

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب با استفاده از روش EPIK و KDI

- ❖ مهرانوش قدیمی*؛ استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ❖ ساسان زنگنه تبار؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

یکی از راهکارهای مهم در مدیریت منابع آب کارست، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی است. هدف از تهیه نقشه آسیب‌پذیری، فراهم شدن امکان شناسایی منابع آب زیرزمینی در معرض خطر آلوده شدن است. آبخوان کارستی گیلانغرب به عنوان بخشی از زون زاگرس چین‌خورده تغذیه‌کننده سراب گیلانغرب می‌باشد. در این پژوهش به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب از روش EPIK متشکل از چهار لایه E (آبی کارست)، P (پوشش محافظ)، I (نفوذ) و K (شبکه کارست) و روش KDI مبتنی بر لایه کاربری اراضی استفاده شده است. پس از اجرای مدل و تهیه نقشه آسیب‌پذیری، مقدار شاخص EPIK بین ۱۲ تا ۲۶ محاسبه شد. توزیع فضایی طبقه‌های نقشه نهایی آسیب‌پذیری حاصل از مدل EPIK نشان می‌دهد که ۱۴/۵۶، ۴۷/۱۷ و ۲۴/۰۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به ترتیب در پهنه آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد. مطابق این نقشه حدود ۷۱ درصد از منطقه مورد مطالعه، دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد که نشانگر آسیب‌پذیری بالای این آبخوان می‌باشد. مطابق نتایج روش KDI، ۷/۵۴، ۹/۴۹، ۲/۹، ۷۷/۸۹ و ۲/۱۸ درصد از منطقه مورد مطالعه به ترتیب دارای تأثیرپذیری زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و سالم (دست نخورده) است که بیانگر آسیب‌پذیری کم آبخوان کارستی گیلانغرب می‌باشد. طبق روش EPIK، طبقه با آسیب‌پذیری کم منطبق بر دشتهای حاشیه ارتفاعات و سازندهای شیلی است که نقش خیلی کمی در آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دارد. اما همین دشتهای حاشیه‌ای طبق روش KDI، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند چرا که بیشتر تحت دخل و تصرف انسانی قرار گرفته‌اند. با ترکیب نتایج این دو روش می‌توان دریافت که آبخوان گیلانغرب دارای حساسیت بالایی نسبت به آلودگی است اما عدم گسترش فعالیت‌های انسانی در حوضه آبرگیر این آبخوان منجر به سالم ماندن منابع آب آن از آلودگی شده است.

کلید واژگان: کارست، آسیب‌پذیری، آبخوان گیلانغرب، EPIK، KDI.

۱. مقدمه

ناهمواری‌های کارستی شامل سیستم‌های زهکشی زیرزمینی پیچیده‌ای متشکل از مجراهای متصل به هم پیچیده و سایر ویژگی‌های ناهمواری است که در سطح مانند فروچاله، پلیه، چشمه و غار ظاهر می‌شوند. در نتیجه، آبخوان‌های کارست را می‌توان به عنوان مخازن زیرزمینی ناهمگن دانست که در آن آب در شبکه‌هایی از ترک‌ها، غارها و کانال‌های به هم پیوسته جمع می‌شود [۱]. منابع آب زیرزمینی همواره منابع مهمی از آب آشامیدنی قابل شرب برای میلیون‌ها نفر در سراسر جهان بوده است. مؤسسه آب‌های کارست^۱ (KWI) تخمین می‌زند که ۲۵٪ از جمعیت جهان یا بر روی مناطق کارستی زندگی می‌کنند یا آب مورد نیاز خود را از سفره‌های آب کارست به دست می‌آورند. در برخی از کشورهای اروپایی آب کارست، حداکثر ۵۰ درصد از منابع آب خانگی را تأمین می‌کند در حالی که در جنوب چین بیش از ۱۰۰ میلیون نفر از آب‌های کارست استفاده می‌کنند [۲]. آبخوان‌های کارستی نسبت به آلودگی حساسیت زیادی دارند، زیرا زمان جابه‌جایی سریع و ظرفیت ذخیره‌سازی در سیستم مجرای اندک بوده، در نتیجه دخالت فرآیندهای طبیعی مانند جذب و تخریب و فیلتراسیون تأثیر کمتری دارند [۳]. ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی یک ویژگی قابل اندازه‌گیری به طور مستقیم در این زمینه نیست، اما رویکردی مبتنی بر این مفهوم اساسی است که برخی مناطق هنگام در نظر گرفتن آلودگی آب‌های زیرزمینی از سایر مناطق آسیب‌پذیرتر هستند [۴]. حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب کارست است [۵]. یکی از راهکارهای مهم در مدیریت منابع آب کارست، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی است که به عنوان یک رویکرد علمی به منظور حفظ منابع آب زیرزمینی، اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ مطرح شد [۶]. تهیه نقشه آسیب‌پذیری، امکان شناسایی

منابع آب زیرزمینی در معرض خطر آلوده شدن را فراهم می‌کند. این رویکرد، به علت پیشرفت در مدل‌های هیدرولوژیکی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در طول دهه گذشته بهبود چشمگیری داشته است [۷]. برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی، روش‌های مختلفی شامل COP، EPIK، KDI، RISKE و PaPRIKA طراحی شده است. این روش‌ها غالباً ترکیبی از ویژگی‌های آبخوان و شرایط هیدرولوژیک و اقلیمی آن می‌باشند. در رابطه با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی، تحقیقاتی در ایران و جهان صورت گرفته است [۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]، که به نتایج حاصل از برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود: [۱۲]، اقدام به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی درفک با استفاده از مدل EPIK کردند و نتایج نشان داد که حدود ۲۰ درصد منطقه در وضعیت آسیب‌پذیری بالا، ۳۵ درصد در وضعیت آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد و مابقی حوضه وضعیت حساسی از نظر آسیب‌پذیری ندارد [۱۳]، با استفاده از دو مدل COP و EPIK به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی چشمه‌های راسون و تانور در شمال غرب اردن پرداختند و دریافتند که این آبخوان با توجه به نتایج هر دو مدل، دارای آسیب‌پذیری بالایی است. [۱۴]، با استفاده از دو مدل DRASTIC و EPIK میزان آسیب‌پذیری آبخوان کارستی زاتون واقع در جنوب غربی رومانی را محاسبه کردند و در نهایت مناطقی از آبخوان زیرزمینی را که نیاز به محافظت بیشتری داشتند مشخص کردند. [۱۵]، اقدام به تهیه نقشه آسیب‌پذیری ذاتی حوضه کارستی در ایالت زینگشان واقع در جنوب چین کردند و دریافتند که ارزیابی آسیب‌پذیری به روش EPIK روشی مقرون به صرفه است زیرا به اطلاعات کمتر نیاز دارد. [۱۶]، در مقاله‌ای با استفاده از مدل‌های EPIK و DRASTIC

^۱Karst Waters Institute^۲Zaton^۳Xingshan

۱۹۳۰ و ۸۰۰ متر است. این آبخوان با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق بین عرض‌های $33^{\circ}57'$ تا $34^{\circ}8'$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ}56'$ تا $46^{\circ}17'$ شرقی واقع شده است. شکل ۱، موقعیت آبخوان کارستی گیلانغرب را نشان می‌دهد. اقلیم منطقه مورد مطالعه از نوع مدیترانه‌ای بوده و دارای یک فصل خشک مشخص منطبق بر دوره گرم و یک فصل مرطوب منطبق بر دوره سرد سال می‌باشد. برحسب آمار بارش و دمای سال ۱۳۹۸-۱۳۸۸، میانگین بارندگی سالانه در حوضه آبخیز این آبخوان ۵۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. سازندهای زمین‌شناسی تاقدیس سراوان از جدید به قدیم شامل آبرفت‌های کواترنری، ماسه‌سنگ و مارن‌های آجاجاری (ترشیاری)، مارن و ژپس‌های گچساران (ترشیاری)، آهک‌های دولومیتی و دولومیت‌های آسماری (ترشیاری) و مارن و شیل‌های پابده-گورپی (کرتاسه) می‌باشد. سازندهای نفوذناپذیر پابده-گورپی در هسته تاقدیس واقع شده و سازند آسماری در سطح تاقدیس رخنمون دارد. آبخوان گیلانغرب که در سازند آسماری به ضخامت حدود ۴۰۰ متر شکل گرفته، از طریق چشمه گیلانغرب در قسمت شمال‌غربی تاقدیس سراوان تخلیه می‌شود.

۲. روش شناسی

این پژوهش توصیفی-تحلیلی و از نظر هدف، کاربردی می‌باشد. داده‌های اصلی پژوهش نقشه‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ برگرفته از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه‌های زمین‌شناسی کردند، سرپل‌ذهاب و ایلام با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین‌شناسی ایران، DEM ۱۰ متری سازمان نقشه‌برداری ایران و اطلاعات هیدروشیمیایی آب چشمه کارستی گیلانغرب برگرفته از آب منطقه‌ای کرمانشاه می‌باشد. به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب، مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار، نرخ‌بندی و تلفیق اعمال گردیده است. پردازش، تلفیق و

اقدام به مدل‌سازی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی برای ارزیابی نفوذ آب دریا برای سه منطقه به نمایندگی از شهرهای ساحلی لبنان کردند و دریافتند توانایی مدل‌های مورد استفاده در توصیف دقیق نفوذ آب شور محدود است. [۱۷]، در مقاله‌ای با استفاده از دو مدل EPIK و KDI برای شناسایی و ارزیابی آسیب‌پذیری کارست در پارک ایالتی اینتروال^۱ و منطقه اطراف آن در جنوب شرقی برزیل استفاده کردند و دریافتند که در فلات گاپیارا^۲ آسیب‌پذیری کارست کم است اما در محدوده پراناپیکابا^۳ به دلیل وجود ویژگی‌های ثابت و متمرکز کارست، آسیب‌پذیری بسیار زیاد است.

آبخوان گیلانغرب تغذیه‌کننده سراب پرآب گیلانغرب می‌باشد که به منظور ذخیره‌سازی آب این چشمه کارستی و استفاده در مصارف شرب و کشاورزی بر روی آن، سد احداث شده است. ورود هر گونه آلودگی به آبخوان چشمه گیلانغرب می‌تواند این منبع عظیم آبی را به خطر بیندازد. بررسی میزان آسیب‌پذیری این آبخوان، می‌تواند مسئولان امر را در دور نگه داشتن منابع آلاینده از مناطق با آسیب‌پذیری بالا یاری رساند. به همین منظور در این پژوهش به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب از روش EPIK و KDI استفاده شده است.

۱.۱. منطقه مورد مطالعه

آبخوان گیلانغرب مابین استان کرمانشاه و ایلام قرار می‌گیرد. شهر گیلانغرب در شمال‌غربی این آبخوان قرار دارد. از نظر ژئومورفولوژیکی آبخوان گیلانغرب بخشی از زون زاگرس چین‌خورده است و منطبق بر تاقدیس سراوان به طول ۳۷ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتر می‌باشد. کوه نثار از دیگر ارتفاعات مهم این آبخوان است. مساحت آبخوان گیلانغرب ۱۱۹ کیلومتر مربع و محیط آن حدود ۷۵/۷ کیلومتر و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب

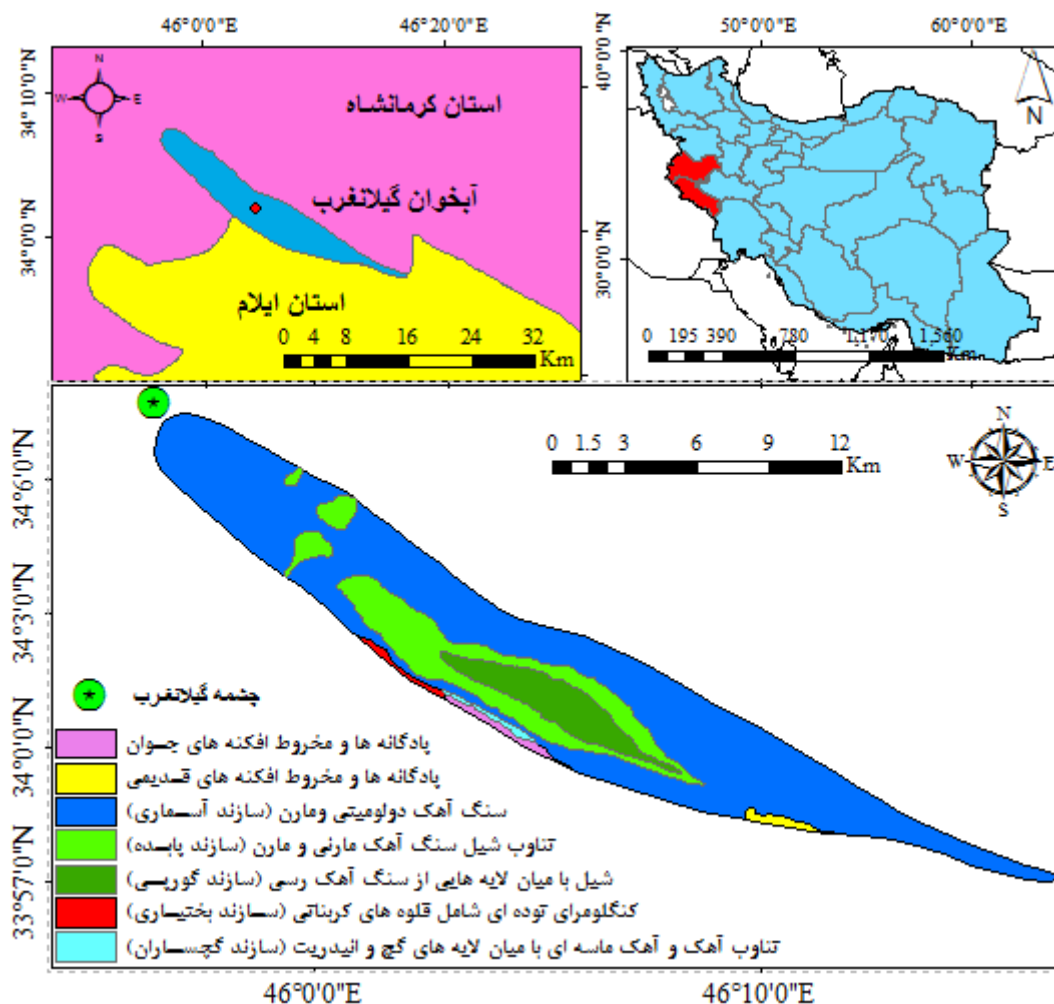
^۱Intervales

^۲Guapiara

^۳Paranapiacaba

و تهیه نقشه فروچاله‌ها با استفاده از روش Fill Sink از DEM ۱۰ متری استفاده شد. لایه خاک با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ برگرفته از مؤسسه خاک و آب کشور برای تهیه نقشه نوع خاک منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه نقشه توسعه کارست نیز با استفاده از عوامل دخیل در آن، از تابع خطی فازی و بازدهی‌های میدانی استفاده شد. مدل KDI، مبتنی بر پوشش زمین و نوع استفاده انسان از آن است. به همین منظور از لایه کاربری اراضی آبخوان کارستی گیلانغرب برگرفته از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور استفاده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های مورد نیاز برای مدل EPIK و KDI، همچنین نمایش نتایج در مراحل مختلف کار، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4 انجام گرفته است. داده‌های مورد نیاز برای تهیه پارامترهای مدل EPIK از منابع مختلف و با فرمت‌های گوناگون جمع‌آوری شده است. از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ برای تعیین محدوده مورد مطالعه و از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برای شناخت سن و نوع سنگ‌ها و نهشته‌ها استفاده شد. به منظور بررسی آبخوان کارستی گیلانغرب از داده‌های هیدروشیمیایی سال ۱۳۹۷ برگرفته از آب منطقه‌ای استان کرمانشاه استفاده شده است. برای تهیه نقشه شیب



شکل ۱. موقعیت آبخوان کارستی گیلانغرب

منطقه تهیه گردید. اپی کارست به سه کلاس مبتنی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی کارست تقسیم می‌شود. پارامتر شرایط نفوذ، نوع تغذیه مجدد آبخوان کارست را در نظر می‌گیرد و شامل محل تغذیه یا کمیت آن نمی‌شود. فاکتور نفوذ (I) با توجه به تغییر در شرایط نفوذ از نفوذ متمرکز تا نفوذ پراکنده، به ۴ دسته (از I1 به I4) تقسیم می‌شود. فاکتور K نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود شبکه کارستی و همچنین درجه توسعه آن شبکه است [۱۹].

EPIK مخفف چهار پارامتر اپی کارست (E)، پوشش محافظ (P)، شرایط نفوذ (I) و توسعه شبکه کارست (K) می‌باشد. جدول (۱)، طبقه‌بندی استاندارد روش آسیب‌پذیری EPIK را نشان می‌دهد. [۱۸]، منطقه اپی کارست را به عنوان بالاترین منطقه از سنگ‌های کارستی تعریف کرده است که در آن نفوذپذیری بالاتر و یکنواخت‌تری از لایه زیرین به دلیل شکستگی‌ها و گسترش کارستی شدن وجود دارد. لایه اپی کارست از طریق بررسی‌های میدانی و شناخت وضعیت کارست سطحی

جدول ۱. طبقه‌بندی استاندارد برای پارامترهای [EPIK] [۱۹].

Epikarst (E)			
Epikarst		Karst morphological features	
Highly developed	E1	Sinkholes, dolines, caves, karrenfields or outcrops with high fracturing.	
Moderately developed	E2	Intermediate zones in the alignment of dolines or dry valleys, outcrops with medium fracturing.	
Small or absent (rest of the catchment)	E3	No karst morphological phenomena, low fracture density	
Protective cover (P)			
Protective cover	Characterisations		
	Soil lying directly on limestone or on some high permeability coarse detritus, or lateral glacial tills.	Soil lying on low permeability geological layers, e.g. lake silt or clays.	
Absent ↓ present	P1	0-20 cm of soil	2-20 cm of soil on layers that have a thickness of less than 1 m.
	P2	20-100 cm of soil	20-100 cm of soil on layers that have a thickness of less 1 m.
	P3	100-200 cm of soil	<100 cm of soil or > 100 cm of soil and > 100 cm of layers of low permeability.
	P4	>200 cm	>100 cm of soil and thick detritus layers of very low hydraulic conductivity or > 8 m of clay and clayey silt.
Infiltration (I)			
Infiltration condition	Characterization		
Concentrated ↓ Diffuse	I1	Perennial or temporarily losing streams-perennial or temporary stream feeding a swallow hole or a sinking (doline) – water catchment areas of these above- mentioned streams, including artificial drainage systems.	
	I2	Water catchment areas of streams in I1 (without artificial drainage systems) with a slope greater than 10% for cultivated areas and 25% for meadows and pastures.	
	I3	Water catchment areas of the I1 stream (without artificial drainage systems) whose slope is less than: 10% for cultivated areas and 25% for meadows and pastures. Low relief areas collecting runoff water and slopes feeding those low areas (slope higher than: 10% for cultivated sectors and 25% for meadows and pastures).	
	I4	The rest of catchment	
Karst network development (K)			
Karst network	Characterization		
Well-developed karst network	K1	Presence of a well-developed karst network (network with decimeter to meter sized channels that are rarely plugged and are well connected).	
Poorly-developed karst network	K2	Presence of poorly-developed karst network (small conduits network, a poorly connected or filled network, or a network with decimeter or smaller sized openings).	
Mixed or fissured aquifer	K3	Presence of a spring emerging through porous terrain. Non-karst, only fissured aquifer.	

پارامتر از روش ارزیابی آسیب پذیری EPIK نشان می‌دهد. براساس وزن و محاسبه نرخ شاخص حفاظت (F)، این شاخص می‌تواند مقادیر مختلف از ۹ تا ۳۴ را به دست آورد. در جدول (۳)، کلاس‌های آسیب‌پذیری مختلف بر اساس مقادیر شاخص حفاظت (F) نشان داده شده است.

یک شبکه کارست به خوبی توسعه یافته، دارای شبکه‌ای از فروچاله‌ها با اندازه متغیر دسی‌متر تا متر است. شاخص حفاظت کلی (F) برای روش EPIK با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

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

که در این فرمول α ، β ، γ و δ ضرایب وزن دار هستند جدول ۲ (۲)، وزن مربوط به این ضرایب را برای هر

جدول ۲. نرخ استاندارد و فاکتورهای وزن برای مدل [EPIK ۱۹].

پارامتر	شبکه کارست (K)	ضریب نفوذ (I)	پوشش حفاظتی (P)	آبی کارست (E)
ضرایب وزن دار	$\delta = 2$	$\gamma = 3$	$\beta = 1$	$\alpha = 3$
نرخ استاندارد برای هر زیرفاکتور	K1 K2 K3	I1 I2 I3 I4	P1 P2 P3 P4	E1 E2 E3
	۱ ۲ ۳	۱ ۲ ۳ ۴	۱ ۲ ۳ ۴	۱ ۳ ۴

جدول ۳. کلاس‌های آسیب‌پذیری برای روش EPIK بر اساس ضریب حفاظت کلی (F)، [۱۹].

طبقه آسیب‌پذیری	شاخص حفاظت (F)
خیلی بالا	$19 \geq F$
بالا	$20 < F < 25$
متوسط	$F > 25$
کم	$F > 25$ با حضور P4 + طبقات I3 و I4

نداشت [۲۱]. در مطالعه آن‌ها، یک شاخص اختلال در محیط زیست استاندارد و سلسله مراتبی ارائه شده است که برای اندازه‌گیری ریسک و به عنوان ابزاری استاندارد برای دانشمندان کارست برای اندازه‌گیری، مقایسه و تقابل میزان اختلال در منطقه خاص خود مورد استفاده قرار بگیرد هم‌چنین با ارزیابی سطح آشفستگی منطقه و شناسایی مناطقی از سیستم کارست که نیاز به حفاظت بیشتر یا مطالعه بیشتر دارند می‌توان به سازمان‌ها در مورد حفاظت از یک منطقه کارستی کمک کرد [۲۲]. مقادیر مرجع برای ارزیابی آسیب‌پذیری کارست در جدول (۴) آمده است.

روش KDI (Karst Disturbance Index) روش دوم مورد استفاده برای ارزیابی آسیب‌پذیری کارست آبخوان گیلانغرب است. این روش توسط ون بینن و تاونسند در سال ۲۰۰۵ به منظور تجزیه و تحلیل کارست‌ها از طریق تهیه نقشه کاربری اراضی، بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های پردازش تصاویر آغاز شد که ویژگی‌های جداگانه استفاده از منطقه را برجسته می‌کند [۱۶]. تا پیش از انتشار مقاله ون بینن و تاونسند [۲۰]، هیچ روشی برای مقایسه و اندازه‌گیری اختلال کارست وجود

جدول ۴. طبقه‌بندی میزان تأثیر کاربری اراضی در مناطق کارستی [۱۹].

KDI	درجه تاثیر
۰/۸ - ۱	تأثیر زیاد
۰/۶ - ۰/۷۹	تأثیر متوسط
۰/۴ - ۰/۵۹	تأثیر کم
۰/۲ - ۰/۳۹	تأثیر خیلی کم
۰ - ۰/۱۹	سالم مانده

۳. نتایج

۱،۳. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی،

هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی آبخوان گیلانغرب

در آبخوان گیلانغرب، به دلیل فراهم بودن شرایط مناسب کارست‌زایی از جمله سنگ‌شناسی، تکتونیک، اقلیم و شرایط ژئومورفولوژیکی، اشکال کارستی متنوعی شکل گرفته است. کارن‌ها، شافت‌ها، پلژه، غارها و دره‌های عمیق کارستی مهم‌ترین لندفرم‌های تاقدیس سراوان می‌باشند (شکل ۲). ژئومورفولوژی کارست سطحی تاقدیس سراوان در مناطق هموار رأس تاقدیس نسبتاً توسعه یافته و در دامنه‌ها و حواشی تاقدیس کم‌توسعه می‌باشد. ژئومورفولوژی کارست سطحی تأثیر زیادی در کنترل نوع و میزان تغذیه و میزان آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی دارد. مناطق دارای سنگ‌های کربناته کارستی شده بدون پوشش خاک، نشان دهنده مناطق تغذیه خودزا بوده و می‌توان انتظار داشت ۸۰ درصد بارش در آن‌ها نفوذ کند [۲۳]. تغذیه متمرکز از طریق فروچاله‌ها باعث انتشار سریع آلودگی و آسیب‌پذیری بالای آبخوان‌های کارستی می‌شود. نوع شارژ آبخوان گیلانغرب از نوع خودزا بوده و در این آبخوان دو نوع تغذیه منتشر از طریق درز و شکاف‌ها و تغذیه متمرکز از طریق فروچاله‌ها صورت می‌گیرد. در این آبخوان تغذیه منتشر غلبه دارد. آب موجود در آبخوان گیلانغرب با استفاده از سراب گیلانغرب (مورد) به خارج راه

می‌یابد. اطلاعات مربوط به دبی این چشمه در جدول (۵) نشان داده می‌شود. حداکثر دبی چشمه مورد مطالعه در اواخر زمستان و اوایل بهار و حداقل دبی آن‌ها در شهریور ماه مشاهده می‌شود. معمولاً مقدار هدایت الکتریکی (EC) چشمه‌های کارستی کمتر از $(500 \mu\text{s}/\text{cm})$ به دست می‌آید. میزان EC چشمه مورد مطالعه کمتر از ۵۰۰ بوده و حدود $428 \mu\text{s}/\text{cm}$ می‌باشد. افزایش غلظت Mg یا کاهش نسبت مولار Ca/Mg نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند تغذیه کننده چشمه است [۲۳]. مقدار این نسبت برای چشمه گیلانغرب ۲/۹ می‌باشد که این امر حاکی از زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه است. بررسی اطلاعات هیدروشیمیایی چشمه منطقه مورد مطالعه طبق جدول (۴)، نشان می‌دهد که از دید آنیونی، یون بی‌کربنات (HCO_3) در آب چشمه غالب و تیپ آب آن کربناته است. به لحاظ کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و بعد از آن منیزیم بوده و آب چشمه، رخساره کلسیک دارد. در کل، ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چشمه تأییدکننده منشأ کارستی آبخوان آن می‌باشد.

جدول ۵. خصوصیات فیزیکوشیمیایی سراب گیلانغرب (۱۳۹۷/۰۲/۲۸).

نام چشمه	EC	TDS	pH	HCO ₃	So ₄	Cl	CO ₃	Na	K	Ca	Ma	ca
	μs/cm	ppm		mg/l							mg	
گیلانغرب	۴۲۸	۲۷۴	۸/۰۶	۳/۶	۰/۲۶	۰/۳	۰	۰/۲۸	۰/۱	۲/۹	۱	۲/۹



شکل ۲. اشکال کارستی آبخوان کارستی گیلانغرب:

(A شافت، B غار، C دره کارستی و D پهنه کارستی رأس تاقدیس (منبع: باقری و همکاران) [۲۴].

۲,۳. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان گیلانغرب

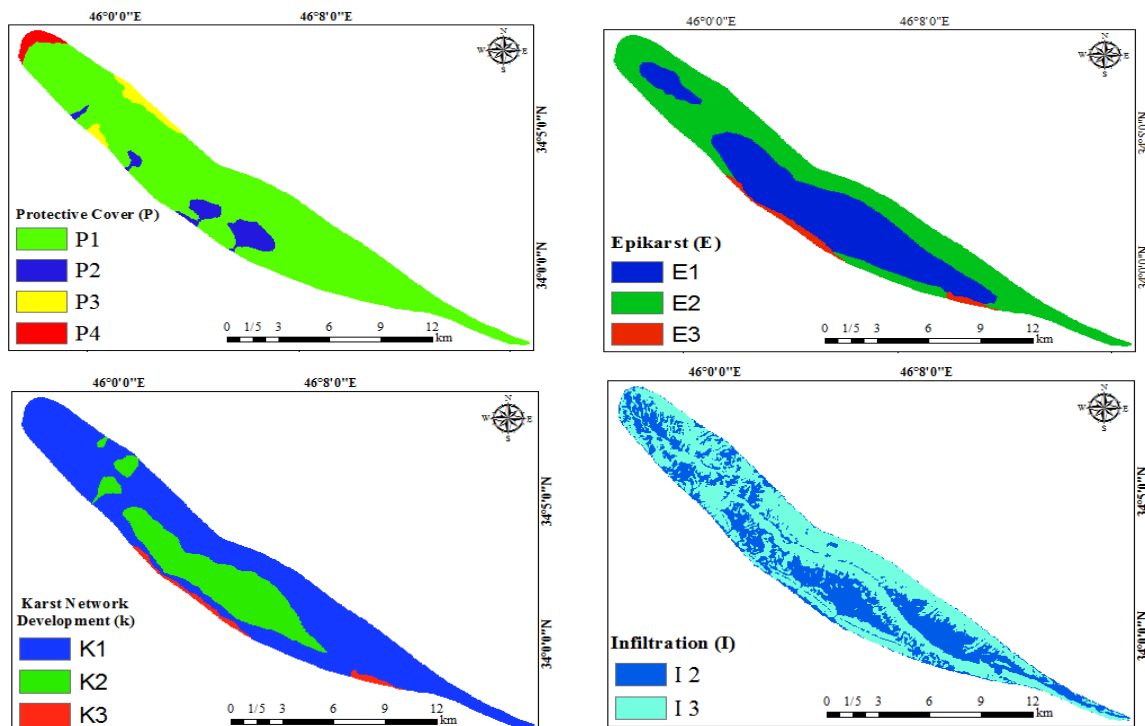
روش EPIK:

لایه‌های اپی کارست از طریق یک بررسی میدانی در مورد ویژگی‌های کارست و شبکه‌های کارست تولید شد. لایه‌های باقیمانده (خاک، زمین شناسی، پوشش زمین و غیره) با استفاده از داده‌های موجود آماده شدند. لایه اپی کارست خود بسته به وضعیت توسعه کارست آبخوان گیلانغرب به سه لایه E1، E2 و E3 مطابق شکل (۲) تقسیم می‌شد. شکل (۳)، نقشه فاکتور اپی کارست را برای

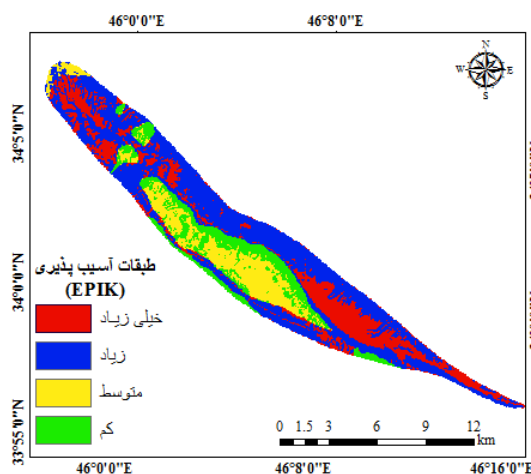
منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. فاکتور P با استفاده از نقشه‌های خاک و بررسی میدانی مشخص شد و در شکل (۳)، نشان داده می‌شود. این فاکتور برای منطقه مورد مطالعه در ۴ فاکتور فرعی P1، P2، P3 و P4 تقسیم شد. برای به دست آوردن نقشه فاکتور I (شرایط نفوذ) از لایه‌های فروچاله‌ها و شیب استفاده شد. با توجه به کم بودن تعداد فروچاله‌ها فاکتور I به ۲ طبقه I2 و I3 مطابق شکل (۳) تقسیم شد. سرانجام، نقشه فاکتور K (توسعه شبکه کارست)، متشکل از سه فاکتور فرعی K1، K2 و

(۳)، در چهار طبقه خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی گردید. مطابق این نقشه به ترتیب ۲۴/۰۳، ۴۷/۱۷، ۱۴/۵۶ و ۱۴/۲۴ درصد از آبخوان کارستی گیلانغرب دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم می‌باشد. جدول (۶)، مساحت و درصد مساحت هر یک از طبقات آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب را نشان می‌دهد

K3، که هر کدام از آن‌ها نماینده درجات مختلف توسعه شبکه کارست هستند و در شکل (۳) نشان داده شده است که در آن، K3 مناطق غیر کارستی (فقط سفره‌های آب با شکستگی زیاد) را نشان می‌دهد. با اجرای مدل EPIK نقشه میزان آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب تهیه گردید که در شکل (۴)، به نمایش گذاشته شده است. این نقشه مطابق جدول



شکل ۳. نقشه معیارهای مدل EPIK در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان گیلانغرب



شکل ۴. نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان گیلانغرب حاصل از اجرای مدل EPIK

جدول ۶. مساحت و درصد طبقات آسیب‌پذیری آبخوان گیلانغرب

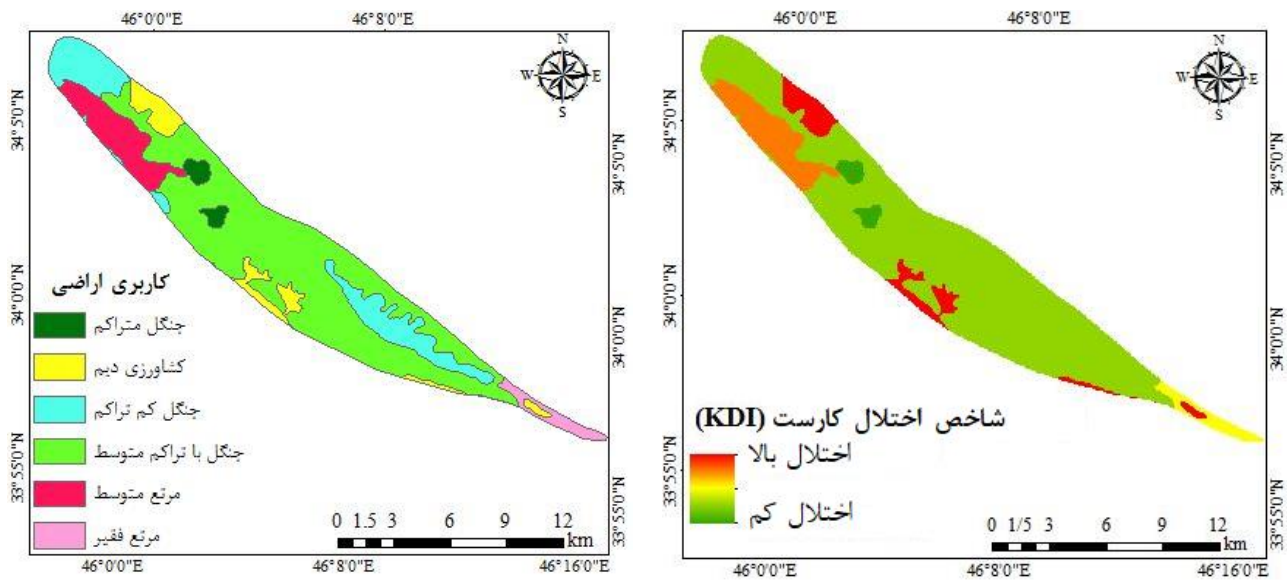
ردیف	میزان آسیب‌پذیری	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۱	کم	۱۶/۹۵	۱۴/۲۴
۲	متوسط	۱۷/۳۳	۱۴/۵۶
۳	زیاد	۵۶/۱۶	۴۷/۱۷
۴	خیلی زیاد	۲۸/۶	۲۴/۰۳

روش KDI:

شاخص اختلال کارست (KDI) مبتنی بر استفاده از زمین است به همین منظور از لایه کاربری اراضی استفاده شد و وضعیت تأثیرات انسانی در محیط منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین مساحت از توده کارستی گیلانغرب پوشیده از جنگل‌های بلوط می‌باشد که در بیشتر مناطق به صورت کم تراکم و با تراکم متوسط می‌باشد و فقط در بعضی نقاط تراکم بالا دارد. در مناطق تحت پوشش جنگل کمترین اختلال در محیط کارستی مشاهده می‌شود و استفاده انسان از محیط کمترین تأثیرات را در محیط کارستی و وضعیت منابع آب آن دارد. در توده کارستی گیلانغرب قسمت‌هایی از حاشیه آن شامل مراتع فقیر و متوسط می‌باشد. استفاده ساکنان بومی از این مناطق به عنوان مکانی برای چرای دام‌ها باعث اختلال متوسطی در منطقه شده است. از بین بردن مراتع و اضافه شدن فضولات دامی به محیط در این مناطق می‌تواند به عنوان عامل اختلال در نظر گرفته شود که البته در مورد اندازه‌گیری دقیق آن، داده‌های کافی در دسترس نیست. در مناطق کشاورزی تغییری وجود ندارد که دلالت بر تغییرات ناگهانی در رژیم آب داشته باشد که ممکن است باعث عدم تعادل در پویایی سیستم کارست فعلی شود. اگرچه مناطقی وجود دارد که تحت استفاده فزاینده انسان جزء اراضی تحت فشار هستند و سهم مهمی در ارزیابی آسیب‌پذیری کارست منطقه دارند. در کل در توده کارستی گیلانغرب مناطق تحت کشاورزی جزء مناطق با بیشترین اختلال کارست در نظر گرفته شده‌اند. در این مناطق استفاده از کودهای شیمیایی و

حیوانی و سموم دفع آفات می‌تواند بیشترین تأثیر را در آلودگی آب‌های نفوذی به آبخوان زیرین را داشته باشد. البته اطلاعات دقیقی در مورد میزان استفاده انسان از سموم و کودها در متر مربع وجود ندارد اما می‌توان در کل زمین‌های تحت کشاورزی را در مقایسه با سایر محدوده‌های آبخوان گیلانغرب که تغییرات انسانی کمتر است جزء مناطق با بیشترین اختلال در نظر گرفت. در خصوص اپی کارست آبخوان گیلانغرب می‌توان گفت که از وضعیت حفاظتی خوبی برخوردار است به طور مثال، از فروچاله‌ها و غارهای کارستی به عنوان مناطق دفن زباله استفاده نمی‌شود. در کل می‌توان غارهای کارستی را در ۲ گروه قرار داد. غارهای گروه اول که در جزء مناطق حفاظت شده هستند و یا دسترسی به آن‌ها دشوار است و غارهای گروه دوم که حفاظت شده نیستند و یا دسترسی به آن‌ها بسیار آسان است [۱۷]. غارهای موجود در توده کارستی گیلانغرب جزء غارهای گروه دوم هستند که دسترسی به آن‌ها آسان است و امکان آلودگی و ریختن زباله و تخریب توسط انسان وجود دارد.

با توجه به نقشه نهایی حاصل از اجرای شاخص اختلال کارست (KDI)، که در شکل (۵)، نشان داده می‌شود می‌توان گفت که آبخوان کارستی گیلانغرب وضعیت مناسبی دارد به طوری که طبق جدول (۷) حدود ۷۸ درصد از مساحت این آبخوان تأثیرپذیری خیلی کم دارد. با توجه به نقشه نهایی، ۷/۵۴، ۹/۴۹، ۲/۹، ۷۷/۸۹ و ۲/۱۸ درصد از منطقه مورد مطالعه به ترتیب دارای تأثیرپذیری زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و سالم (دست نخورده) است.



شکل ۵. سمت چپ: نقشه کاربری اراضی و سمت راست: نقشه شاخص اختلال کارست (KDI) آبخوان کارستی گیلانغرب

جدول ۷. مساحت طبقات حاصل از اجرای مدل KDI.

ردیف	طبقات شاخص اختلال کارست (KDI)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۱	تأثیرپذیری زیاد	۸/۹۹	۷/۵۴
۲	تأثیرپذیری متوسط	۱۱/۳۴	۹/۴۹
۳	تأثیرپذیری کم	۳/۴۶	۲/۹
۴	تأثیرپذیری خیلی کم	۹۲/۹۸	۷۷/۸۹
۵	سالم (دست نخورده)	۲/۶	۲/۱۸

۴. بحث و نتیجه‌گیری

روش EPIK و KDI از روش‌هایی هستند که جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با هر سیستم جریان، ابداع شده است. تلفیق این روش‌ها با تکنولوژی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور باعث شده است تا با صرف وقت و هزینه کمتر، نتایج مطلوب‌تری در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی حاصل شود. برای ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گیلانغرب از مدل EPIK متشکل از چهار پارامتر اپی کارست (E)، پوشش محافظ (P)، شرایط نفوذ (I) و توسعه شبکه کارست (K) و روش KDI مبتنی بر لایه کاربری اراضی استفاده گردید. پس از اجرای مدل و

تهیه نقشه آسیب‌پذیری، میزان شاخص EPIK بین ۱۲ تا ۲۶ محاسبه گردید. توزیع فضایی کلاس‌های نقشه نهایی آسیب‌پذیری حاصل از مدل EPIK نشان می‌دهد که ۱۴/۲۴، ۱۴/۵۶، ۴۷/۱۷ و ۲۴/۰۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به ترتیب در پهنه آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد. مطابق این نقشه حدود ۷۱ درصد از منطقه مورد مطالعه، دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد که نشانگر آسیب‌پذیری بالای این آبخوان می‌باشد. بر خلاف سایر آبخوان‌هایی که دارای سنگ یکپارچه آهکی هستند، در این آبخوان مناطق هموار رأس آبخوان جزء مناطق با آسیب‌پذیری متوسط و کم می‌باشند و دلیل آن را

طبقات با سنگ‌های آهکی خالص‌تر و کارست توسعه یافته‌تر می‌باشد روش KDI میزان آسیب‌پذیری را در مناطق با دخالت بیشتر فعالیت‌های انسانی، بیشتر می‌داند. به بیان دیگر مناطق مرتفع و کارستی آبخوان گیلانغرب که با توجه به روش EPIK میزان پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی را نشان می‌دهند به دلیل کمبود خاک مناسب و نبودن فعالیت‌های انسانی شدید، میزان آسیب‌پذیری کمتری را مطابق روش KDI نشان می‌دهند. در واقع با مراقبت و جلوگیری از گسترش فعالیت‌های مخرب انسانی می‌توان از آلوده شدن آبخوان این منطقه که حساسیت بالایی نسبت به آلودگی دارد جلوگیری کرد.

می‌توان در سازندهای شیلی که نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری و توسعه کارست در این قسمت دارند دانست. طبقه با آسیب‌پذیری کم منطبق بر دشت‌های حاشیة ارتفاعات و سازندهای شیلی است که نقش خیلی کمی در آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دارد که در مقایسه با تحقیق [۲۵] در مورد این آبخوان، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج روش KDI، ۷/۵۴، ۹/۴۹، ۲/۹، ۲۷/۸۹ و ۲/۱۸ درصد از منطقه مورد مطالعه به ترتیب دارای تأثیرپذیری زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و سالم (دست نخورده) است که بیانگر آسیب‌پذیری کم آبخوان کارستی گیلانغرب می‌باشد. دلیل تفاوت نتایج حاصل از دو روش مذکور را چنین می‌توان بیان کرد که برخلاف روش EPIK که بیانگر پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتر در

References

- [1] Milanovic P.T. Water Resources Engineering in Karst. CRC Press. Boca Raton. 2004.
- [2] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Wiley, New York. 2007.
- [3] Mudarra M, Andreo B. Relative Importance of the Saturated and the Unsaturated Zones in the Hydrogeological Functioning of Karst Aquifers: the Case of Alta Cadena (Southern Spain). Journal of Hydrology. 2011. ۳۹۷(۳):۲۶۳-۲۸۰.
- [4] Gogu R.C., Dassargues A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. Hydrogeological Journal. 2000. 8: 337-345.
- [5] Afrasiabian A. The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. Environ Geol. 2007. 52: 673-677.
- [6] Adams B, Foster S. Land-surface zoning for groundwater protection. Journal of Institution of Water and Environmental Management. 1992. 6: 312-320.
- [7] Kattaa B, Al-Fares W, Al Charideh A. Groundwater Vulnerability Assessment For the Banyas Catchment of the Syrian Coastal Area Using GIS and the RISKE Method. Journal of Environmental Management 2010. 91(5): 1103-1110.
- [8] Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K., & Bold, S. (2019). Groundwater Vulnerability and Risk Assessment in A Karst Aquifer of Greece Using EPIK Method. Environments, 6(11), 116.
- [9] 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.
- [10] Al-Manmi, D. A. M. A., & Saleh, K. A. (2019). Delineation of spring protection zone and vulnerability mapping of selected springs in Sulaymaniyah area, Kurdistan, Iraq. Environmental Earth Sciences, 78(21), 622.

- [11] Hamdan, Ibraheem, Thomas Ptak, Bettina Wiegand, and Martin Sauter. "Development of a quantitative transport-time-based groundwater vulnerability model for non-point-source pollution in karst aquifers: a conceptual approach and example from the Tanour and Rasoun spring catchment, north-western Jordan." *Hydrogeology Journal* (2020): 1-16.
- [12] Kardan moghadam H, Javadi S, Kavosi heidari A and Mirarabi A. Assessment of the Inherited Vulnerability of the Karst Aquifer in Northern Iran by EPIK Method. First International Conference on Water, Environment and Sustainable Development. University of Mohaghegh Ardabili, 2015. [Persian]
- [13] Hamdan I, Margane A, Ptak, T, Wiegand B and Sauter M. Groundwater vulnerability assessment for the karst aquifer of Tanour and Rasoun springs catchment area (NW-Jordan) using COP and EPIK intrinsic methods. *Environ Earth Sci.* 2016. 75(1474): 1-13.
- [14] Radutu A, Gaitanaru D, Vlaicu M, Iliescu C, Gogu c. Vulnarability assessment of the zaton-bulba karst aquifer, a basis to define its protection areas. *AgroLife Scientific Journal.* 2018. 7(1): 105-114.
- [15] Jakada H, Chen1 zh, Luo1 Zh, Zhou H, Luo1 M, Ibrahim A, Tanko N. Coupling Intrinsic Vulnerability Mapping and Tracer Test for Source Vulnerability and Risk Assessment in a Karst Catchment Based on EPIK Method: A Case Study for the Xingshan County, Southern China. *Arabian Journal for Science and Engineering.* 2019. 8(1): ۱-۱۳.
- [16] Momejian N, Abou Najm M, Alameddine L, El-Fadel M. Groundwater Vulnerability Modeling to Assess Seawater Intrusion: a Methodological Comparison with Geospatial Interpolation. *Water Resources Management.* 2019. 33: ۱۰۳۹-۱۰۵۲.
- [17] Lenhare B.D, Sallun Filho W. Application of EPIK and KDI methods for identification and evaluation of karst vulnerability at Intervalles State Park and surrounding region (Southeastern Brazil). *Carbonates and Evaporites.* ۲۰۱۹. ۳۴:۱۷۵-۱۸۷.
- [18] Klimchouk A. The natural and principal characteristics of epikarst. In: *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology La Chaux-de-Fonds, Switzerland.* 1997. Vol. 1 (cited in Golscheider 2000).
- [19] Doerfliger N, Zwahlen F. *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide.* Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Berne. 1998. v. 56.
- [20] van Beynen P.E, and Townsend K.M. A Disturbance Index for Karst Environments. *Environmental Management,* ۲۰۰۵. ۳۶: ۱۰۱-۱۱۶.
- [21] North Leslie A. *Application and Refinement of the Karst Disturbance Index in West Central, Florida.* Graduate Theses and Dissertations. 2007. <http://scholarcommons.usf.edu/etd/3765>.
- [22] Goldscheider & Drew. *Methods in karst Hydrogeology.* British Geological Survey Wallingford, UK. 2007.
- [23] Karimi vardanjani H. *Hydrogeology of karst (concepts and methods).* Eram Shiraz publications. first edition. 20۱۱. [Persian].
- [24] Bagheri seyedshakari, S., Yamani, M., Jaafarbeiglu, M, Karimi, H. and Moghimi, E. (2013). evaluation of hydrodynamic features of karstic aquifer using time series (case study: Gilanharb and Khorin aquifer in Kermanshah Province). *Quantitative geomorphology researches.* ۲(۳): ۱-۱۶. [Persian].
- [25] Karimi, H., Bagheri seyedshakari, S., Aghajani, M. (2015). Evaluation of pollution amount and mapping of Gilan Gharb karst aquifer vulnerability using EPIK model, third national conference of iranian association of geomorphology, university of Tehran. [Persian].

