیم به سایر مناطق حوضه نبوده و باید میزان بارش برای تمامی سطح منطقه با استفاده از روش‌های موجود برآورد گردد. در این راستا میانگین بارش سالانه به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های سینوپتیک، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی مختلف در منطقه شاهو بیانگر کمینه ۳۹۰ میلی‌متر و بیشینه ۸۴۰ میلی‌متر و در منطقه مانشت کمینه بارش برابر با ۳۷۰ و بیشینه بارش ۶۸۵ میلی‌متر است، که در رابطه با ارتفاع، بیانگر افزایش نسبی بارش با افزایش ارتفاع است. روابط ۱ و ۲ رابطه گردایان بارش را به ترتیب برای منطقه شاهو و مانشت نشان می‌دهد؛ که در سطح بالای ۰/۹۰ معنادار می‌باشند. بر اساس این معادلات نقشه هم‌باران مناطق مورد مطالعه تهیه شد.

$$Y = 0.236x + 274.4 \text{ و } R^2 = 0.82 \quad \text{رابطه (۱)}$$

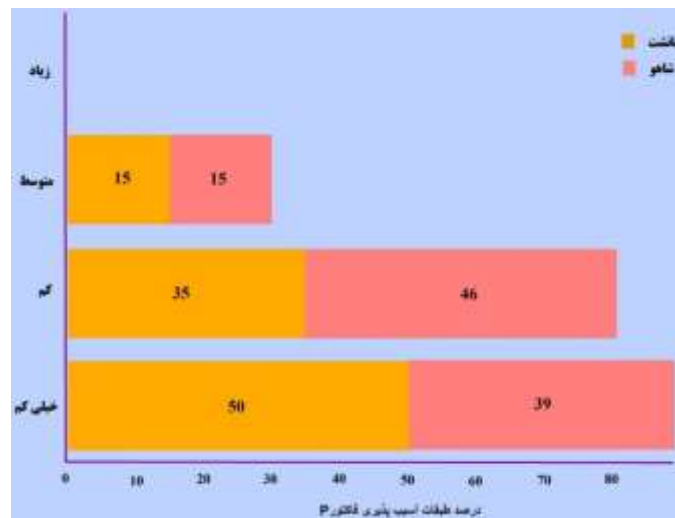
$$Y = 0.8571x + 63.4 \text{ و } R^2 = 0.743 \quad \text{رابطه (۲)}$$

زیر فاکتور توزیع زمانی بارش که بارش را در یک دوره معینی در نظر می‌گیرد، نمایانگر شدت بارش است. به‌منظور تهیه نقشه توزیع زمانی باش ابتدا تعداد روزهای بارندگی در سال را به دست آورده که برای ایستگاه روانسر برابر با ۷۹ روز در سال و برای ایستگاه ایوانغرب ۶۵ روز در سال است. با توجه به اینکه منطقه دارای نقاط ارتفاعی متفاوت می‌باشد؛ این مقدار قابل‌تعمیم به‌تمامی نقاط نمی‌باشد. در نتیجه با توجه به رابطه ۱ و ۲ این مقدار با هر ۵۰۰ متر افزایش ارتفاع ۷ روز به تعداد روزهای بارش افزوده می‌شود. در نهایت زیرفاکتور PI با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$Y = \frac{P}{N} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در اینجا P میانگین بارش سالانه (میلی‌متر در سال) و N تعداد روزهای بارندگی است.

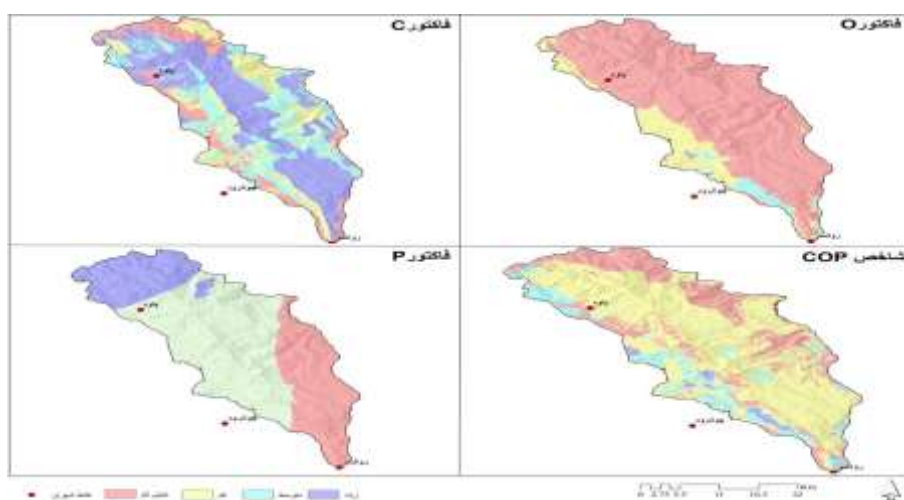
شکل ۵ مساحت هر کدام از طبقات آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. امتیاز نهایی این عامل در منطقه شاهو ۰/۷ تا ۰/۹ و در منطقه مانشت ۰/۸ تا ۰/۹ می‌باشد که به دو طبقه آسیب‌پذیری کم و خیلی کم تقسیم می‌شود.



شکل ۵- درصد طبقات آسیب‌پذیری بر اساس فاکتور P (منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

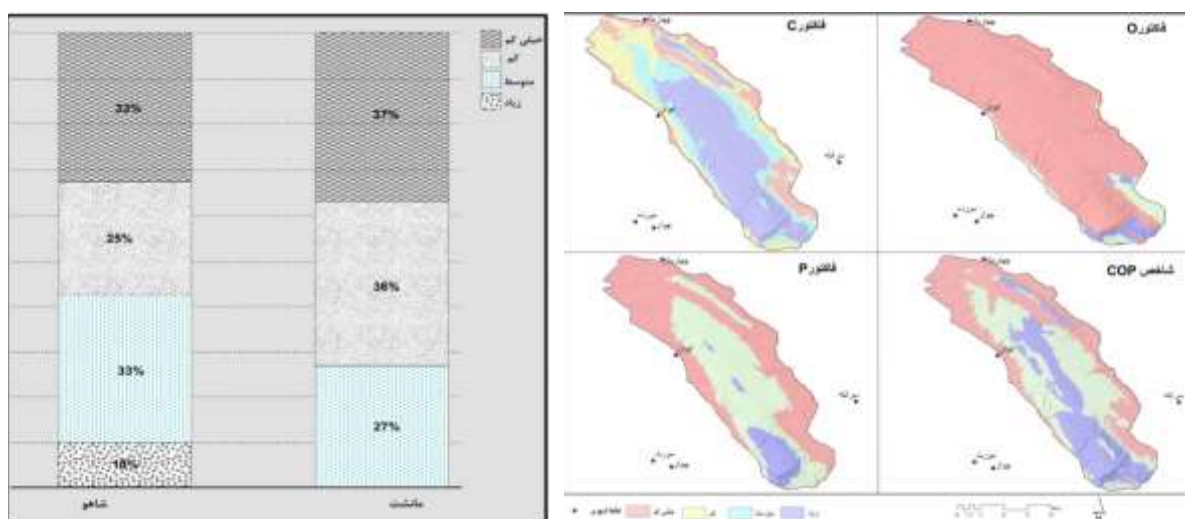
نقشه‌های آسیب‌پذیری برای هر دو سایت نشان‌دهنده میزان آسیب‌پذیری بالای این مناطق بر اساس ویژگی‌های محیطی است. میزان آسیب‌پذیری منطقه شاهو به‌واسطه توسعه زیاد آبی‌کارست عمدتاً در چهار طبقه زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شده است که عملکرد حفاظتی زون غیراشباع را کاهش می‌دهد (شکل ۶). لندفرم‌های زیادی از جمله دولین‌ها و انواع کارن در این منطقه وجود دارد که قابلیت آسیب‌پذیری بالایی را دارا می‌باشند. پلژه‌های بخش مرکزی شاهو به‌وسیله آهک ضخیم توده‌ای بیستون و خاک پوشیده شده‌اند و باعث می‌شوند تا رواناب سطحی مستقیماً به درون فروچاله‌ها نفوذ کرده و از لایه‌های محافظ عبور می‌کنند. در حاشیه غربی منطقه شاهو پوشش خاک محافظ توسعه یافته نیست و سطح پیزومتریک خیلی عمیق نیست. در نتیجه این عوامل میزان آسیب‌پذیری بسیار بالا است. درجات پایین

آسیب‌پذیری در مناطق دارای سازندهای با نفوذپذیری کم‌تر (آهک ماری و فلیش) مشخص شده‌اند که زهکشی مناسبی را به سمت فروچاله‌ها ایجاد نمی‌کند. پهنه‌بندی طبقات آسیب‌پذیری با روش COP در وهله اول متأثر از نقشه فاکتور C است و در مرتبه بعدی فاکتور O قرار دارد.



شکل ۶- نقشه شاخص COP و فاکتورهای COP در منطقه شاهو (منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

آسیب‌پذیری ذاتی منطقه کارستی مانشت با منطقه شاهو تفاوت زیادی دارد. به‌گونه‌ای که میزان آسیب‌پذیری در منطقه شاهو از متوسط تا خیلی کم متغیر است (شکل ۷). این تغییرپذیری به‌واسطه اختلاف ضخامت زون غیراشباع است. به نظر می‌رسد آسیب‌پذیری در جایی که زون غیراشباع ضخامت کمی دارد، بالا است. در جاهایی که زون غیراشباع دارای ضخامت زیاد است میزان آسیب‌پذیری کمتر است. به‌طور کلی آسیب‌پذیری در منطقه مانشت به سمت مرکز و شمال غربی منطقه کاهش می‌یابد چراکه ضخامت زون غیراشباع افزایش می‌یابد. کلاس‌های آسیب‌پذیر کم و خیلی کم در قسمت‌های شرقی و شمالی واقع شده است که وجود مارن و همچنین خاک مناسب در این منطقه باعث محافظت از آب‌های زیرزمینی می‌شود. در منطقه مانشت توزیع طبقات آسیب‌پذیری وابسته به فاکتور O می‌باشد. میزان فاکتور O در این منطقه از مرکز به سمت حاشیه‌ها کمتر می‌شود. دیگر تغییرات جزئی طبقات آسیب‌پذیری به‌واسطه فاکتور C در لایه‌های نفوذپذیر و فاکتور P در نتیجه رخنمون لایه‌های با نفوذپذیری پایین در حاشیه‌های منطقه مانشت رخ داده است. شکل ۸ در هر یک از طبقات آسیب‌پذیری را در هر دو منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۸- درصد طبقات آسیب‌پذیری شاخص COP (منبع:

داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

شکل ۷- نقشه شاخص COP و فاکتورهای COP در منطقه مانشت

(منبع: داده‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

در توده کارستی شاهو شاخص COP همبستگی بالاتری با عامل C دارد. آبخوان‌های منطقه شاهو رفتار هیدروژئولوژیکی متفاوتی در مقایسه با منطقه مانشت دارند. واکنش سریع چشمه‌های شاهو به وقایع بارشی نتیجه ارتباط مستقیم بین سطح توپوگرافی و چشمه‌هاست. منطقه شاهو به واسطه لندفرم‌های اگزوکارست فراوان که منابع ورودی و خروجی را به هم متصل کرده درجه بالاتری از کارستی شدن را دارا است. بنابراین اگر کارستی شدن یک فرایند مهم در آسیب‌پذیری کارست باشد، عوامل مرتبط با توسعه کارست نیز دارای اهمیت هستند. همبستگی بین عامل C و شاخص COP نشان می‌دهد که توسعه‌یافتگی کارست یک عامل مهم برای آسیب‌پذیری است. در توده کارستی مانشت نیز شباهت قابل مشاهده‌ای بین عامل C و شاخص COP وجود دارد. در این منطقه توزیع نقشه C مشابه با نقشه COP است و تنها در مقادیر طبقات آسیب‌پذیری تغییراتی وجود دارد. در منطقه مانشت شاخص COP همبستگی بالایی با عامل O دارد. این واقعیت بازتاب‌دهنده اهمیت لایه‌های حفاظتی و وجود سیستم تغذیه غیرمتمرکز (افشان) است. همبستگی بین عامل P و شاخص COP در هر دو منطقه مورد مطالعه پایین است. این بدان معنی نیست که رژیم بارش هیچ تأثیری بر آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی ندارد. به واسطه تغییرات فضایی کم عامل P، به‌مثابه یک ضریب ثابت رفتار می‌کند و همبستگی کمی با شاخص‌های آسیب‌پذیری دارد (جدول ۱).

جدول ۱- همبستگی (ضریب تعیین) بین عامل‌های آسیب‌پذیری و شاخص COP

همبستگی	توده کارستی شاهو	توده کارستی مانشت
شاخص COP- عامل C	۰/۸۸	۰/۵۶
شاخص COP- عامل O	۰/۳۱	۰/۶۴
شاخص COP- عامل P	۰/۰۰	۰/۰۰

ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها

جدول ۲ میزان پارامترهای ژئوهیدرولوژی چشمه‌های شاخص مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که چشمه‌های جابری، روانسر و هولی در منطقه شاهو دارای سیستم مجرای می‌باشند. ضریب آلفا در این چشمه‌ها تند می‌باشد که حاکی از توسعه‌یافته بودن مجاری کارستی در این منطقه می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- الف: فروچاله‌های کارستی توده کارستی شاهو و پونورهای کف آن، ب: نمونه‌ای از دولین‌ها در ارتفاع ۳۱۴۰ متری شاهو، ج: فراوانی غار در دامنه‌های شاهو د: کف دولین کارستی در ارتفاع ۳۲۱۰ متری، ه: کارن‌های شیباری که به عنوان هدایت‌کننده آب‌های سطحی عمل می‌کنند، و: درز و شکاف و کارن‌های شیباری فراوان در آهک بیستون (منبع: نگارندگان)

در مقابل چشمه‌های فرزگه، دبیران و سراب ایوان در منطقه مانشت دارای سیستم افشان می‌باشند؛ به‌گونه‌ای که دارای یک ضریب ملایم می‌باشند و ضریب تغییرات در آن‌ها ناچیز است. در این چشمه‌ها مجراهای کارستی توسعه‌یافته نبوده و ارتباط هیدرولیکی مناسبی بین آن‌ها

وجود ندارد، از این رو آب‌های زیرزمینی نیاز به زمان بیشتری برای جابجایی در آبخوان‌ها دارند. برخلاف چشمه‌های کارستی منطقه شاهو، حجم ذخیره دینامیکی چشمه‌های منطقه مانشت بالا است که حاکی از توسعه‌یافتگی کمتر کارست منطقه می‌باشد. زمان مرگ این چشمه‌ها نشان‌دهنده تأثیرپذیری کم این چشمه‌ها نسبت به نوسانات بارشی است که این امر نیز توسعه کم مجاری کارستی را در این منطقه تأیید می‌کند (شکل ۱۰).

جدول ۲- ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی مناطق مورد مطالعه

چشمه	ضریب تغییرات	1α	2α	3α	مقادیر ضریب α	حجم ذخیره دینامیکی m^3/s
فرزگه	۲۸/۶۲	۰/۰۰۴	-	-	ملایم	۴۹۶۲۵۴/۳۷۱
دبیران	۲۰/۳۹	۰/۰۰۲	-	-	ملایم	۵۹۷۶۴/۲۸۸
سراب	۲۲/۱۵	۰/۰۰۳	-	-	ملایم	۵۹۳۴۶۴۱/۱۱۶
هولی	۱۲۳/۹	۰/۰۲۶	۰/۰۱۳	-	تند- تند	۳۱۱۵۹۳۸/۲۱
روانسر	۱۱۹/۲	۰/۱۳۶	۰/۱۱۱	۰/۰۰۷	تند- تند- ملایم	۸۳۱۴۰۳۶/۳۶۶
جابری	۴۸/۶۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	تند- ملایم- ملایم	۶۵۰۴۹۹۴/۲۵۳



شکل ۱۰. الف: فروچاله کارستی در جنوب غربی منطقه مانشت ب: سیستم‌های درز و شکاف در آهک آسماری ج: وجود لایه‌های حفره‌ای در بخش‌های مرتفع و دامنه شمالی مانشت، ج: پونورهای موجود در کف فروچاله مانشت

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

وابستگی بخش‌های مختلف جوامع انسانی غرب کشور به منابع آب کارست، اهمیت ارزیابی آسیب‌پذیری این منابع را فزونی می‌بخشد. در ارتباط با آسیب‌پذیری طبیعی در مناطق کارستی مطالعات زیادی صورت گرفته است اما بیشتر تحقیقات صورت گرفته یا به صورت توصیفی بوده، یا فاقد اعتبارسنجی بوده و همچنین مقایسه مکانی انجام نشده است. در پژوهش حاضر از روش COP به صورت مقایسه‌ای در دو سایت کارستی که به لحاظ ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، اقلیمی و سنگ‌شناسی متفاوت هستند، استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصله منطقه کارستی شاهو در مقایسه با توده کارستی مانشت به دلیل میزان بالای توسعه‌یافتگی کارست که منجر به کاهش پوشش‌های محافظ در سطح می‌شوند سطح بالاتری از آسیب‌پذیری را دارا است. همچنین وجود دولین‌های کارستی که باعث تغذیه متمرکز در این منطقه شده است نیز باعث کاهش عملکرد لایه‌های حفاظتی در زون غیراشباع شده است. شاخص‌های هیدروژئولوژیکی تأییدکننده نتایج حاصل از روش COP می‌باشند. با استفاده از شاخص‌های هیدروژئولوژیکی مشخص گردید که آبخوان‌های منطقه شاهو دارای سیستم مجاری هستند که بیانگر

توسعه‌یافته‌بودن کارست این منطقه است. درحالی‌که آبخوان‌های کارستی منطقه مانشت به‌واسطه توسعه‌یافتگی کمتر و غلبه سیستم درز و شکاف از نوع افشان هست. طبقات آسیب‌پذیری در منطقه شاهو عمدتاً در محدوده خیلی کم تا زیاد قرارگرفته است درحالی‌که در توده کارستی مانشت به‌واسطه توسعه‌یافتگی کمتر کارست و وجود خاک و رسوبات سطح آسیب‌پذیری کمتر بوده و در محدوده خیلی کم تا متوسط قرارگرفته است. همبستگی بین فاکتورهای ورودی و شاخص COP نیز تأییدکننده ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های این مناطق است. بررسی نقشه‌های آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که عامل C به علت وسعت زیاد پهنه کارست تکامل‌یافته نقش اصلی را در زیاد بودن میزان آسیب‌پذیری در مناطق مورد مطالعه داراست. نقشه عامل O حاکی از آسیب‌پذیری متوسط مناطق مورد مطالعه است که بیانگر گسترش سازندهای نفوذپذیر آهکی و ماسه‌ای- گراولی در منطقه است. نقشه عامل P نشان می‌دهد که در منطقه مانشت بارش به نسبت شاهو کمتر است و این عامل میزان نفوذ آلودگی را در این منطقه کاهش داده و در نتیجه میزان آسیب‌پذیری را نیز کاهش می‌دهد. میزان شاخص COP در منطقه مانشت بین ۱ تا ۶/۳۴ محاسبه شد و آسیب‌پذیری این منطقه به سه طبقه خیلی کم، کم و متوسط طبقه‌بندی گردید. توزیع فضایی طبقات آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که ۰/۳۷ منطقه در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم، ۰/۳۶ درصد در محدوده آسیب‌پذیری کم و ۰/۲۷ در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد. این پهنه نیز بیشتر در طبقات فوقانی توده کارستی مانشت و عمدتاً سازند آهکی آسماری را در بر گرفته و بیشتر دارای خاک‌های ریگوسل می‌باشد. در مقابل منطقه شاهو سطح بالاتری از آسیب‌پذیری را داراست و در طبقات خیلی کم تا زیاد قرار گرفته است. طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد عمدتاً در دامنه‌های جنوبی توده کارستی شاهو، در میان سازندهای آهکی بیستون و توده‌های تراورتنی واقع شده است.

ارزیابی محاسبه شاخص COP در محیط GIS و نمایش آن، می‌تواند نتایج بسیار خوبی در تعیین پتانسیل آلودگی در نواحی کارستی ارائه دهد و مدیریت منابع آب و کاربری اراضی را بهبود بخشد. برای جلوگیری از آلودگی آبخوان‌های کارستی زیرزمینی، که عمدتاً توسط فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر قرار می‌گیرند، یافتن یک تعادل بین توسعه اقتصادی-اجتماعی و برنامه‌ریزی معقول در استفاده از زمین ضروری است. در همین راستا اقدامات مدیریتی نظیر تعیین حریم نواحی کارستی توسعه‌یافته برای جلوگیری از ورود آلاینده‌ها و تهدید منابع آبی این مناطق ضروری به نظر می‌رسد.

ملاحظات اخلاقی:

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

حامی مالی: ندارد

تعارض منافع: بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Afrasiabian, Ahmed. (1373), the multilingual dictionary of Karst words. Ministry of Energy - Tamab, Water Resources Research Organization.
2. Almasri, M. N. (2008). Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 577-593.
3. Citrini, A., Camera, C. A., Alborghetti, F., & Beretta, G. P. (2021). Karst groundwater vulnerability assessment: application of an integrative index-based approach to main catchments of middle Valseriana springs (Northern Italy). *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-20.
4. Corniello, A., Ducci, D., & Napolitano, P. (1997). Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using GIS: an example in the "Piana Campana", southern Italy. *Engineering geology and the environment*. Balkema, Rotterdam, 1721-1726.
5. Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, N., Popescu, C., Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the European approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 340e345.
6. Dimitriou, E., Karaouzas, I., Sarantakos, K., Zacharias, I., Bogdanos, K., & Diapoulis, A. (2008). Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the associated impacts on a peri-urban wetland. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 526-538.
7. Ducci, D. (2007). Intrinsic vulnerability of the Alburni karst system (southern Italy). *Geological Society, London, Special Publications*, 279(1), 137-151.

8. Ghezelayagh, P., Javadi, S., & 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), 1-14.
9. Gogu, R. C., Hallet, V., & Dassargues, A. (2003). Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology*, 44(8), 881-892.
10. Goldscheider, N., Popescu, C. (2004). The European approach. Final Report (COST Action 620). In: Zwahlen, F. (Ed.), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. European Commission, pp. 17-21.
11. Kiros, M., & Zhou, Y. (2006). GIS-based vulnerability assessment and mapping for the protection of the Dire Dawa groundwater basin, Ethiopia. In 34th Congress of international association of hydrogeologists, Beijing, PR China.
12. Kufs, P.G. (1992). Statistical models of hydrogeologic data e part 1: regression and AANOVA models. *Groundwater Monitoring Review* 12 (2), 120-130.
13. Leone, A., Ripa, M. N., Uricchio, V., Deak, J., & Vargay, Z. (2009). Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models. *Journal of Environmental Management*, 90(10), 2969-2978.
14. Nanou, E. A., & Zagana, E. (2018). Groundwater Vulnerability to Pollution Map for Karst Aquifer Protection (Ziria Karst System, Southern Greece). *Geosciences*, 8(4), 125.
15. Neukum, C., & Hötzl, H. (2007). Standardization of vulnerability maps. *Environmental Geology*, 51(5), 689-694.
16. Oke, S. A., Vermeulen, D., & Gomo, M. (2018). Intrinsic vulnerability assessment of shallow aquifers of the sedimentary basin of southwestern Nigeria. Jàmbá. *Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1), 1-9.
17. old, mehrnoosh; Moghimi, Ebrahim and Arash, Malekian (2014), *Research Methods in Karst Hydrogeology*, Tehran University Press.
18. Perles, M.J., Vias, J.M., Andreo, B. (2009). Vulnerability of human environment to risk. Case of groundwater contamination risk. *Environment International* 35, 325e335.
19. Samakosh, J. M., Bagheri, S., Davoodi, M., Yarahmadi, D., Jafari-Aghdam, M., & Soltani, M. (2013). Assessing and mapping the vulnerability of karstic aquifer using gis and cop model. *Glob. Nest* 67-81.
20. Tolga Pusatli, O., Zeki Camur, M., Yazicigil, H. (2009). Susceptibility indexing method for irrigation water management planning: applications to K. Menderes river basin, Turkey. *Journal of environmental management*, 90(1), 341-347.
21. Vías, J., Andreo, B., Ravbar, N., & 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.
22. Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., 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 (6), 912e925.
23. Zwahlen, F. (2004). *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Final report (COST Action 620). European Commission, 297 pp.