



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 35, Issue 3, No.95, Autumn 2024, pp. 95- 112
Received: 08/04/2024 Accepted: 25/05/2024

Identification of Vulnerable Karst Areas Using the COP Model (Case Study: Tekab Basin)

Mahin Pirah¹, Mehrnoosh Ghadimi ^{*2}, Hamid Ganjaeian³

1- Ph.D. student in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
mahin.pirah@yahoo.com

2- Assistant professor in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
ghadmi@ut.ac.ir

3- Ph.D. in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
h.ganjaeian@ut.ac.ir

Abstract

Karst landscapes are of great importance due to their role in providing vital water resources. However, these areas face a high risk of resource pollution, which is a significant concern. This study aimed to identify pollution-prone zones within the Tekab Catchment. The research utilized topographic maps (1:50,000 scale), a 1:100,000 geological map, and a 12.5-m digital elevation model derived from Landsat satellite imagery. Key analytical tools included ArcGIS and ENVI software. The study was conducted in two stages. First, the (Concentration, Overlapping, and Protection (COP) method was employed to delineate areas vulnerable to pollution. Second, the trend of residential expansion towards these vulnerable zones was assessed. The COP model results indicated that approximately 33% of the catchment area, primarily the northwestern and southern regions, exhibited high to very high pollution vulnerability. This was attributed to the underlying lithology, land cover type, hydroclimatic conditions, and geomorphological characteristics. Furthermore, evaluation of land use changes revealed that the built-up area had increased from 8 km² in 1990 to 19 km² in 2019. Consequently, the southern and northwestern parts of the Tekab Catchment were facing heightened

*Corresponding Author

Pireh, M., Ghadimi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Identification of vulnerable karst areas using the COP model (Case study: Tekab basin). *Geography and Environmental Planning*, 35 (3), 95 - 112 .

2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2024.141035.1640

vulnerability due to both their inherent pollution potential and the ongoing expansion of human settlements. These findings underscored the critical need for targeted management strategies to protect the valuable water resources within the Tekab Catchment, particularly in the identified high-risk zones, and ensure the long-term sustainability of this important karst landscape.

Keywords: Pollution, Landuse Changes, Karst Areas, COP.

Introduction

Karst landscapes are characterized by the dissolution of bedrock and the formation of an intricate underground drainage network predominantly associated with carbonate rock formations. Karst springs are of crucial importance as they supply drinking water to approximately 25% of the global population. Considering the significant role of karst resources in providing water, protection of these valuable resources is essential. Karst landscapes are highly vulnerable and sensitive to pollution, which poses a significant challenge in the management of karst water resources. Iran's geographical location has led to approximately 11% of the country's area being covered by karst formations, including the Tekab Catchment located in the northwest of the country. The hydro-climatic characteristics of the Tekab Basin have contributed to the high potential for karst resource development, making the protection and prevention of pollution in these resources a pressing priority. Given the importance of karst water resources and the need for their protection, this study aimed to identify the areas within the Tekab Catchment, which were prone to pollution. Understanding the vulnerability of the basin to pollution is a crucial step in developing effective management strategies to safeguard these vital water resources.

Materials and Methods

This study utilized a range of geospatial data and analytical tools to achieve its objectives. The research data included 1:50,000 scale topographic maps, a 1:100,000 geological map, and a 12.5-m digital elevation model derived from Landsat satellite imagery. The key software tools employed were ArcGIS and ENVI, which were used to prepare the necessary maps and land use datasets. The research methodology was divided into two main stages. In the first stage, the Concentration, Overlapping, and Protection (COP) method was applied to identify areas within the study area that were vulnerable to pollution. This approach primarily examined two factors: the travel time of pollutants from the source to the destination and the reduction in pollutant concentration along the flow path. In the second stage, land use maps were generated for the years 1990 and 2020 using Landsat satellite imagery. This allowed for the assessment of the development trends of anthropogenic land uses (e.g., settlements) in relation to the previously identified vulnerable areas. By integrating the results from these two stages, the study was able to delineate the zones within the Tekab Catchment that were susceptible to pollution and analyze the spatial patterns of human-induced land use changes that might exacerbate the vulnerability of these critical water resources.

Research Findings

The COP method was employed to assess the vulnerability of the study area. The C factor represented the infiltration capacity, emphasizing the permeability and influence of precipitation on the ground surface. According to the C factor map, the northern parts of the region exhibited the highest potential for vulnerability. The O factor was calculated based on soil properties, including permeability, thickness, porosity, and lithological composition. This analysis indicated that the southern and northwestern regions of the basin had the greatest potential for vulnerability. The P factor

considered the characteristics of precipitation, such as the amount, temporal distribution, duration, and intensity of floods, which could influence the infiltration rate. Based on this factor, the eastern and northern parts of the basin were identified as the most vulnerable areas. By integrating the maps of the individual factors, the overall vulnerability map was generated using the COP method. The results revealed that the southern and northwestern regions of the study area had the highest vulnerability to pollution. Additionally, this study examined the trend of land use development, specifically the expansion of anthropogenic land uses (e.g., settlements) towards the vulnerable areas. The analysis showed a significant increase in human-induced land uses within the vulnerable zones over a 30-year period.

Discussion of Results & Conclusion

The Tekab Catchment area is characterized by a distinct karst landscape, shaped by the region's underlying lithology and hydro-climatic conditions. This makes the identification and protection of vulnerable karst resources a critical priority. While numerous studies have focused on assessing the vulnerability of karst areas, this research presented a unique approach by not only delineating the vulnerable zones, but also analyzing the development of anthropogenic land uses within these sensitive areas. The evaluation of the COP model in the Tekab Catchment revealed that the southern and northwestern regions of the basin exhibited high to very high vulnerability. This could be attributed to the specific lithological characteristics, land cover types, hydro-climatic factors, and geomorphological conditions prevalent in these areas. Furthermore, the analysis of land use change over a 30-year period (1990 to 2019) showed a significant increase in the expansion of human-induced land uses, such as settlements, within the identified vulnerable zones. The areal extent of these anthropogenic land uses had increased from approximately 8 km² in 1990 to nearly 19 km² in 2019. Given the high vulnerability of the southern and northwestern parts of the Tekab Catchment coupled with the intensifying development of human activities in these sensitive areas, it is crucial to implement targeted planning and management strategies. This should involve prevention of polluting industries and activities from encroaching into these vulnerable zones in order to safeguard the critical karst water resources that serve the local population.

شناسایی مناطق کارست آسیب‌پذیر با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: حوزه آبریز تکاب)

مهین پیره، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

mahin.pirah@gmail.com

مهرنوش قدیمی*، دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ghadimi@ut.ac.ir

حمید گنجائیان، دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

h.ganjaeian@ut.ac.ir

چکیده

مناطق کارستیک به دلیل نقش مهمی که در تأمین منابع آب لازم دارند، بسیار حائز اهمیت هستند. یکی از مسائل مهم مناطق کارستیک پتانسیل بالای آلودگی این منابع است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش مناطق مستعد آلودگی در حوزه آبریز تکاب شناسایی شده است. در پژوهش حاضر برای دستیابی به هدف‌های مدنظر از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر و تصاویر ماهواره لندست به‌عنوان داده‌های پژوهش استفاده شد. ابزارهای مهم استفاده‌شده در این مطالعه شامل ArcGIS و ENVI است. این پژوهش در دو مرحله کلی انجام شده است. در مرحله اول با استفاده از روش مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی شناسایی و در مرحله دوم نیز روند توسعه نواحی سکونتگاهی به سمت این مناطق شناسایی شد. براساس نتایج مدل COP حدود ۳۳ درصد از منطقه که بیشتر شامل مناطق شمال غربی و جنوبی حوضه است، به دلیل نوع لیتولوژی، نوع پوشش زمین، وضعیت هیدرواقليمی و وضعیت ژئومورفولوژی پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیادی دارند. همچنین، نتایج حاصل شده از ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی بیانگر این است که کاربری نواحی انسان‌ساخت در سال ۱۹۹۰ حدود ۸ کیلومتر مربع بوده که این میزان در سال ۲۰۱۹ به حدود ۱۹ کیلومتر مربع افزایش یافته است. با توجه به موارد مذکور بخش‌های جنوبی و شمال غربی حوزه آبریز تکاب به دلیل روند توسعه نواحی انسان‌ساخت پتانسیل آسیب‌پذیری زیادی در برابر آلودگی دارند. **واژه‌های کلیدی:** آلودگی، تغییرات کاربری اراضی، مناطق کارستیک، COP.

*نویسنده مسئول

پیره، مهین، قدیمی، مهرنوش، گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق کارست آسیب‌پذیر با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: حوزه آبریز تکاب). *جغرافیا و*

برنامه ریزی محیطی، ۳۵ (۳)، ۱۱۲-۹۵.



مقدمه

منابع کارستیک با انحلال سنگ بستر و توسعه شبکه زهکشی زیرزمینی گسترش یافته است. این منابع دراصل با سنگ‌های کربناته ارتباط پیدا می‌کند (Waltham et al., 2005, P. 2). شناخت و بهره‌برداری از کارست و منابع آب موجود در آن بسیار ضروری است؛ زیرا آب شرب حدود ۲۵٪ از جمعیت جهان از منابع آب موجود از سنگ‌های کارستی تأمین می‌شود (Marin et al., 2014, P. 2408). باتوجه به اهمیت زیاد منابع کارستیک و نقش مهمی که در تأمین منابع آب لازم در سراسر دنیا دارند، حفاظت از این منابع بسیار ضروری است (Ford & Williams, 2007, P. 12). درواقع، منابع آب کارستیک در کنار اهمیت و نقش بسزایی که در تأمین منابع آبی دارند، پتانسیل آسیب‌پذیری زیادی نیز دارند که همین امر سبب شده است تا این منابع همیشه در معرض آلودگی باشند (Ghadimi, 2022, P. 2). همچنین، وجود درز و شکاف‌های زیاد و ارتباط قوی شبکه آب‌های زیرزمینی به یکدیگر سبب شده است تا انتقال آلودگی در این مناطق نسبت به سایر مناطق با سرعت بیشتری انجام شود؛ بنابراین یکی از معضلات مناطق کارستیک پتانسیل زیاد انتقال آلودگی است. باتوجه به موارد مذکور حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی یکی از مهم‌ترین اقدام‌ها در زمینه مدیریت منابع آب کارست است (Afrasiabian, 2007, P. 264674; Mudarra & Andreo, 2011, P. 264674).

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا حدود ۱۱ درصد از مساحت آن را مناطق کارستیک دربرگیرد (افراسیابیان، ۱۳۷۷، ص. ۲). ازجمله مناطق کارستیک کشور می‌توان به حوزه آبریز تکاب در شمال غرب کشور اشاره کرد. موقعیت هیدرواقليمی حوزه آبریز تکاب سبب شده تا این حوزه ازطرفی، پتانسیل زیادی برای توسعه منابع کارستیک و از طرف دیگر، نقش مهمی در تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه داشته باشد. باتوجه به وجود منابع کارستیک توسعه یافته در حوزه آبریز تکاب و روند افزایشی فعالیت‌های انسانی و ساخت‌وسازها در این حوزه منابع کارستیک حوزه در معرض آلودگی قرار دارد که در این میان، حفاظت و جلوگیری از آن بسیار اهمیت دارد. باتوجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش مناطق آسیب‌پذیر این حوزه در برابر آلودگی شناسایی شده است.

در ارتباط با آلودگی و آسیب‌پذیری منابع کارستیک پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است. در پژوهش‌های پیشین صورت گرفته از روش‌های مختلف ازجمله روش COP استفاده شده است. در این روش به‌طور عمده، دو جنبه، یعنی زمان جابه‌جایی آلودگی از منشأ به مقصد و کاهش غلظت آن در طول مسیر بررسی قرار می‌شود (فیضی و خانمحمدي، ۱۳۹۷، ص. ۴). روش COP در چندین آبخوان با ویژگی‌های مختلف آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی آزمایش و توسعه داده شده است. از این روش برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی در مناطق کارستی استفاده می‌شود و براساس آن می‌توان نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی را برای مدیریت و حفاظت از آبخوان‌های کارستی تهیه کرد (سیف و همکاران، ۱۳۹۳، ص. ۶۶). باتوجه به کاربرد روش COP در پژوهش‌های مختلفی از آن استفاده شده است که ازجمله آنها می‌توان به پلان و همکاران (2008) اشاره کرد که با استفاده از روش COP مناطق مستعد آلودگی را در استرالیا بررسی کردند (Plan et al., 2008). ویاس و همکاران با استفاده از روش COP آسیب‌پذیری چهار آبخوان کربناته را در اروپا (دو آبخوان در اسپانیا، آلمان و اسلونی) بررسی کردند (Vias et al., 2006). مارین و

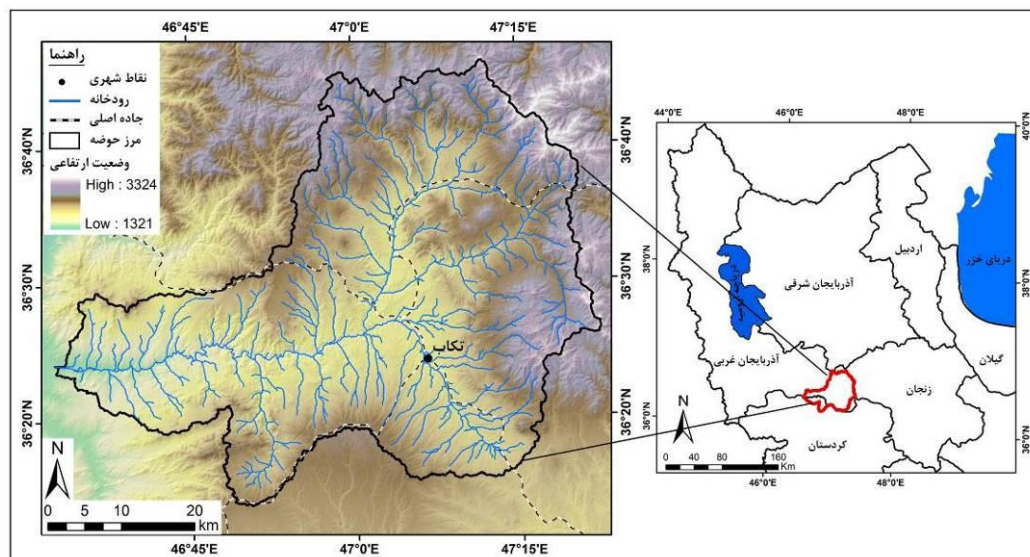
همکاران با استفاده از دو روش COP و Paprika مناطق کارستیک آسیب‌پذیر را در اسپانیا و فرانسه شناسایی کردند (Marín et al., 2012). قدیمی و همکاران وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستیک را در غرب ایران ارزیابی کردند. در این پژوهش از روش‌های COP و EPIK استفاده و در نهایت، مناطق آسیب‌پذیری در برابر آلودگی شناسایی شده است (Ghadimi et al., 2022). یوسفی و همکاران (۱۳۹۷) مناطق آسیب‌پذیر دشت الشتر لرستان را با استفاده از مدل COP شناسایی کردند. نتایج این پژوهش نشان داده است که ۶۵ کیلومتر مربع از مساحت این دشت پتانسیل زیاد آسیب‌پذیری را دارد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷).

علاوه بر روش COP از روش‌های دیگری برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی و یا از عوامل مؤثر بر ایجاد آلودگی مناطق کارستیک استفاده شده است. پیرا و همکاران مناطق آسیب‌پذیر را در حوزه سائومیگوئل (Sao Miguel) با استفاده از روش EPIK شناسایی کردند (Pereira et al., 2019). کائو و همکاران با استفاده از روش COPK وضعیت آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مناطق کارستیک را در شمال چین ارزیابی کردند (Cao et al., 2023). گومز و همکاران نقش عوامل مختلف انسانی را در آسیب‌پذیری منابع آب کارستیک تحلیل کردند (Gomez et al., 2024). محبی و اصغری مقدم (۱۳۹۷) آسیب‌پذیری آبخوان دشت کهریز را با استفاده از مدل دراستیک ارزیابی کردند. نتایج پژوهش نشان داده است که مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری، اثر منطقه غیراشباع است. دسترنج و همکاران (۱۳۹۶) نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان کارستی دالاهو را ارزیابی و تهیه کردند. براساس نتایج حاصل‌شده حدود ۷۰ درصد از منطقه توان پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیادی را دارد. کاشفی و همکاران (۱۳۹۹) آسیب‌پذیری کارست سطحی آبخوان‌های کارستی شش‌پیر و برغان را با استفاده از منطق فازی ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داده است که ۷۵ درصد از فروچاله این منطقه در طبقه با پتانسیل زیادی آسیب‌پذیری قرار دارد. قدیمی و زنگنه تبار (۱۳۹۹) آسیب‌پذیری آبخوان کارستیک گیلان غرب را ارزیابی کردند. در این پژوهش از روش‌های EPIK و KDI استفاده شده است. نتایج نشان داده است که گیلان غرب حساسیت زیادی نسبت به آلودگی دارد؛ اما عدم گسترش فعالیت‌های انسانی در حوضه آبگیر این آبخوان منجر به سالم‌ماندن منابع آب آن از آلودگی شده است. در راستای پژوهش‌های پیشین هدف از پژوهش حاضر شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در حوزه آبریز تکاب و سپس ارزیابی روند توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت به سمت این نواحی است.

منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده شامل حوزه آبریز تکاب است که از زیرحوضه‌های زیرینه رود محسوب می‌شود. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی در جنوب غربی استان آذربایجان غربی و شهرستان تکاب قرار دارد (شکل ۱). حوزه آبریز تکاب از نظر زمین‌شناسی در زیر واحد شمال غرب قرار دارد. این حوزه از نظر ارتفاعی بین ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۳۳۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد و باتوجه به اختلاف ارتفاعی زیادی که در بین مناطق شمالی و جنوبی آن وجود دارد، در میانگین دما و بارش آن تنوع زیادی دارد. همچنین، وضعیت پوشش گیاهی مناطق شمالی آن متراکم‌تر از مناطق جنوبی آن است. از نظر ژئومورفولوژی بخش زیادی از مناطق شمالی آن را واحد کوهستان و بخش زیادی از مناطق مرکزی و

جنوبی آن را واحد دشت و مخروطه‌افکنه دربر گرفته است. واحد تپه‌ماهور نیز به صورت پراکنده در حوضه مطالعه شده وجود دارد. همچنین، این حوضه از نظر اقلیمی نیز تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد و مرطوب دارد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مطالعه شده (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 1: Location of the study area

روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر برای دستیابی به هدف‌های مدنظر از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر آلوس پالسار (ALOSPALSAR)، تصاویر ماهواره لندست به‌عنوان داده‌های پژوهش استفاده شده است. ابزارهای مهم استفاده شده در این مطالعه شامل ArcGIS و ENVI است که برای تهیه نقشه‌های مدنظر و نیز تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. باتوجه به موضوع، هدف‌های این پژوهش در چند مرحله انجام شده که در ادامه، تشریح شده است.

مرحله اول (شناسایی مناطق آسیب‌پذیر با استفاده از روش COP): برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر با استفاده

از روش COP از سه فاکتور استفاده می‌شود که عبارت است از:

- **فاکتور تمرکز جریان (C):** فاکتور C بیانگر نفوذ جریان است و این فاکتور بر میزان نفوذپذیری مقدار بارش در زمین تأکید دارد. برای تهیه نقشه فاکتور C ابتدا نقشه شیب و پوشش زمین (براساس تصاویر لندست ۸) و سپس نقشه عوارضی سطحی (SF) تهیه شده است. پس از تهیه لایه‌های شیب و پوشش گیاهی بر مبنای جدول ۱ به صورت درون‌لایه‌ای به این لایه‌های اطلاعاتی وزن داده و با ترکیب آنها لایه SV تهیه شده است. در ادامه، بر مبنای وضعیت زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی وضعیت کارستیک منطقه ارزیابی و نقشه SF در ۴ کلاس تهیه شده است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۱۳۴). پس از تهیه نقشه‌های مذکور و ترکیب آنها نقشه فاکتور C تهیه شده است.

جدول ۱: محاسبات مربوط به فاکتور C

Table 1: Calculations related to factor C

sv			sf	
وزن	پوشش گیاهی	شیب	وزن	توسعه کارست
۰/۷۵	-	< ۸ درصد	۰/۲۵	توسعه یافته
۰/۸	زیاد	۸ تا ۳۱ درصد	۰/۵	کمتر توسعه یافته
۰/۸۵	کم			
۰/۹	زیاد	۳۱ تا ۷۶ درصد	۰/۷۵	متوسط
۰/۹۵	کم			
۱	-	> ۷۶ درصد	۱	بدون توسعه

منبع: ملکی و همکاران، ۱۳۹۸

- **فاکتور پوشش (O):** فاکتور O براساس خواص نفوذپذیری خاک، ضخامت، تخلخل و جنس لایه‌های لیتولوژی محاسبه می‌شود. برای تهیه نقشه فاکتور O دو نقشه شامل خاک و لیتولوژی منطقه تهیه شده است. در امتیازدهی لایه خاک و لیتولوژی به خاک‌ها و سنگ‌هایی که ریزدانه هستند (به دلیل پتانسیل کم نفوذپذیری که دارند) ارزش بیشتری داده شده است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۱۳۷). پس از تهیه و وزن‌دهی به این لایه‌ها (جدول ۲) این دو لایه با هم جمع و نقشه فاکتور O تهیه شده است.

جدول ۲: محاسبات مربوط به فاکتور O

Table 2: Calculations related to the O factor

میزان آسیب‌پذیری	مجموع امتیاز
خیلی کم	۱
کم	۲
متوسط	۲ تا ۴
زیاد	۴ تا ۸
خیلی زیاد	۸ تا ۱۵

منبع: ملکی و همکاران، ۱۳۹۸

- **فاکتور بارش (P):** در این فاکتور به متغیرهای مکانی و زمانی بارش توجه می‌شود که در انتقال آلودگی به‌خصوص در آبخوان‌های بزرگ نقش دارند (Daly et al., 2002, P. 345). این فاکتور شامل مقدار بارش و عامل‌هایی است که میزان نفوذ را افزایش می‌دهند؛ مانند توزیع زمانی، مدت و شدت بارش‌های سیل‌آسا. این عامل‌ها به میزان توانایی بارش برای حمل آلاینده‌ها از سطح به آب زیرزمینی کمک می‌کنند. این فاکتور با دو زیرفاکتور مقدار بارش (PQ) و توزیع زمانی بارش (PI) به دست می‌آید (جدول ۳). گفتنی است که برای تهیه نقشه بارش منطقه از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه و نقشه درونیابی آنها استفاده شده است.

جدول ۳: محاسبات مربوط به فاکتور P

Table 3: Calculations related to the P factor

امتیاز	بارش سالانه (میلی‌متر) / تعداد روزهای بارانی	امتیاز	بارش سالانه (میلی‌متر)
۰/۶	کمتر از ۱۰	۰/۴	۱۶۰۰ >
۰/۴	۱۰ تا ۲۰	۰/۳	۱۶۰۰ تا ۱۲۰۰
۰/۲	بیش از ۲۰	۰/۲	۱۲۰۰ تا ۸۰۰
-	-	۰/۳	۸۰۰ تا ۴۰۰
-	-	۰/۴	۴۰۰ <

منبع: ملکی و همکاران، ۱۳۹۸

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر سه فاکتور در نهایت، نقشه وضعیت آسیب‌پذیری منطقه با استفاده از رابطه ۱ و روش COP تهیه شده است.

$$\text{COP index} = C \times O \times P$$

رابطه ۱:

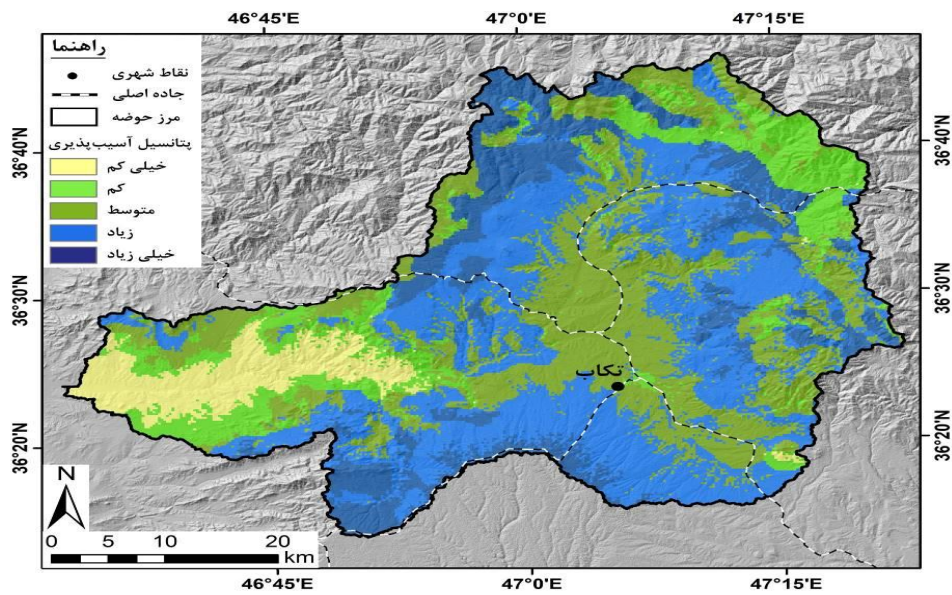
مرحله دوم (روند تغییرات کاربری اراضی در مناطق مستعد آلودگی): در این مرحله ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ تهیه و سپس روند توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت به سمت مناطق آسیب‌پذیری ارزیابی شده است. در این مطالعه برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی از تصویر ماهواره لندست ۵ و ۸ مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ استفاده شده است. پس از تهیه تصویر مدنظر^۱، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر انجام شده است. پس از اعمال تصحیحات نمونه‌های تعلیمی در ۴ کلاس نواحی انسان‌ساخت، اراضی کشاورزی، باغ‌ها و مراتع از منطقه برداشت و پس از تعریف نمونه‌های تعلیمی با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال نقشه‌های کاربری اراضی منطقه در ۴ کلاس تهیه شده است.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل

- روش COP: در روش COP از ۳ فاکتور C، O و P برای بررسی آسیب‌پذیری منطقه استفاده شده که در ادامه، هر کدام از آنها تشریح شده است.

فاکتور تمرکز جریان (C): باتوجه به عواملی که در فاکتور تمرکز جریان استفاده شده، نقشه این فاکتور تهیه شده است (شکل ۲). براساس نقشه تهیه‌شده بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی حوزه آبریز تکاب باتوجه به وضعیت پوشش گیاهی کم تراکم‌تر و وجود منابع کارستیک توسعه‌یافته، پتانسیل نفوذپذیری بیشتری نسبت به سایر مناطق حوضه دارند. همچنین، بخش‌هایی از مناطق میانی حوضه نیز باتوجه به شیب کم، پتانسیل نفوذ بیشتر و در نتیجه، پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری دارند.

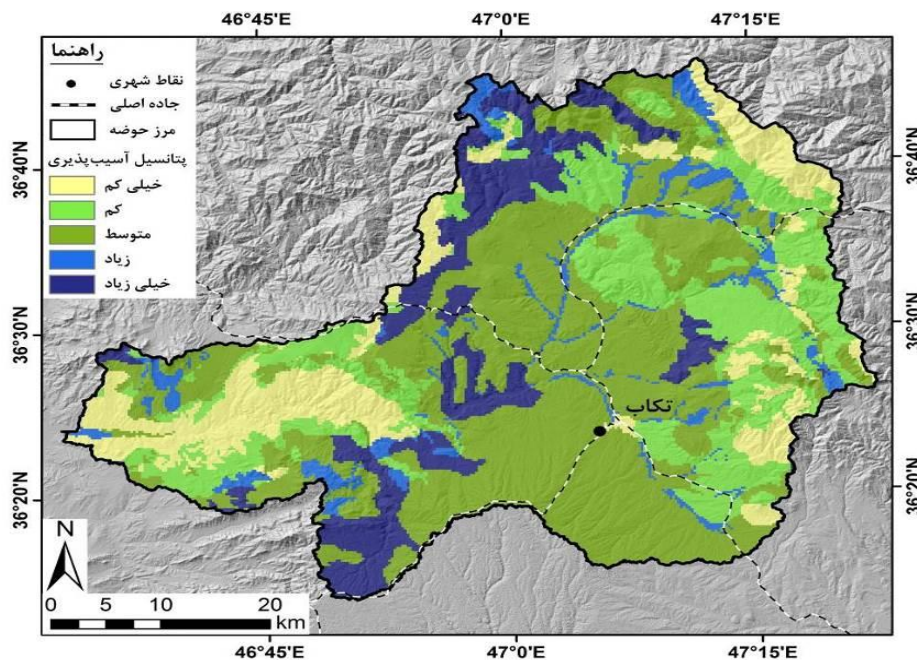
1 . <https://earthexplorer.usgs.gov/>



شکل ۲: نقشه فاکتور C (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 2: Factor C map

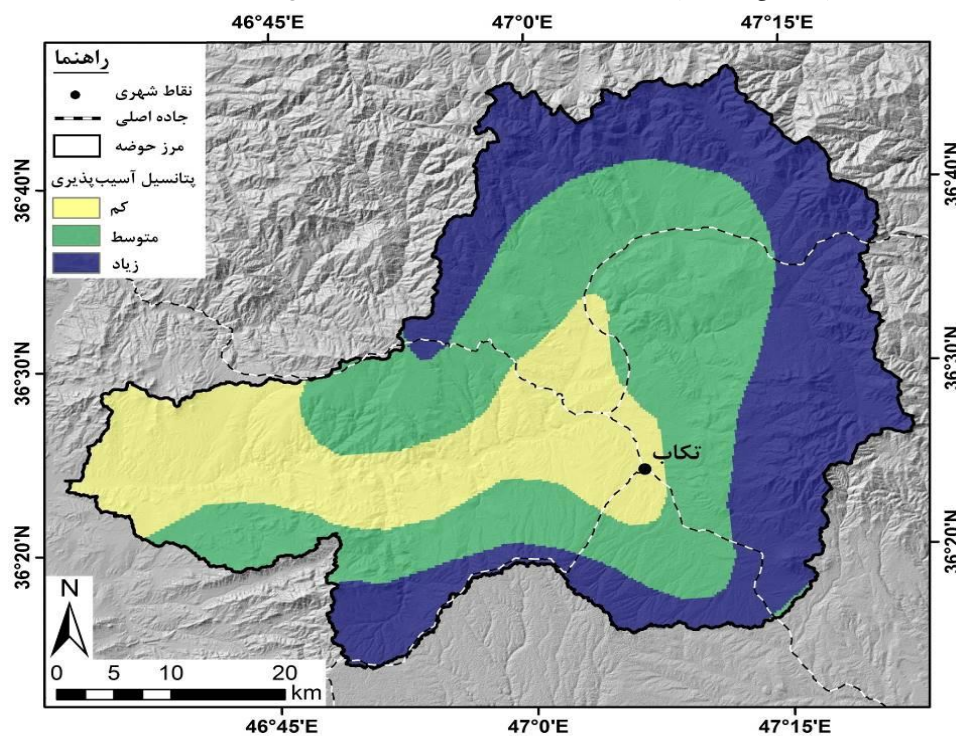
پوشش (O): فاکتور O بر وضعیت لیتولوژی و خاک‌های حوضه تأکید دارد. باتوجه به نوع خاک و لیتولوژی حوضه مطالعه‌شده نقشه این فاکتور تهیه شده است (شکل ۳). براساس نقشه تهیه‌شده مناطق نزدیک به خروجی حوضه پتانسیل آسیب‌پذیری کمتری دارند. درواقع، این مناطق به دلیل اینکه از مواد ریزدانه تشکیل شده است، پتانسیل نفوذپذیری کم و درنتیجه، پتانسیل آسیب‌پذیری کمی دارند.



شکل ۳: نقشه فاکتور O (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 3: O factor map

فاکتور بارش P: فاکتور P بر شدت و مدت بارش تأکید دارد. باتوجه به معیارهایی که در این فاکتور مدنظر است، نقشه فاکتور P تهیه شده است (شکل ۴). براساس نقشه تهیه‌شده مناطق شمالی حوزه آبریز تکاب باتوجه به اینکه شدت بارش بیشتری دارند، پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به مناطق جنوبی حوزه نیز دارند.



شکل ۴: نقشه فاکتور P (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 4: P factor map

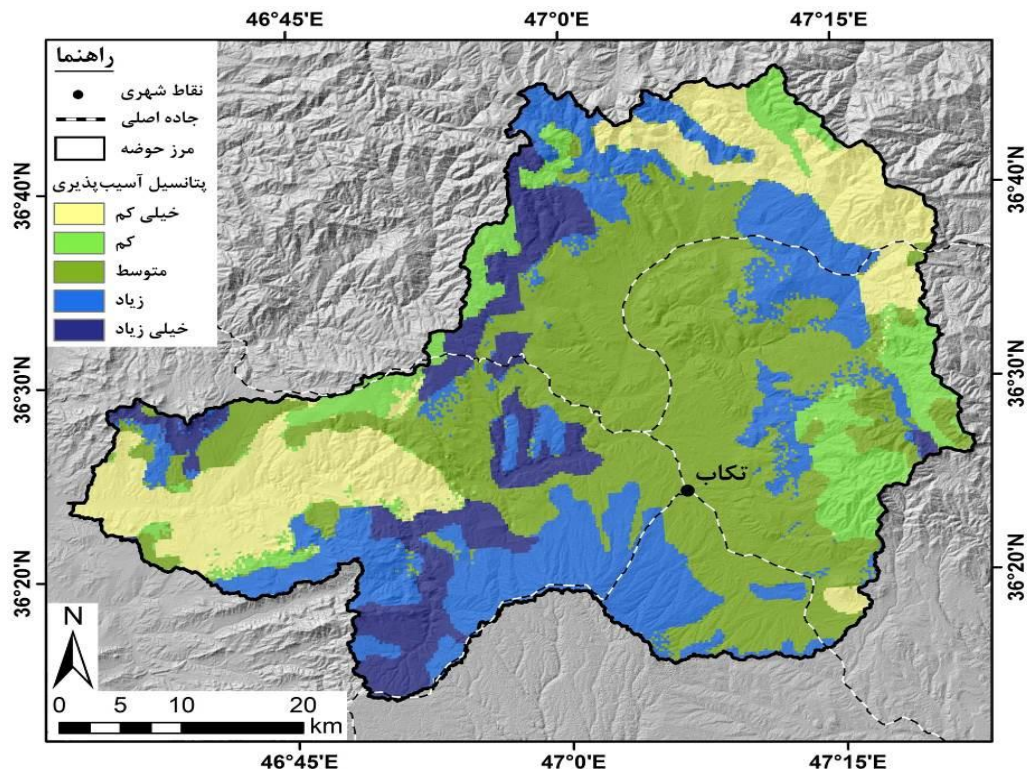
پس از تهیه نقشه فاکتورهای مدنظر نقشه‌های مذکور با استفاده از رابطه ۱ با یکدیگر ترکیب و درنهایت، نقشه مناطق آسیب‌پذیر با استفاده از روش COP تهیه شده است. براساس نقشه تهیه‌شده مجموع امتیازهای به‌دست‌آمده برای منطقه بین ۰/۴۱ تا ۷/۴ است که براساس روش COP (جدول ۴) منطقه از نظر میزان آسیب‌پذیری به ۵ طبقه تقسیم شده است (شکل ۵) که براساس نتایج به‌دست‌آمده مناطق جنوبی و شمال غربی محدوده بیش‌ترین میزان آسیب‌پذیری را دارند.

جدول ۴: طبقه‌بندی منطقه براساس امتیازات نهایی

Table 4: Classification of the region based on the final scores

درصد مساحت	مساحت	میزان آسیب‌پذیری	امتیاز	ردیف
۱۷/۲	۴۱۵	خیلی زیاد	۰ - ۰/۵	۱
۹/۵	۲۲۸	زیاد	۰/۵ - ۱	۲
۴۰/۲	۹۶۹	متوسط	۱ - ۲	۳
۲۲/۶	۵۴۵	کم	۲ - ۴	۴
۱۰/۵	۲۵۲	خیلی کم	۴ - ۱۵	۵

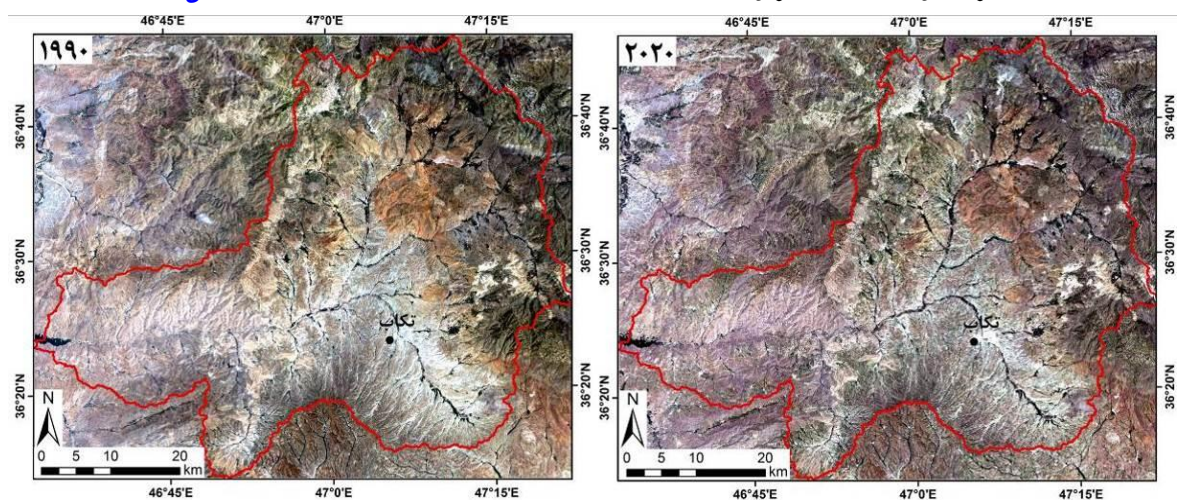
منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲



شکل ۵: نقشه میزان آسیب پذیری منطقه براساس روش COP (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 5: Vulnerability map of the area based on the COP method

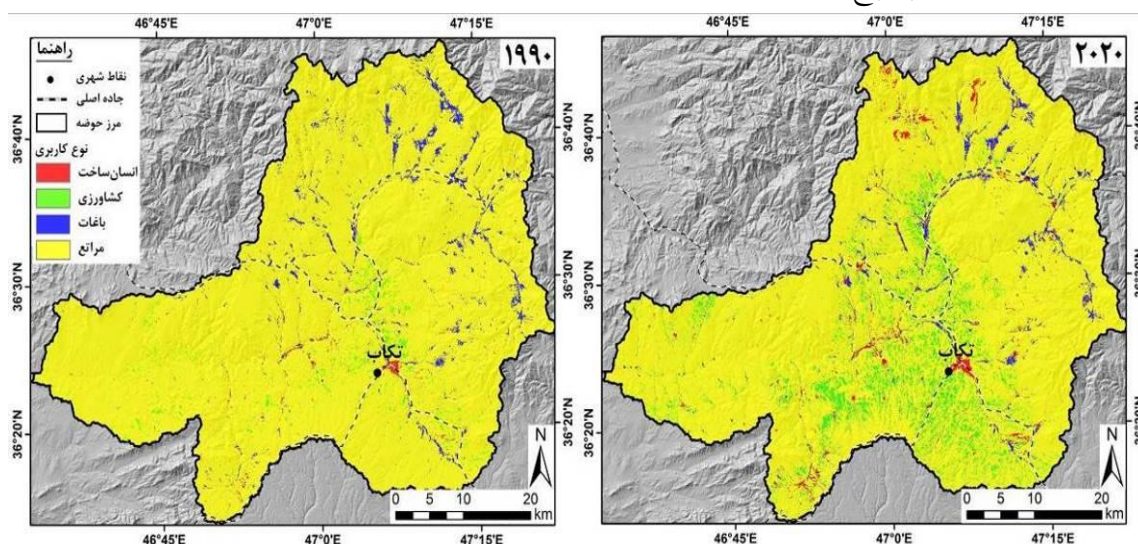
- ارزیابی روند توسعه نواحی انسان ساخت به سمت مناطق آسیب پذیر: یکی از عوامل اصلی در آلودگی منابع کارستیک فعالیت های انسانی است. در طی سال های اخیر، روند توسعه نواحی انسان ساخت به سمت مناطق کارستیک توسعه یافته از عوامل اصلی آلودگی منابع آب کارستیک بوده است. در این پژوهش برای ارزیابی روند توسعه نواحی انسان ساخت از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ استفاده شده است (شکل ۶).



شکل ۶: تصاویر ماهواره لندست منطقه مطالعه شده (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 6: Landsat satellite images of the study area

پس از تهیه تصاویر و انجام دادن پیش‌پردازش‌های لازم نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ تهیه شده است (شکل ۷). گفتنی است که دقت کلی نقشه‌های کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۸۶ و ۹۳ درصد بوده است. براساس نقشه‌های تهیه‌شده مراتع بخش زیادی از مساحت حوضه را دربرگرفته است. در جدول ۵ مساحت و درصد مساحت کاربری‌های اراضی در طی دوره زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۳۰) نشان داده است که براساس آن کاربری نواحی سکونتگاهی در سال ۱۹۹۰ حدود ۱۲/۹ کیلومتر مربع وسعت داشته که این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۲۳/۷ کیلومتر مربع افزایش یافته است. کاربری اراضی کشاورزی در سال ۱۹۹۰ حدود ۴۷/۵ کیلومتر مربع وسعت داشته که این کاربری نیز با روند افزایشی مواجه شده و در سال ۲۰۲۰ به ۱۳۰/۹ کیلومتر مربع افزایش یافته است. کاربری اراضی باغی تغییرات کمی داشته است؛ به‌طوری که این کاربری در سال ۱۹۹۰ حدود ۵۵/۸ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۲۰ نیز حدود ۵۴/۹ کیلومتر مربع وسعت داشته است. کاربری مراتع در طی دوره زمانی ۳۰ ساله روند کاهشی داشته است. این کاربری در سال ۱۹۹۰ حدود ۲۳۰۵/۸ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۲۰ حدود ۲۲۱۲/۵ کیلومتر مربع وسعت داشته است.



شکل ۷: نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه‌شده در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 7: Land use map of the studied area in 1990 and 2020

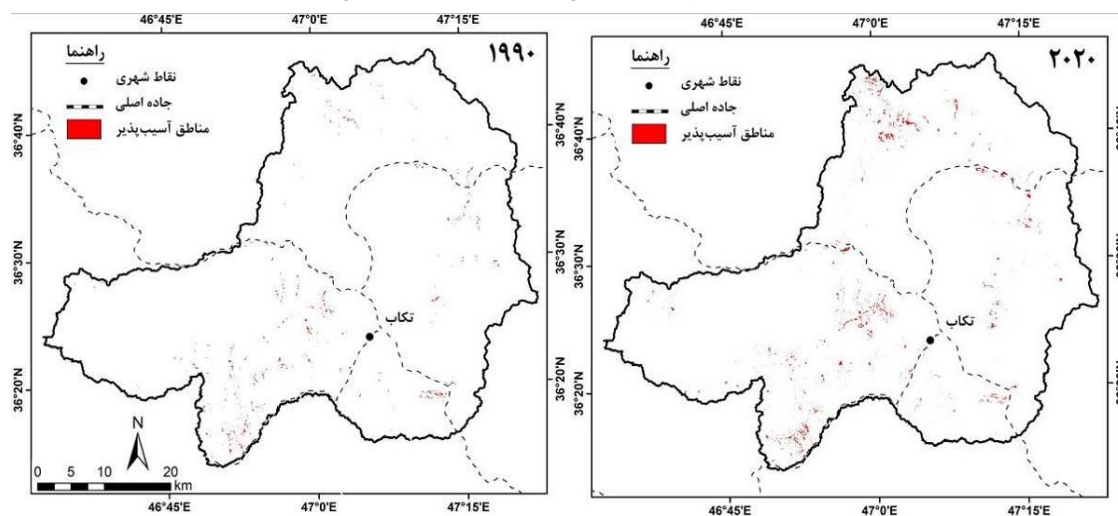
جدول ۵: مساحت و درصد مساحت کاربری‌های اراضی منطقه مطالعه‌شده در طی سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰

Table 5: Area and percentage of land uses in the study area during the years 1990 and 2020

2020		1990		نوع کاربری
درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	
۱	۲۳/۷	۰/۵	۱۲/۹	انسان‌ساخت
۵/۴	۱۳۰/۹	۲	۴۷/۵	کشاورزی
۲/۳	۵۴/۹	۲/۳	۵۵/۸	باغ‌ها
۹۱/۴	۲۲۱۲/۵	۹۵/۲	۲۳۰۵/۸	مراتع

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲

باتوجه به اینکه هدف اصلی محققان در پژوهش حاضر شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی است و یکی از دلایل اصلی آلودگی منابع کارستیک فعالیت‌های انسانی است، در این پژوهش روند توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت به سمت مناطق آسیب‌پذیر ارزیابی شده است. در این بخش پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی کاربری نواحی انسان‌ساخت استخراج و سپس روند توسعه این کاربری در مناطق با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد مشخص شده است (شکل ۷). براساس نقشه‌های مذکور کاربری نواحی انسان‌ساخت در مناطق آسیب‌پذیر در طی دوره زمانی ۳۰ ساله با افزایش چشمگیری مواجه شده است؛ به‌طوری که این نواحی در سال ۱۹۹۰ حدود ۸ کیلومتر مربع بوده است که این میزان در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۹ کیلومتر مربع افزایش یافته است. باتوجه به موارد مذکور نواحی آسیب‌پذیر در حوزه آبریز تکاب در معرض آسیب‌پذیری ناشی از فعالیت‌های انسانی قرار دارند.



شکل ۸: نقشه نواحی انسان‌ساخت در طبقات با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Fig 8: Map of residential areas in floors with high and very high vulnerability potential

نتیجه‌گیری

حوزه آبریز تکاب به دلیل وضعیت لیتولوژی و شرایط هیدرواقليمی دارای مناطق کارستیک توسعه یافته است و همین مسئله سبب شده است تا توجه به این حوضه و به‌خصوص شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آن بسیار حائز اهمیت باشد. درباره آسیب‌پذیری مناطق کارستیک پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر شناسایی مناطق آسیب‌پذیر روند توسعه نواحی انسان‌ساخت به سمت این مناطق نیز ارزیابی شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل COP مناطق شمال غربی و جنوبی حوزه آبریز تکاب مانند مناطق جنوبی دشت کرمانشاه (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸) و بخش‌های غربی آبخوان‌های کارستی ششپیر و برغان (کاشفی و همکاران، ۱۳۹۹) به دلیل نوع لیتولوژی، نوع پوشش زمین، وضعیت هیدرواقليمی و وضعیت ژئومورفولوژی پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد دارند. همچنین، در این پژوهش روند توسعه نواحی انسان‌ساخت به سمت مناطق آسیب‌پذیر ارزیابی شده که براساس نتایج حاصل‌شده وسعت نواحی انسان‌ساخت در سال ۱۹۹۰ حدود ۸ کیلومتر مربع بوده است که این میزان در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۹ کیلومتر مربع

افزایش یافته است. باتوجه به موارد مذکور بخش‌های شمال غربی و جنوبی حوزه آبریز تکاب به دلیل پتانسیل زیادی آسیب‌پذیری و روند توسعه نواحی انسان‌ساخت در آن در معرض آلودگی قرار دارند؛ بنابراین لازم است تا برنامه‌ریزی‌های لازم برای ورود صنایع و فعالیت‌های آلاینده به این مناطق صورت گیرد.

منابع

افراسیابیان، احمد (۱۳۷۷). *اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران*. مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، تهران-کرمانشاه.

<http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18837088>

دسترنج، علی، نوحه‌گر، احمد، ملکیان، آرش، غلامی، حمید، و جعفری اقدم، مریم (۱۳۹۶). ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان کارستی دالاهو. *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۸(۲)،

۱۶-۱. https://journals.iau.ir/article_532778.html

سیف، عبدالله، جعفری اقدم، مریم، و جهانفر، علی (۱۳۹۳). ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: آبخوان کارستی گلین، استان کرمانشاه). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*،

۳(۳)، ۶۵-۷۹. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77961.html

فیضی، اتابک، و خانمحمدی، وحید (۱۳۹۷). *بررسی خصوصیات مختلف مناطق کارستی و میزان آسیب‌پذیری آنها*. هفدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد.

<https://civilica.com/doc/811488>

قدیمی، مهنوش، و زنگنه تبار، ساسان (۱۳۹۹). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب با استفاده از روش EPIK و KDI. *مرتج و آبریزداری*، ۱۳(۱)، ۱۲۵-۱۳۷.

<https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.294605.1446>

کاشفی، مهدی، انتظاری، مژگان، و جعفری اقدم، مریم (۱۳۹۹). ارزیابی آسیب‌پذیری کارست سطحی آبخوان‌های کارستی ششپیر و برغان با استفاده از منطق فازی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۸(۴)، ۶۲-۴۷.

[10.22034/gmpj.2020.106411](https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106411)

محبی، یوسف، و اصغری مقدم، اصغر (۱۳۹۷). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت کهریز با استفاده از مدل دراستیک در محیط GIS. *زمین‌شناسی محیط زیست*، ۱۲(۴۵)، ۱-۱۶.

https://journals.iau.ir/article_669497.html

ملکی، امجد، باقری سیدشکری، سجاد، و مطاعی، سارا (۱۳۹۸). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی دشت کرمانشاه و توده بیستون-پراو با استفاده از مدل COP. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۹(۵۲)، ۱۴۵-۱۲۹.

[10.29252/jgs.19.52.129](https://doi.org/10.29252/jgs.19.52.129)

یوسفی، حسین، حق‌زاده، علی، یاراحمدی، یزدان، و نورمحمدی، پروین (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی و آنالیز حساسیت روش COP مبتنی بر تکنیک RS و GIS در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت الشتر لرستان. *علوم آب و*

خاک، ۲۲(۳)، ۲۶۱-۲۷۲. <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.3.261>

References

- Afrasiabian, A. (1998). *The importance of karst water resources studies and research in Iran*. Proceedings Of The Second International Conference On Water Resources In Karst Formations, Tehran-Kermanshah. <http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18837088> [In Persian].
- Afrasiabian, A. (2007). The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 52(4), 673-677. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0502-z>
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Mar Vias, J., Neukum, C., Sinreich, M., Jime'nez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hotzl, H., JesuPerles, M., & Zwahlen, F. (2006). Karst groundwater protection: First application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Li'bar (Southern Spain). *Science Of The Total Environment*, 357(1), 54– 73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.019>
- Cao, H., Dong, W., Chen, H., & Wang, R. (2023). Groundwater vulnerability assessment of typical covered karst areas in northern China based on an improved COPK method. *Journal Of Hydrology*, 624(5). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129904>
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., & Neale, S. (2002). Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology*, 10(2), 340–355. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>
- Destranj, A., Nohegar, A., Malekian, A., Gholami, H., & Jafari Aghdam, M. (2016). Evaluation and preparation of a vulnerability map of Dalahu karst aquifer pollution. *Remote Sensing And Geographic Information System In Natural Resources*, 8(2), 1-16. https://journals.iau.ir/article_532778.html [In Persian].
- Feizi, A., & Khanmohammadi, V. (2017). *Examining the different characteristics of karst areas and their vulnerability*. 17th Iranian National Hydraulic Conference, Technical and engineering faculty Shahrekord University. <https://civilica.com/doc/811488> [In Persian].
- Ford, D.C., & Williams, P.W. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. wiley chichester. John Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118684986>
- Ghadimi, M., Keynezhad, A., & Narouei, R. (2024). The effect of karstification on water resource hazards management based on physicochemical factors of water (Case study: Valiabad-Hezarcham). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 335-354. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2024373119.819>
- Ghadimi, M., & Zanganeh Tabar, S. (2019). Vulnerability assessment of Gilangharb karstic aquifer using EPIK and KDI methods. *Pasture And Watershed*, 73(1), 125-137. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.294605.1446> [In Persian].
- Ghadimi, M., Zangenehtabar, S., Malekian, A., & 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). <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-022-03956-9>
- Gomez, M. M., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, J. (2024). Theoretical analysis and considerations of the main parameters used to evaluate intrinsic karst groundwater vulnerability to surface pollution. *Science Of The Total Environment*, 907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167947>
- Kashefi, M., Entezari, M., & Jafari Aghdam, M. (2019). Evaluation of surface karst vulnerability of Sheshpir and Berghan karst aquifers using fuzzy logic. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(4), 62-47. [10.22034/gmpj.2020.106411](https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106411) [In Persian].
- Maleki, A., Bagheri Seyedashkari, S., & Motaei, S. (2018). Vulnerability assessment of karst aquifers of Kermanshah plain and Bistun-Perav massif using COP model. *Applied Research Of Geographical Sciences*, 19(52), 145-129. [10.29252/jgs.19.52.129](https://doi.org/10.29252/jgs.19.52.129) [In Persian].

- Marín, A., Dörfli, N., & 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(8), 2407-2421. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1056-2>
- Mohebi, Y., & Asghari-Moghadam, A. (2017). Vulnerability assessment of Kehriz plain aquifer using drastic model in GIS environment. *Environmental Geology*, 12(45), 1-16. https://journals.iau.ir/article_669497.html [In Persian].
- Mudarra, M., & Andreo, B. (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zone in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Journal Of Hydrology*, 397(3), 263-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.005>
- Pereira, D. L., Galvão, P., Lucon, T., & Fujaco, M. A. (2019). Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro (geo) logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal Of South American Earth Sciences*, 90, 191-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., & Grasemann, B. (2008). Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Earth-Sciences*, 58(2), 285-297. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-008-1605-5>
- Seif, A., Jafari-Aghdam, M., & Jahanfar, A. (2013). Evaluation and preparation of the vulnerability map of karst aquifers using the COP model (Case study: Glin karst aquifer, Kermanshah province). *Quantitative Geomorphology Research*, 3(3), 65-79. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77961.html [In Persian].
- Vias, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jimenez. P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: The COP method. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 912-925. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>
- Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M. (2005). *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/b138363>
- Yousefi, H., Haqizadeh, A., Yar Ahmadi, Y., & Noormohammadi, P. (2017). Efficiency evaluation and sensitivity analysis of the COP method based on RS and GIS technique in determining the vulnerability of the karst aquifer of Al-Shatar Plain, Lorestan. *Soil And Water Sciences*, 22(3), 272-261. <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.3.261> [In Persian].