

مدل‌سازی مکانی مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی با استفاده از مدل KARSTLOP

(مطالعه موردی: آبخوان کارستی خورین)

مژگان انتظاری* - استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران
مریم جعفری اقدم - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۷/۲۲

چکیده

به علت ماهیت پیچیده مناطق کارستی، مبحث تغذیه در آبخوان‌های کارستی امری پیچیده بوده و تعریف تغذیه در شرایط مطلق امکان‌پذیر نیست. مناطق تغذیه، میزان و توزیع فضایی تغذیه در آبخوان‌های کارستی، بستگی به عواملی چون ژئومورفولوژی کارست و میزان توسعه آن، اقلیم، شیب، پوشش گیاهی، خاک و عوامل زمین‌شناسی دارد. آبخوان کارستی خورین در استان کرمانشاه، نقش مهمی در شکل‌گیری و استمرار حیات جوامع انسانی اطراف خود و اکوسیستم تالاب هشیلان دارد. هدف از پژوهش، مدل‌سازی مناطق تغذیه آبخوان خورین با استفاده از مدل KARSTLOP می‌باشد. بررسی نقشه پهنه‌بندی آبخوان خورین نشان می‌دهد که ۶۱٪ از مساحت آبخوان دارای میزان تغذیه بیش از ۷۰٪ بوده و ۸۸٪ از مساحت آبخوان، دارای تغذیه بیش از ۵۰٪ می‌باشد. این امر حاکی از میزان نفوذپذیری بالای آبخوان خورین است. تطابق نقشه پهنه‌بندی نهایی با نقشه ژئومورفولوژی کارست سطحی آبخوان، حاکی از نقش اصلی ژئومورفولوژی کارست در توزیع مکانی مقادیر تغذیه در آبخوان خورین می‌باشد. مناطق با میزان تغذیه بیش از ۷۰٪ منطبق بر نواحی توسعه یافته کارستی رأس کوهستان می‌باشد. ضخامت کم خاک، پوشش گیاهی نسبتاً تنک، تکتونیزه بودن منطقه، رخنمون سازند کربناته بیستون از دیگر عوامل مؤثر در میزان تغذیه بالای کوه خورین می‌باشند. بالا بودن میزان تغذیه و توزیع مکانی مناطق تغذیه آبخوان نشان می‌دهد که آبخوان در برابر انتشار آلودگی آسیب‌پذیر بوده و نیازمند برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی جهت آلودگی با مدنظر قرار دادن نقشه پهنه‌بندی تغذیه و نقشه ژئومورفولوژی کارست سطحی می‌باشد.

واژگان کلیدی: آبخوان کارستی خورین، مناطق تغذیه، نفوذپذیری، مدل KARSTLOP.

مقدمه

مناطق کارستی به مناطق مشخصی اطلاق می‌شوند که از طریق انحلال سنگ‌بستر و توسعه شبکه زهکشی زیرزمینی توسعه یافته و اساساً با سنگ‌آهک ارتباط پیدا می‌کند (والتهام و همکاران^۱؛ ۲۰۰۵، ۱). در واقع کارست، اصطلاح مورد استفاده برای توصیف یک سبک خاص از چشم‌اندازها شامل غارها و سیستم‌های آب زیرزمینی است که به‌ویژه در سنگ‌های انحلالی مانند سنگ‌آهک، سنگ مرمر، نمک و گچ به وجود می‌آید (فورد و ویلیامز^۲، ۲۰۰۷، ۱). ایجاد و توسعه ژئومورفولوژی کارست، باعث شکل‌گیری سیستم کارستی و تشکیل آبخوان‌های کارستی می‌گردد. باکالویچ^۳ (۲۰۰۵) معتقد است که آبخوان‌های کارستی، سنگ‌های کربنات‌های هستند که دارای آب زیرزمینی با قابلیت بهره‌برداری می‌باشند. در واقع، آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی بوده که آب را در شبکه‌ای از درزه و شکاف‌های بهم‌پیوسته، غارها و کانال‌ها ذخیره می‌کنند (میلانویچ^۴؛ ۲۰۰۵، ۳۳). یکی از دلایل اهمیت یافتن مناطق کارستی، منابع آبی مهم آن می‌باشد. به‌طور کلی آبخوان‌های کارستی دارای سه منطقه تغذیه، انتقال و تخلیه می‌باشند. مناطق تغذیه، به‌عنوان تأمین‌کننده ورودی آبخوان، نقش اساسی در چرخه هیدرولوژیکی آبخوان‌های کارستی دارند. با توجه به عدم یکسان بودن ژئومورفولوژی کارست سطحی و لندفرم‌ها، نوع و چگونگی تغذیه در آبخوان‌های کارستی متفاوت می‌باشد. وایت^۵ (۱۹۹۸) معتقد است که تغذیه آبخوان‌های کارستی به چهار حالت مختلف تغذیه خودزا^۶، تغذیه دگرزا^۷، رواناب درونی^۸ و تغذیه از طریق آبخوان‌های معلق صورت می‌گیرد. در مقابل فورد و ویلیامز (۲۰۰۷) معتقدند که به‌طور کلی سه نوع تغذیه خودزا، دگرزا و مخلوط در آبخوان‌های کارستی وجود دارد و تغذیه به‌صورت رواناب درونی و آب خروجی از آبخوان‌های معلق جزئی از دو حالت خودزا و دگرزا می‌باشند. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه تغذیه و نوع تغذیه تأثیر اساسی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان‌های کارستی دارند. فورد و ویلیامز معتقدند که تفاوت در نوع تغذیه منجر به تفاوت در ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، ویژگی‌های منطقه تغذیه در آبخوان‌های کارستی، نوع تغذیه، جریان و میزان آسیب‌پذیری آبخوان از آلودگی را کنترل می‌کند؛ بنابراین، شناخت مناطق تغذیه در آبخوان‌های کارستی نقش کلیدی در شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی آبخوان‌ها و همچنین مدیریت و بهره‌برداری علمی و بهینه از آن‌ها را دارد. امروزه نیاز به تأمین آب، برای رفع نیاز جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته است (گوندوی و همکاران^۹، ۲۰۱۱، ۲۴). آبخوان‌های کارستی یک منبع بارزش آب در مناطق وسیعی از جهان بوده که با کاهش کمیت و کیفیت آب آبخوان‌های آبرفتی، اهمیت آن‌ها به‌عنوان یک منبع استراتژیک دوچندان شده است (سیویتا، ۲۰۰۸؛ ۸۵۶). سابقه مطالعه تغذیه آب‌های زیرزمینی به اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط هیلی^{۱۰} (۲۰۱۰)، لرنر و همکاران^{۱۱} (۱۹۹۰)، شارما^{۱۲} (۱۹۸۹)، سیمرز^{۱۳} (۱۹۹۷) و رادویچ و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۰) برمی‌گردد.

مدل‌سازی مناطق تغذیه در آبخوان‌های کارستی یک موضوع جدید است که با پیشرفت GIS و RS توسط شابان و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۴)، هوگز و همکاران^۱ (۲۰۰۶) و رادولویس^۲ (۲۰۱۲) مورد توجه قرار گرفت. قبل از این مطالعات،

1 - Waltham et al

2 - Ford and Wiliamz

3 - Bakalowicz

4 - Milanović.P

5 - White

6 - autogenic

7 - allogenic

8 - Internal runoff

9 -Gondwe et al,

10 . Healy

11 . Lerner et al

12 . Sharma

13 . Simmers

14 -Radulovic et al

15 . Shaban et al

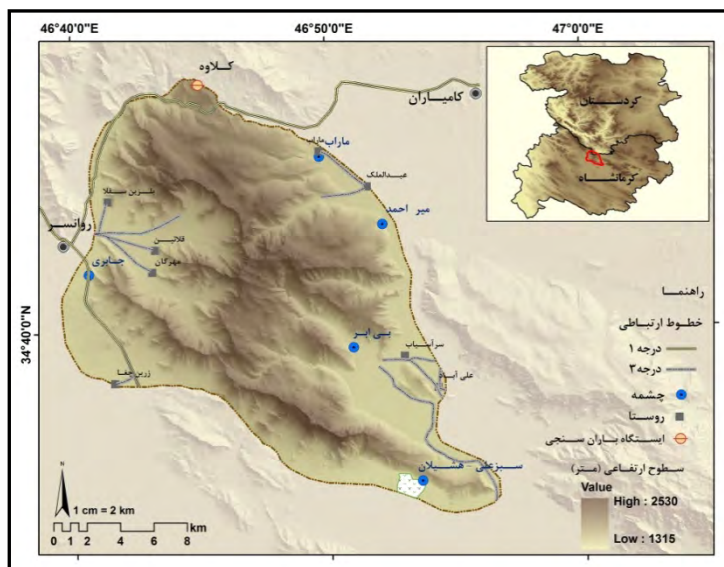
پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینه تغذیه آبخوان‌های کارستی در حیطه مباحث هیدرودینامیکی و تعیین نوع تغذیه و نوع جریان بوده و بر ویژگی‌های منطقه انتقالی آبخوان تأکید داشته‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مانگین^۳ (۱۹۸۴)، ساوتر^۴ (۱۹۹۲)، توچ و ساوتر^۵ (۱۹۹۸)، جونز^۶ (۲۰۰۱)، جوکیک^۷ (۲۰۰۸)، باور و همکاران^۸ (۲۰۰۵)، جیر و همکاران^۹ (۲۰۰۸)، جانزا^{۱۰} (۲۰۱۰) و سانتوس و آندرو^{۱۱} (۲۰۱۰) اشاره نمود.

امروزه مسائل و مشکلات مرتبط با تأمین آب و مدیریت آن، یک مسئله مهم در برنامه‌ریزی‌های عمرانی کشور است. منابع آب کارستی مهم‌ترین منبع تأمین آب در استان کرمانشاه می‌باشند. آبخوان کارستی خورین با آبدهی سالانه بیش از ۲۴ میلیون مترمکعب، تغذیه‌کننده تالاب هشیلان بوده و علاوه بر آن، جوامع محلی اطراف برای مقصد شرب و کشاورزی از آب این آبخوان استفاده می‌کنند. با توجه به توسعه‌یافتگی ژئومورفولوژی کارست، پوشش نازک خاک، پوشش گیاهی نسبتاً کم، تکتونیزه بودن منطقه و زمستانه بودن بارش در آبخوان خورین، میزان نفوذ آب در این آبخوان بالا می‌باشد؛ بنابراین با توجه به نقش مهم آبخوان کارستی خورین در تأمین آب جوامع محلی اطراف خود، مدل‌سازی و شناخت مناطق تغذیه آن جهت مدیریت بهینه به لحاظ کمی و کیفی، شناخت آلودگی، آسیب‌پذیری و ارزیابی ریسک آبخوان، نقش مهمی را در زمینه مدیریت بهینه و علمی این آبخوان دارد. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی مناطق تغذیه آبخوان خورین با استفاده از مدل KARSTLOP می‌باشد. این مدل توسط رادویچ و همکاران (۲۰۱۲) ارائه و در مناطق کارستی مونته‌نگرو مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج، حاکی از کارایی بالایی این مدل در تعیین مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی می‌باشد.

موقعیت آبخوان مورد مطالعه

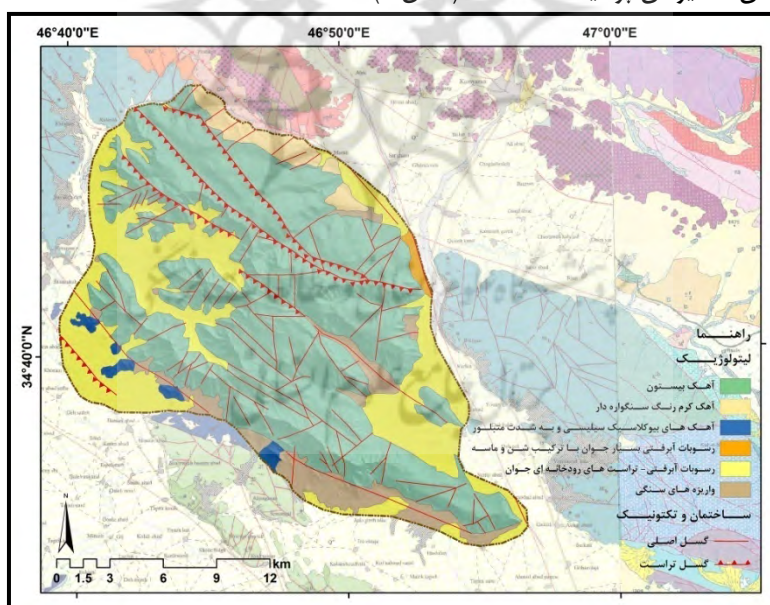
آبخوان خورین منطبق بر کوهستان خورین در ۳۶ کیلومتری غرب شهر کرمانشاه واقع شده و دسترسی به آن از طریق جاده کرمانشاه- کامیاران امکان‌پذیر می‌باشد. مساحت این آبخوان ۳۸۰/۴ کیلومترمربع می‌باشد که از این میزان، ۳۴ کیلومترمربع آن در قسمت شمالی کوهستان، واقع در قسمت جنوب غربی شهرستان کامیاران در استان کردستان می‌باشد. این کوهستان، با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق بین عرض‌های جغرافیایی 34°34' تا 34°48' شمالی و طول‌های جغرافیایی 46°39' تا 46°57' واقع شده است. ارتفاع حداکثر و حداقل آن، به ترتیب ۲۵۳۰ و ۱۳۱۵ متر از سطح دریا می‌باشد. این آبخوان در قسمت جنوب شرقی تاقدیس، توسط چشمه سبزی علی (هشیلان) تخلیه می‌گردد. به جز چشمه هشیلان، چشمه‌های ماراب، بی ابر، میراحمد و جابری نیز از این آبخوان تغذیه می‌شوند. لازم به ذکر است که معیار مرزبندی آبخوان در این پژوهش، کوهستان (توده) خورین بوده که دارای توده آهکی دوره کرتاسه می‌باشد (شکل ۱).

1. Hughes et al
2. Radulovic
3. Mangin
4. Sauter
5. Teutsch and Sauter
6. Jones
7. Jukic
8. Bauer et al
9. Geyer et al
10. Janza
11. Santos and Andreu



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

کوهستان خورین در زون زاگرس مرتفع واقع شده و به شدت تکتونیزه بوده و گسل‌های اصلی از نوع تراستی می‌باشد. ۶۳ درصد از مساحت کوهستان خورین از سازند کربناته بیستون با سن کرتاسه و ضخامتی در حدود ۱۵۰۰ متر تشکیل شده است. بیشتر حواشی خورین توسط آبرفت‌های جوان و تراورتن پوشیده شده و حواشی شمالی آن توسط سازند کربناته قم (OM^۱) با سن الیگوسن - میوسن پوشیده شده است (شکل ۲).



شکل ۲: زمین‌شناسی آبخوان خورین

اقلیم منطقه مورد مطالعه از نوع معتدل مدیترانه‌ای بوده و دارای دو فصل مشخص سرد و مرطوب و گرم و خشک می‌باشد. بر اساس آمار ایستگاه باران‌سنجی کلاره بیش از ۸۰٪ بارش منطقه در دوره سرد سال رخ می‌دهد. در ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متر بیشتر بارش‌های ماه‌های دی و بهمن به صورت برف بوده که نقش مهمی را در تغذیه آبخوان‌ها بر عهده دارد. جدول (۱) میانگین بارش و دمایی ۱۵ ساله ایستگاه کلاره را نشان می‌دهد.

جدول ۱: ویژگی‌های بارش و دمایی ایستگاه منتخب

میانگین دمای سالیانه (C)	میانگین بارش سالانه (mm)	ارتفاع (m)	ایستگاه باران‌سنجی
۱۱/۸	۶۳۵	۱۸۷۲	کلاوه

سازند کربناته بیستون به علت خلوص بالای آهک، ضخامت زیاد و تکتونیزه بودن، شرایط مناسبی را جهت توسعه ژئومورفولوژی کارست دارا می‌باشد. این عامل در ترکیب با عوامل تکتونیکی، اقلیمی و شرایط ژئومورفولوژیکی، باعث شکل‌گیری لندفرم‌های کارستی متنوع و توسعه‌یافتگی ژئومورفولوژی کارست در کوهستان خورین گردیده است. کارن (لاپیه) (شکل ۳، الف). غار (شکل ۳، ب) دولین (شکل ۳، ج)، جاما (شکل ۳، د)، شافت عمودی، پونور، اشکال برجی، دره‌های کارستی و پلژه‌ها (پولیه‌ها)، مهم‌ترین لندفرم‌های کارستی کوهستان خورین می‌باشند. لازم به ذکر است که به‌منظور شناسایی لندفرم‌های کارستی خورین از بازدیدهای میدانی بهره گرفته‌شده و علاوه بر آن نیز، فروچاله‌های کارستی با استفاده از روش Fillsink شناسایی گردیدند. بررسی نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در سطوح هموار رأس کوه خورین و در امتداد گسل‌ها، دولین و پلژه‌ها شکل گرفته‌اند. این نوع لندفرم‌ها، نقش اصلی را در تغذیه آبخوان مورد بررسی بر عهده‌دارند. تمامی چشمه‌های اطراف خورین بر اساس تقسیم بندی (فورد و ویلیامز؛ ۲۰۰۷) از نوع چشمه‌های سدی (گسلی) می‌باشند.



شکل ۳: لندفرم‌های کارستی کوه خورین؛ الف، کارن؛ ب، غار؛ ج، دولین؛ د، جاما

روش تحقیق

این پژوهش یک تحقیق توسعه‌ای- کاربردی مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی و مدل‌سازی KARSTLOP می‌باشد. در طی بازدیدهای میدانی، ژئومورفولوژی کارست سطحی منطقه شناسایی گردید. از روش Fillsink به‌منظور شناسایی فروچاله‌های کارستی استفاده و نتایج این روش با برداشت‌های میدانی دقت سنجی گردید. مدل KARSTLOP مخفف حروف اول هشت لایه K: فرایند کارست زایی (توسعه کارست)، A: شرایط جوی، R: رواناب، S: شیب، T: تکتونیک، L: سنگ‌شناسی، O: لایه پوشاننده، P: پوشش گیاهی می‌باشد. این مدل در محیط

نرم‌افزار GIS قابل اجرا بوده و قضاوت شخصی پژوهشگر در انتخاب پارامترهای تحلیلی و تعریف معیارهای ارزیابی و الگوریتم دخیل می‌باشد (رادویچ؛ ۲۰۰۹). لایه توسعه کارست (K) به‌عنوان مهم‌ترین لایه در مدل KARSTLOP مطرح بوده و تهیه آن نیازمند ترسیم نقشه ژئومورفولوژی کارست سطحی، محاسبات هیدرولوژیکی و محاسبه نمایه اشباع SI می‌باشد. لایه‌های شیب (S)، شرایط جوی (A) و رواناب (R) بر اساس Dem ده متر منطقه و بر اساس جدول (۲) تهیه شده و لایه‌های تکتونیک (T)، لیتولوژی (L) و بخشی از لایه پوشش سطحی (O) با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کامپاران تهیه گردید. بخش دیگری از لایه پوشش سطحی از نقشه خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ و لایه (P) از نقشه کاربری اراضی به دست آمد (جدول ۲). جهت تعیین منشأ کارستی بودن آب چشمه‌های تغذیه‌شده از آبخوان خورین، از بررسی‌های هیدروشیمیایی استفاده شده است. از داده‌های کمی و کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری سراب هشیلان، بی ابر، جابری، میراحمد و ماراب و داده‌های ایستگاه باران‌سنجی کلاوه برای محاسبات هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی و همچنین بررسی اقلیمی آبخوان مورد مطالعه بهره گرفته شده است. از بازدیدهای میدانی جهت شناسایی ژئومورفولوژی کارست سطحی و ثبت موقعیت لندفرم‌ها صورت گرفت. در نهایت پهنه‌بندی به‌دست‌آمده از مدل KARSTLOP با نقشه ژئومورفولوژی کوهستان خورین دقت‌سنجی گردید تا نقش لندفرم‌های کارستی در تغذیه آبخوان کارستی مورد ارزیابی قرار گیرد. از نرم‌افزار AqQA برای محاسبه تیپ آب آبخوان خورین، از نرم‌افزار PHREEQC به‌منظور محاسبه نسبت اشباع، از نرم‌افزار X6 Coreldraw برای ترسیم نقشه ژئومورفولوژی و از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 به‌منظور مدل‌سازی مدل مذکور استفاده شده است.

جدول ۲: نحوه محاسبه پارامترهای مدل KARSTLOP (منبع: رادویچ و همکاران، ۲۰۱۲)

K - KARSTIFICATION									
Area of degraded zone (karren fields, ruin-like relief etc.) per unit square (10 ⁶ m ² /km ²)		Ksf ₁	Area of karst depressions per unit square (10 ⁶ m ² /km ²)		Ksf ₂	Ksf = (Ksf ₁ + Ksf ₂)/2		K = $\frac{Ksf + Kss}{2}$	
<60	1		<25	1					
60-120	2		25-50	2					
120-180	3		50-75	3					
180-240	4		75-100	4					
>240	5		>100	5					
Q _{max} /Q _{min}	Kss ₁	V (cm/s)	Kss ₂	d > 4 km	d > 1-4 km	d < 1 km	Kss ₃	Kss = (Kss ₁ + Kss ₂ + Kss ₃)/3	
<5	1	<0.1	1	>0.3	>0	>-0.3	1	1	
5-50	2	0.1-1	2	0-0.3	-0.3-0	-0.6-0.3	2	>1-2	
5-100	3	1-10	3	-0.3-0	-0.6-0.3	-0.9-0.6	3	>2-3	
>100	4	>10	4	<-0.3	<-0.6	<-0.9	4	>3-4	
200 m buffer on each side of speleologically explored objects (caves, pits and swallow holes)									
A - ATMOSPHERIC CONDITIONS					R - RUNOFF				
Altitude (m)		A ₁	Reflectance value		A ₂	Surface within the catchment area of referred spring		R	
<300	1		>0.5	1	A = $\frac{A_1 + A_2}{2}$	200 m buffer on both sides of perennial streams formed by discharge at contact of karstified limestone or dolomite with inert compact carbonates sections	1		
300-800	2		<0.5	5		200 m buffer on both sides of perennial streams formed at the edge of karst depressions (pools, vults etc.), as well as around perennial streams which run from non-karstic terrain etc.	3		
800-1500	3					Remaining of catchment area	5		
1500-1800	4								
>1800	5								
S - SLOPE			T - TECTONICS			L - LITHOLOGY			
Slope (°)		S	Lengths of faults (km/km ²)		Tf	Dip angle of strata (°)		Td	
0-5	5		0-1	1		<30	1	Carbonate rocks	
5-15	4		1-2	2		30-60	3	Limestone	
15-25	3		2-3	3		>60	5	Dolomite	
25-35	2		3-4	4				Bedding	
>35	1		>4	5				Massive, Thickly bedded	
								Bedded	
								Laminated, Thinly laminated	
								Mineralogical-petrographic ingredients	
								Calclified	
								Dolomitic	
								Sandy, Silified	
								Matty, Clayrah, Bituminous	
								L = a x b x c	
								P - PLANTS	
								Plants	
								Bare rocks	
								Sparsely vegetated areas	
								Pastures	
								Transitional woodlands-scrub	
								Forests	
Recharge = 4xK + A + 4xR + 2xS + T + 4xL + 3xO + P									

بحث و یافته‌ها

ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی آبخوان مورد مطالعه

نوع تغذیه آبخوان مورد مطالعه، به سبب عدم رخنمون سازندهای دیگر در سطح تاقدیس و جاری نشدن آب از سطح سازندهای غیر کارستی، از نوع خودزا است. گلدشایر و درثو^۱ (۲۰۰۴) معتقدند که در سنگ‌های کربناته کارستی شده بدون پوشش گیاهی و با تغذیه خودزا بیش از ۸۰٪ آب ورودی می‌تواند نفوذ کند. در آبخوان خورین، تغذیه منتشر از طریق درزه و شکاف‌ها و کارن‌ها و تغذیه متمرکز از طریق دولین‌ها، پونورها، جاماها، کارن فیله‌ها و شافت‌ها انجام می‌گیرد. ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه‌ها در دوره آماری مورد مطالعه در جدول ۳ و ویژگی‌های هیدروشیمیایی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های هیدرولوژیکی (آبدهی حداقل و حداکثر) چشمه‌های مورد مطالعه (سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹)

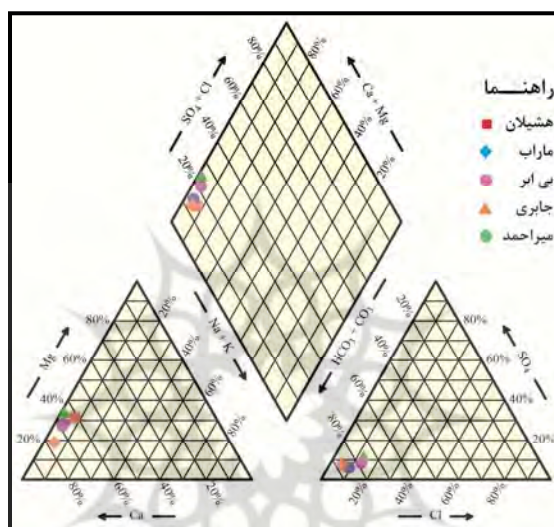
چشمه	Qmen(l/s)	Qmax(l/s)	Qmin(l/s)	Qmax/Qmin
سبز علی (هشیلان)	۷۵	۱۱۸	۱۷	۷
جابری	۱۰۱	۳۶۸	۴۴	۸
میراحمد	۲۴۶	۴۲۱	۵۸	۷
بی ابر	۱۰۰	۳۵۶	۳۹	۹
ماراب (کامیاران)	۲۳۱	۵۶۱	۷۸	۷

جدول ۴. ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه (۱۳۸۵/۸/۱۸)

چشمه	Na	Mg	Ca	Cl	So ₄	Hco ₃	K	Ca/Mg	PH	Ec	TDS
سبز علی (هشیلان)	۰/۲۵	۰/۶۲	۲	۰/۱۵	۰/۱۴	۳/۵	۰/۰۱	۳/۲۲	۷/۷	۲۹۰	۱۸۳
جابری	۰/۴۹	۰/۶۱	۲/۵	۰/۳۴	۰/۳۰	۲/۹	۰/۰۲	۴/۱	۸	۳۶۶	۲۳۴
میراحمد	۰/۳۷	۰/۶۳	۲/۷	۰/۴۷	۰/۴۳	۲/۲	۰/۰۱۲	۴/۲۸	۷/۹	۳۷۵	۲۴۰
بی ابر	۰/۱۴	۰/۶۲	۲/۳	۰/۲۳	۰/۱۲	۲/۹	۰/۰۱	۳/۷	۷/۵	۳۳۶	۲۱۵
ماراب (کامیاران)	۰/۱۵	۰/۵۶	۲/۱	۰/۲	۰/۱۶	۲/۳۵	۰/۰۲۱	۳/۷۵	۷/۶	۲۷۹	۱۷۶

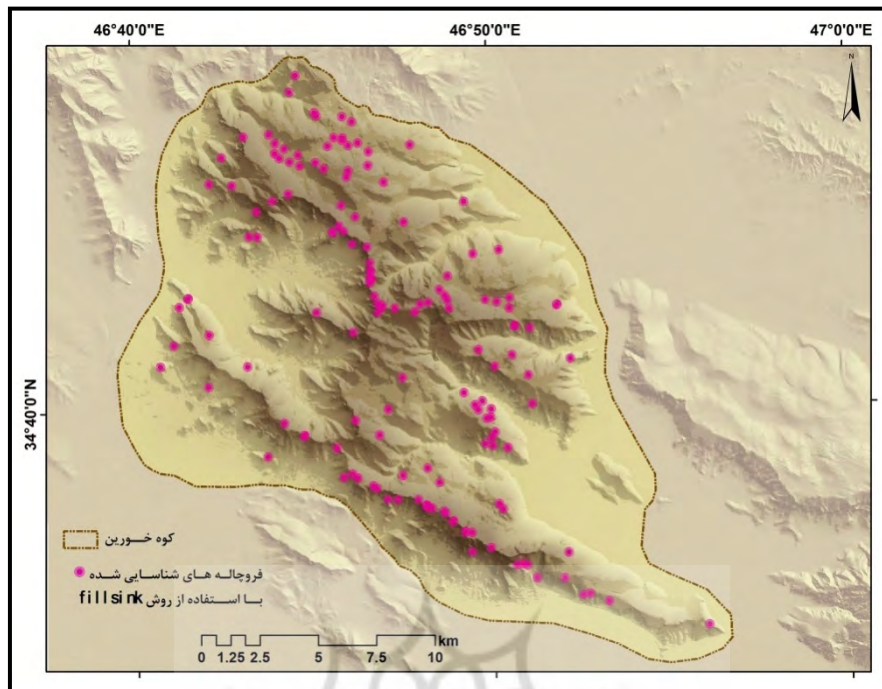
حداکثر دبی چشمه‌های مورد مطالعه، به ترتیب در اردیبهشت و حداقل دبی آن‌ها در شهریورماه مشاهده می‌شود. معمولاً مقدار هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی کمتر از ۵۰۰ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) به دست می‌آید. میزان EC چشمه‌های مورد مطالعه کمتر از ۳۷۶ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) بوده و از دید آنیونی، یون بی‌کربنات در چشمه‌ها غالب و تیپ آب آن‌ها بی‌کربنات Ca-Mg-HCO_3 است. به لحاظ کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و بعد از آن منیزیم بوده و آب چشمه، رخساره کلسیک و

مینزیک دارد. توالی آنیونی چشمه‌ها $SO_4 > Cl > HCO_3$ دارد (شکل ۴). نمودار پایپر چشمه‌های مورد مطالعه در ناحیه چپ نمودار پایپر قرار می‌گیرند که حاکی از تیپ بی کربناته و بالا بودن قلیایی‌های دو ظرفیتی کلسیم - منیزیم در آب چشمه‌هاست و این امر تأییدکننده منشأ کارستی چشمه‌های مورد مطالعه و تأمین آب آن‌ها از ارتفاعات کربناته حوضه مورد مطالعه می‌باشد. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چشمه تأییدکننده منشأ کارستی چشمه‌ها می‌باشند. افزایش غلظت Mg یا کاهش نسبت مولار Ca/Mg ، نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند تغذیه‌کننده چشمه است که مقدار این نسبت در چشمه‌های مورد مطالعه بیشتر از $3/2$ است این امر حاکی از زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس‌کننده سنگ‌آهک در منطقه تغذیه چشمه‌ها است.



شکل ۴: نمودار پایپر چشمه‌های مورد مطالعه

Fillsink: این روش بر اساس روش تفاضل DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS و با استفاده از ابزار Archydro انجام می‌گیرد. این روش شامل دو مرحله بوده و در مرحله اول DEM اصلاح‌نشده با استفاده از الگوریتم Fillsink اصلاح می‌گردد. در این مرحله نقطه و یا مجموعه از نقاط مجاور که توسط نقاط مجاور با ارتفاع بالاتر محصور شده‌اند، شناسایی می‌گردند. در مرحله دوم به منظور استخراج فروچاله‌ها و عمق فرورفتگی در مناطق یادشده، DEM اصلاح‌شده از DEM اصلی تفریق می‌شود و نتیجه آن نقشه فروچاله‌های کارستی منطقه می‌باشد. این روش همه چاله‌های بسته در DEM را مشخص کرده و به علت خطاهای موجود در DEM، فروچاله‌های کاذب را نیز شناسایی می‌کند، بنابراین نیازمند دقت سنجی می‌باشد. در این پژوهش از بازبینی میدانی جهت دقت سنجی فروچاله‌های استخراج‌شده استفاده گردیده است. شکل ۵ نقشه فروچاله‌های استخراج‌شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این قسمت از DEM 10m به منظور انجام این روش بهره گرفته شده است.



شکل ۵: فروچاله‌های کارستی شناسایی شده با استفاده از روش Fillsink

مدل KARSTLOP

• فرایند کارست زایی (K)

نقشه کارستیفیکاسیون^۱ (شکل ۷ و جدول ۲) از دو زیر پارامتر کارست سطحی (ksf) و کارست زیرسطحی (kss) به دست می‌آید. (شکل ۶) کارستیفیکاسیون سطحی (ksf) بر اساس ویژگی‌های کارست منطقه و لندفرم‌های کارستی، به دو زیر فاکتور Ksf1 (کارن فیلدها و درزه و شکاف‌ها) و Ksf2 (فروچاله‌های کارستی) تقسیم شده است. کارن به‌عنوان مناطق کمتر توسعه یافته کارست سطحی، در دامنه‌های پرشیب رخمون یافته و در امتداد آن‌ها تغذیه به صورت منتشر می‌باشد، در حالی که در امتداد دولین، پلزه، دره‌های کور، جاما و پونورها عمدتاً تغذیه به صورت متمرکز صورت می‌گیرد. به منظور تهیه نقشه کارستیفیکاسیون سطحی، از معیار تراکم در واحد سطح استفاده می‌شود (جدول ۲). از ادغام این دو نقشه، نقشه کارستیفیکاسیون سطحی (Ksf) به دست می‌آید.

بررسی کارستیفیکاسیون زیرسطحی منطقه (Kss) بر اساس مراحل زیر صورت می‌پذیرد:

به منظور برآورد (Kss1)، دامنه نوسانات دبی چشمه‌های کارستی حوضه توسط معادله Q_{max}/Q_{min} آنالیز می‌گردد. (Kss2) توسط سرعت متوسط جریان بر مبنای سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. در این پژوهش سرعت متوسط آب با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، ۷ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است. درجه اشباع کلسیت آب چشمه (SI) که بستگی به طول متوسط (d) مسیر آب‌های زیرزمینی به کیلومتر دارد، منجر به محاسبه (Kss3) می‌شود. با توجه به وسعت زیاد آبخوان خورین، میزان شاخص d بیش از ۴ کیلومتر در نظر گرفته شد. شاخص اشباع کلسیت چشمه‌های هشیلان، جابری، میر احمد، بی ابر و ماراب در طی فصل‌تر به ترتیب $-0/21$ ، $-0/18$ ، $-0/22$ ، $-0/29$ و $-0/26$ می‌باشد. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC و برای داده‌های اردیبهشت‌ماه ۸۹ محاسبه شده‌اند. نتایج شاخص اشباع کلسیت، حاکی از ماندگاری کم آب در آبخوان و وجود جریان مجرای در آبخوان خورین می‌باشد. در نهایت کارست زیرسطحی (Kss) بر مبنای میانگین $Kss1+Kss2+Kss3/3$ محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است برای تهیه نقشه

¹ - Karstification

کارست زیرسطحی از ۲۰۰ متر بافر (حریم) در اطراف غارها، چاله‌های بسته و حفره‌های بلع استفاده شده است. نقشه نهایی درجه کارستی شدن از روی هم قرارگیری لایه‌های کارست سطحی و کارست زیرسطحی بر مبنای معادله (۱) محاسبه گردید. نقشه فاکتور نهایی K بر اساس جدول (۲) به ۵ طبقه تقسیم شده و نقشه نهایی این عامل در آبخوان مورد مطالعه دارای مقادیری بین ۱/۹ تا ۳/۴ می‌باشد. مقادیر حداکثر، منطبق بر مناطق هموار واقع در رأس تاقدیس و مناطق توسعه یافته کارستی می‌باشد (شکل ۷).

$$\text{معادله ۱: } K \frac{K_{sf} + K_{ss}}{2}$$

• شرایط جوی (A)

در این پارامتر، مقدار تغذیه در درجه اول از طریق متغیر تبخیر و تعرق تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شرایط دما و بارش را می‌توان به طور غیرمستقیم به عنوان یک تابع از ارتفاع (A1) در نظر گرفت. با افزایش ارتفاع، میزان دما کمتر شده که این امر باعث کاهش میزان تبخیر و تعرق می‌شود و بالعکس. افزایش ارتفاع منجر به افزایش بارش شده در نتیجه ورودی و تغذیه آبخوان بیشتر می‌گردد. شدت تابش خورشیدی (A2) و جهات دامنه نیز مقدار تبخیر و تعرق و تغذیه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دامنه‌های جنوبی تابش بیشتری از خورشید را دریافت نموده و بیشترین امتیاز از پارامتر (A2) را به خود اختصاص می‌دهند، در حالی که منطقه پشت به آفتاب (دامنه‌های شمالی) مقدار کمتری از تابش خورشید را بخصوص در فصل تابستان دریافت می‌کند. با بهره‌گیری از Dem ده متر منطقه مورد بررسی، میزان دریافت تابش امتیاز بندی گردیده و در نهایت با بهره‌گیری از معادله (۲)، پارامتر A محاسبه می‌گردد. بر اساس شکل (۷) به ترتیب دامنه‌های رو به شمال و رو به جنوب بیشترین و کمترین امتیاز را در این عامل به خود اختصاص داده‌اند.

$$\text{معادله ۲: } A = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

• رواناب (R)

در مناطقی کارستی، میزان نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، شیب و میزان بارندگی از پارامترهای بسیار مؤثر در میزان رواناب حوضه‌های کارستی می‌باشند. در اینجا بدون توجه به نفوذپذیری، میزان تداوم جریان مدنظر قرار می‌گیرد؛ زیرا جریان دائمی ممکن است مناطق گسترده‌ای در امتداد بستر رودخانه که شامل سنگ‌های نفوذناپذیرتر از سنگ‌آهک و دولومیت باشد را نشان دهد و ممکن است هدایت هیدرولیکی کمتر از پوشش خاک یا زمین‌شناسی باشد؛ بنابراین بر اساس حضور رواناب سطحی، پهناهای کارستی به سه دسته تقسیم می‌شود (جدول ۲).

- حریم ۲۰۰ متری در دو طرف جریان دائمی شکل گرفته شده به وسیله دبی

- حریم ۲۰۰ متری در هر دو طرف جریان‌های دائمی در اطراف چاله‌های بسته و پلزه‌ها، همچنین در اطراف جریان‌های دائمی که از زمین‌های غیر کارستی می‌گذرند.

- قسمت‌های باقی مانده در حوضه آبریز

با توجه به نبود جریان دائمی در منطقه مورد مطالعه تمامی سطح منطقه دارای امتیاز ۵ می‌باشد (شکل ۵).

• شیب (S)

همان‌طور که در قسمت رواناب نیز اشاره گردید، شیب از عوامل بسیار مهمی است که باعث شکل‌گیری رواناب شده و تعیین‌کننده میزان تبدیل آب بارش به جریان سطحی است. شیب‌های کم برای نفوذ مناسب‌تر بوده، زیرا افزایش شیب باعث کاهش تغذیه آبخوان می‌گردد. نحوه محاسبه این پارامتر در جدول شماره ۲ آمده است. لازم به ذکر است که این

پارامتر نیز به وسیله Dem ده متر منطقه قابل محاسبه است. میزان امتیاز دریافتی در این پارامتر نسبت عکس با میزان شیب دارد. مناطق هموار رأس کوه خورین به علت شیب کم بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده و مناطق پرشیب در دامنه‌ها کمترین امتیاز را دارا می‌باشند. بر این مبنا پارامتر شیب به ۵ طبقه تقسیم می‌گردد (شکل ۶).

• تکتونیک (T)

این پارامتر، از دو زیر پارامتر تراکم گسل (طول گسل‌ها، کیلومتر در هر واحد سطح به کیلومتر مربع) (Tf) و شیب لایه‌های زمین‌شناسی به درجه (Td) محاسبه می‌گردد. مقدار تغذیه به‌طور قابل توجهی به درجه شکستگی سنگ بستگی دارد که معمولاً در مناطق گسل خورده این ضریب افزایش پیدا می‌کند (شکل ۶). Td یکی از عواملی است که ممکن است نفوذ آب و تغذیه آبخوان را تحت تأثیر قرار دهد. لایه‌های چینه‌شناسی افقی نقش کمتری در نفوذ آب دارند، اما لایه‌های با شیب زیاد به علت وجود شکاف‌های بین لایه‌ای نقش مهمی در نفوذ آب دارند (رادویچ و همکاران، ۲۰۱۲). این لایه از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه به دست می‌آید (شکل ۷). تداخل این دو زیر فاکتور از طریق معادله (۳)، نقشه نهایی تکتونیک را به دست می‌دهد (شکل ۶ و جدول ۲).

$$T = \frac{Tf+Td}{2} \quad \text{معادله ۳}$$

بر اساس شکل شماره ۶، در آبخوان مورد مطالعه در امتداد گسل‌ها، امکان نفوذ بیشتر بوده و این مناطق بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند، در حالی که کمترین امتیاز مربوط به مناطق دور از گسل‌ها و درزه و شکاف‌ها می‌باشد.

• سنگ‌شناسی (L)

ترکیب سنگ‌شناسی به‌طور مستقیم نفوذپذیری و در نتیجه میزان تغذیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای سنگ‌آهک و دولومیت زیر فاکتورهای زیر در نظر گرفته می‌شود: نوع سنگ کربناته (زیر فاکتور a)، لایه زیرین (زیر فاکتور b) و ترکیب پتروگرافی و کانی‌شناسی سنگ کربناته (زیر فاکتور c) (شکل ۶). دولومیت معمولاً به‌عنوان سنگ با نفوذپذیری و انحلال‌پذیری کمتر نسبت به سنگ‌آهک در نظر گرفته می‌شود و شکستگی‌های زیرسطحی آن کمتر از سنگ‌آهک گسترش می‌یابند؛ بنابراین ارزش نسبی زیر فاکتور برای سنگ‌آهک ۱ و برای دولومیت ۰/۷ است. زیر فاکتور b بر اساس ضخامت و میزان شکستگی امتیازبندی می‌شود. سنگ‌آهک و دولومیت به‌ندرت به‌صورت خالص وجود دارند. آن‌ها اغلب حاوی ترکیبات مختلف از کانی‌های دیگر مانند سنگ‌آهک یا دولومیت مارنی، شیلی، ماسه‌ای چرت و... می‌باشند. نفوذپذیری سنگ کربناته اگر حاوی کانی‌های مختلف باشد، کم می‌شود؛ بنابراین ارزش زیر فاکتور c بر اساس وجود این ناخالصی‌ها در نظر گرفته می‌شود که بر روی کاهش نفوذ تأثیر دارند. از نقشه زمین‌شناسی برای به دست آوردن زیر فاکتورها استفاده و فاکتور L از ضرب سه زیر فاکتور محاسبه می‌شود (معادله ۴ و شکل ۷).

$$L = a \times b \times c \quad \text{معادله ۴}$$

در منطقه مورد مطالعه سازند بیستون که بیشترین مساحت منطقه را نیز در بر گرفته است، یک سازند توده‌ای شکسته بوده و جنس آن از نوع آهک می‌باشد و به این خاطر بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است.

• لایه پوشاننده (O)

نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی مبنای شکل‌گیری این لایه می‌باشند. لایه پوشاننده (O₁) عمدتاً به دلیل ایجاد یک مانع در نفوذ آب سطحی به آبخوان که می‌تواند توسط یک لایه خاک در اپی کارست باشد، نقش مهمی در کاهش پتانسیل تغذیه دارد. در صورت ضخیم بودن لایه خاک و کم بودن خواص هیدرولیکی، نفوذ کندتر و تبخیر و تعرق بیشتر خواهد بود. رتبه‌بندی خاک، بر اساس نوع خاک و ضخامت آن انجام می‌گیرد (جدول ۲). پوشش زمین‌شناسی (O₂) شامل رسوبات نهشته‌ای است که بر روی سازندهای کربناته قرار گرفته‌اند. این پارامتر، به‌وسیله سنگ‌ریزه (توده‌های سنگی سقوط کرده)، آبرفت، کوه رفت، مورن، رسوبات یخچالی رودخانه‌ای و رسوبات دیگر مشخص می‌گردد.

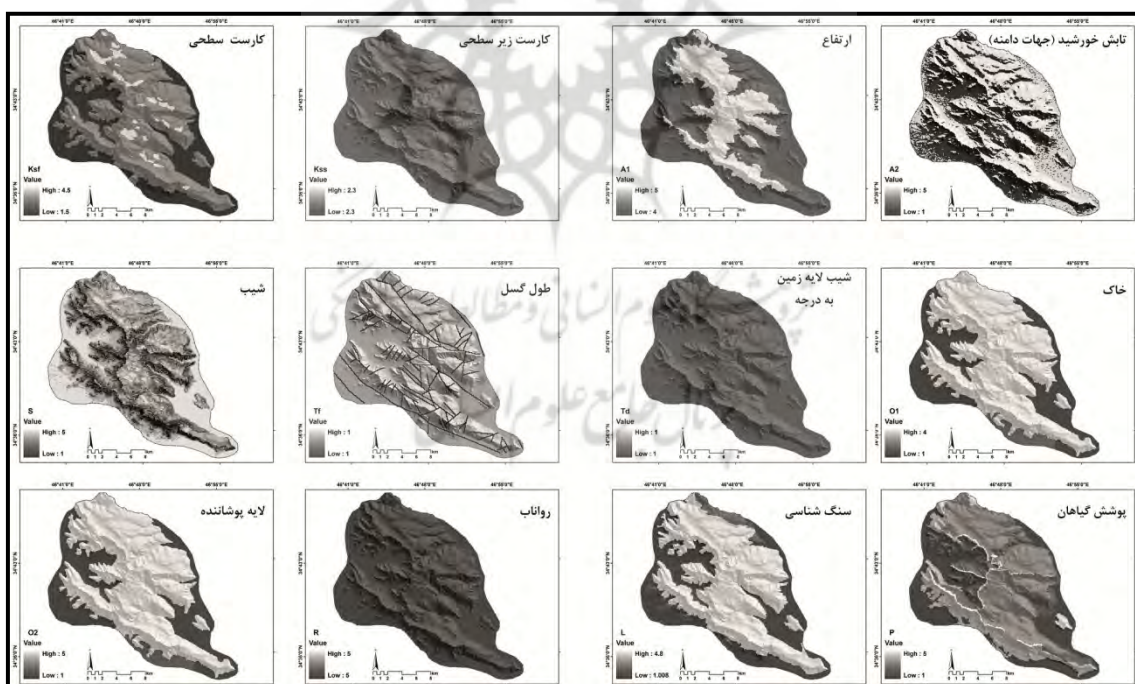
نقشه نهایی لایه‌های پوشاننده از تداخل دو فاکتور بالا و از طریق معادله (۵) محاسبه شده و در شکل ۷ مشاهده می‌گردد.

$$O = \frac{O_1 + O_2}{2} \quad \text{معادله ۵:}$$

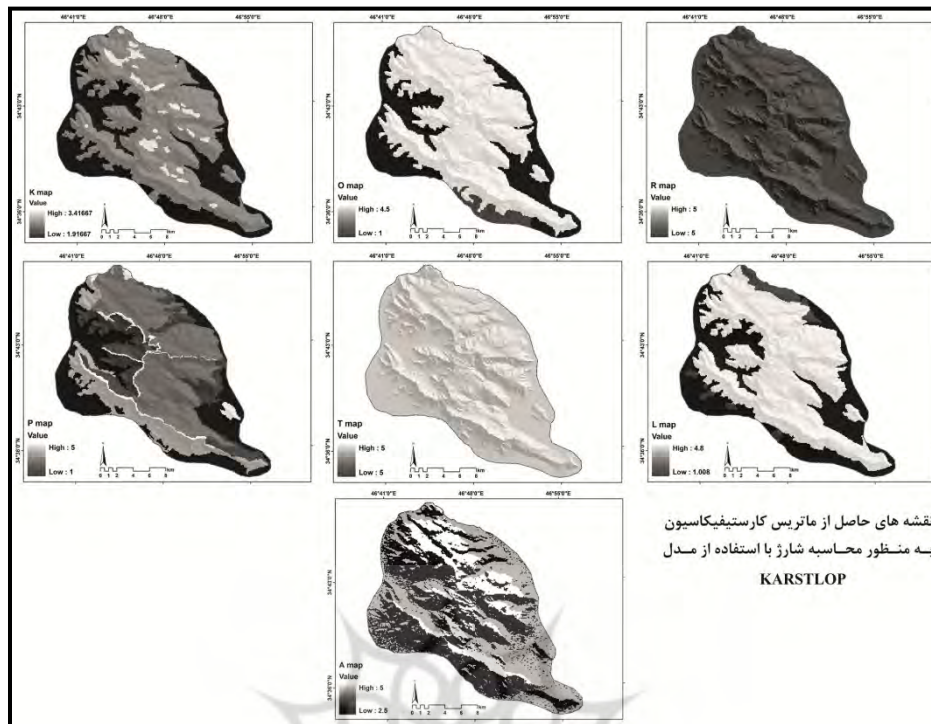
همان‌طور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود، خاک‌های کم‌عمق شکل گرفته شده بر روی نواحی مرتفع و صخره‌ای به دلیل ایجاد شرایط مناسب به منظور نفوذ سریع‌تر، بیشترین امتیاز و خاک‌های دامنه‌ای و آبرفتی به دلیل ضخیم بودن خاک و نفوذ کمتر، کمترین امتیاز را دارا می‌باشند.

• گیاهان (P)

گیاهان نیز بر میزان تغذیه مناطق کارستی بی‌تأثیر نیستند. وجود گیاهان در این مناطق، باعث افزایش تبخیر و تعرق و کاهش مقدار نفوذ آب به زمین می‌گردد. در دسته‌بندی گیاهان بر مبنای جدول ۲ توسعه سیستم ریشه و انشعاب شاخه‌ها نیز در نظر گرفته شده است. در این جدول پوشش گیاهی به ۵ دسته طبقه‌بندی گردیده است. در منطقه مورد بررسی، بیرون زدگی‌های سنگی و مراتع با تراکم کم که منطبق با دشت‌های آبرفتی می‌باشند، به دلیل کم بودن میزان پوشش آن‌ها و افزایش نفوذ آب، بیشترین امتیاز را داشته و بعد از آن مراتع نیمه متراکم منطبق بر رأس ناهمواری و مراتع متراکم جای می‌گیرند (شکل ۷).



شکل ۶: زیر پارامترهای مؤثر در کارستیفیکاسیون



شکل ۷: نقشه‌های حاصل از ماتریس کارستیفیکاسیون

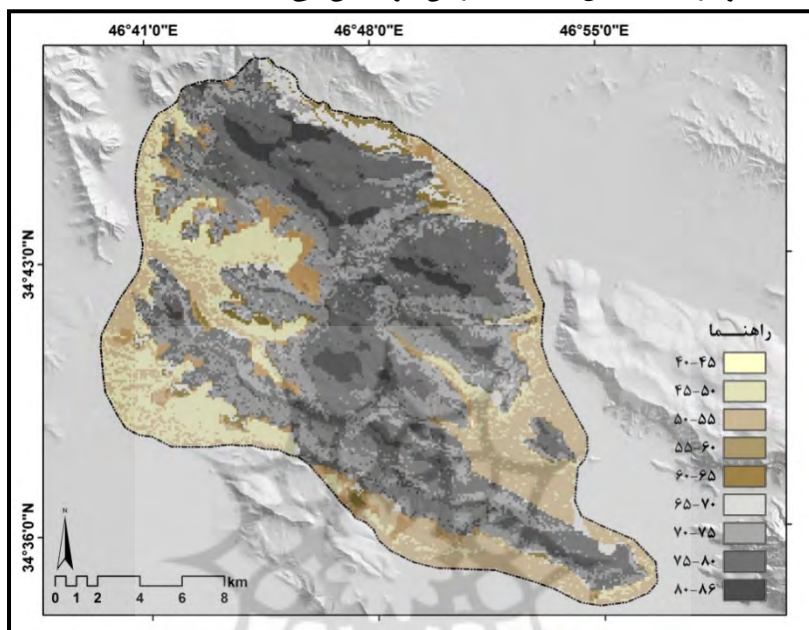
پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه

با بررسی پارامترهای ذکر شده و محاسبه میزان آن‌ها، نقشه نهایی تغذیه آبخوان با استفاده از معادله (۶) تهیه می‌گردد. نقشه نهایی تغذیه نشانگر توزیع مکانی تغذیه متوسط سالانه (R_{ch}) بوده و میزان تغذیه به (%) بیان می‌گردد.

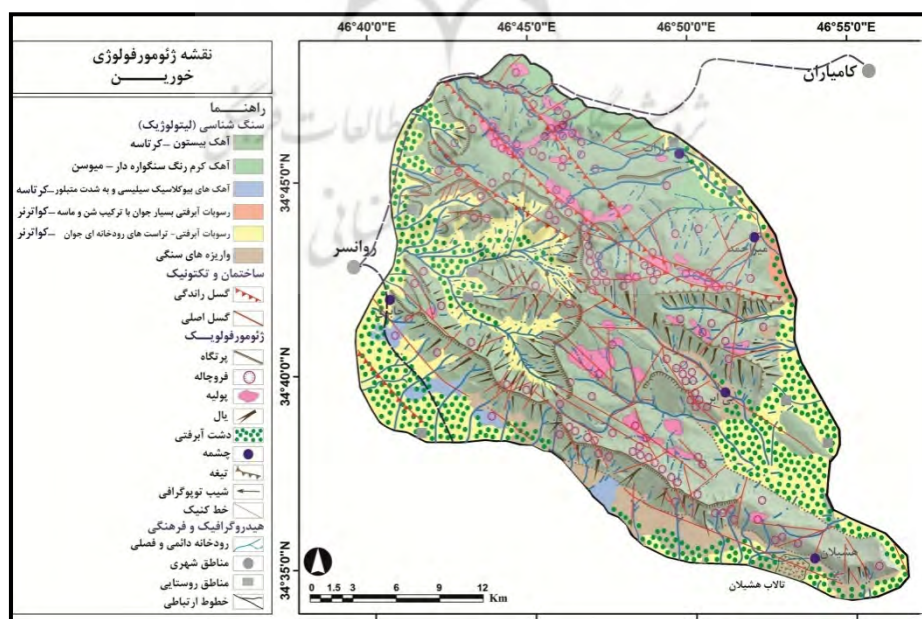
$$\text{معادله ۶: } R_{ch} = 4 \times K + A + 4 \times R + 2 \times S + T + 4 \times L + 3 \times O + P$$

بررسی معادله ۶ نشان می‌دهد که به پارامترهای کارستیفیکاسیون، رواناب و سنگ‌شناسی بیشترین امتیاز اختصاص داده شده است؛ زیرا این عوامل نقش اصلی را در تغذیه آبخوان‌های کارستی بر عهده دارند. بررسی نقشه نهایی تغذیه (شکل ۸) و ژئومورفولوژی سطحی کارست (شکل ۹) نشان می‌دهد که میزان تغذیه سالانه به دست آمده برای آبخوان کارستی خوربین بین ۴۰ تا ۸۶ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به پارامترهای ۸ گانه، بین ۴۰ تا ۸۰٪ بارش ورودی سالانه تبدیل به تغذیه شده و مابقی آن از دسترس خارج می‌گردد. بیشترین میزان تغذیه در نواحی با بیش از ۸۰٪ تغذیه، منطبق بر سطح هموار پلزه‌ها که دارای دولین می‌باشند، رخ داده و کمترین میزان تغذیه ۴۰ تا ۴۵٪ و ۴۵ تا ۵۰٪ نیز در دشت‌های آبرفتی روی می‌دهد. در سطح دشت‌های اطراف کوه خوربین میزان تغذیه بین ۴۵ تا ۵۰٪ و ۵۰ تا ۵۵٪ می‌باشد. این مناطق مجموعاً بیش از ۲۹٪ مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق منطبق بر نهشته‌های کواترنری می‌باشند. مناطق با تغذیه بین ۵۵ تا ۶۰٪، ۶۰ تا ۶۵٪ و ۶۵ تا ۷۰٪ به صورت مناطق پراکنده در حواشی کوه خوربین و منطبق بر سازندهای آهک کرم‌رنگ و آهک بیوکلاستیک و نهشته‌های کواترنری و واریزه‌های سنگی می‌باشند. این مناطق مجموعاً بیش از ۱۰٪ مساحت خوربین را به خود اختصاص داده‌اند. مناطقی با تغذیه بین ۷۰ تا ۷۵٪ دامنه‌های خرده شده با درزه و شکاف‌های زیاد کوهستان خوربین را به خود اختصاص داده‌اند. این دامنه‌ها علیرغم شیب نسبتاً زیاد، به شدت خرده شده و اغلب به صورت رخنمون‌های سنگی درزه و شکاف دار می‌باشد. همچنین خاک این دامنه‌ها کم ضخامت و پوشش گیاهی آن تنک و به این علت میزان نفوذ در این مناطق زیاد می‌باشد. این منطقه منطبق بر سازند بیستون بوده و بیش از ۲۳٪ مساحت خوربین را به خود اختصاص داده است. نواحی با تغذیه بین ۷۵ تا ۸۰٪ منطبق بر رأس کوه خوربین بوده و بیش از ۳۲٪ مساحت منطقه مورد مطالعه را در برمی‌گیرند. شیب این نواحی کم، خاک

آن‌ها کم ضخامت و درشت‌دانه، پوشش گیاهی تنک و ژئومورفولوژی کارست توسعه‌یافته و منطبق بر سازند بیستون و به‌شدت تکتونیزه می‌باشد. وجود دولین و پونورها و امکان تغذیه متمرکز از طریق آن‌ها، نقش بسیار مهمی در بالا بودن میزان تغذیه در این نواحی دارا می‌باشد. نواحی با تغذیه بین ۸۰ تا ۸۶٪ منطبق بر پلژه های رأس کوه خورین می‌باشند (جدول ۵) و (شکل ۹). این نواحی دارای شیب بسیار کم، خاک کم ضخامت، پوشش گیاهی تنک، ژئومورفولوژی کارست سطحی بسیار توسعه‌یافته و در امتداد گسل‌های متعدد رأس کوهستان می‌باشد.



شکل ۸: نقشه نهایی توزیع فضایی تغذیه با استفاده از مدل KARSTLOP در خورین



شکل ۹: نقشه ژئومورفولوژی خورین

جدول ۵: مساحت و درصد مساحت پهنه‌های توزیع تغذیه سالیانه توسط مدل KARSTLOP

ردیف	تغذیه (%)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۱	۴۰-۴۵	۰/۵۰	۰/۱۴
۲	۴۵-۵۰	۴۵/۰۱	۱۱/۹۲
۳	۵۰-۵۵	۶۵/۰۸	۱۷/۲۳
۴	۵۵-۶۰	۱۴/۲۷	۳/۷۷
۵	۶۰-۶۵	۸/۸۰	۲/۳۲
۶	۶۵-۷۰	۱۵/۲۰	۴/۰۲۳
۷	۷۰-۷۵	۸۹/۱۲	۲۳/۵۸
۸	۷۵-۸۰	۱۲۱/۷۷	۳۲/۲۲
۹	۸۰-۸۶	۱۸/۱۲	۴/۷۹
	جمع	۳۸۰/۴	۱۰۰

نتیجه‌گیری

مدل KARSTLOP به منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه در مناطق کارستی ارائه شده و علیرغم در نظر گرفتن شرایط محیطی، تأکید بیشتری بر روی سیستم کارستی، رواناب، سنگ‌شناسی و لایه پوشاننده آبخوان دارد. کوهستان خورین در زاگرس مرتفع واقع شده و به علت مهیا بودن شرایط مناسب کارست زایی دارای ژئومورفولوژی کارست توسعه یافته می‌باشد. این امر سبب ایجاد آبخوان کارستی در این کوهستان شده که نقش مهمی در تأمین آب مناطق اطراف کوه دارد. بررسی ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چشمه‌های خروجی از آبخوان خورین، حاکی از منشأ کارستی آن‌ها بوده و چشمه‌ها دارای تیپ آب بی کربناته بوده و سازند تغذیه‌کننده آن‌ها بر اساس نسبت Ca/Mg، سازندهای آهکی می‌باشد. علاوه بر ژئومورفولوژی کارست توسعه یافته، خاک کم ضخامت و درشت‌دانه، پوشش گیاهی نسبتاً تنک، رخنمون‌های سنگی شکسته، تکتونیزه بودن منطقه و درزه و شکاف‌های زیاد، رخنمون سازند کربناته بیستون در بیش از ۶۰ درصد از منطقه، دمای کم و بارش جامد در نواحی مرتفع خورین، باعث ایجاد شرایط مساعد جهت نفوذ نزولات جوی شده است. کوه خورین دارای لندفرم‌های کارستی متنوعی همچون پلژه‌ها، دره کارستی، دولین، پونور، جاما، شافت و انواع کارن‌ها می‌باشد. تغذیه آبخوان خورین خودزا بوده و نوع لندفرم‌ها سبب به وجود آمدن دو نوع تغذیه متمرکز و منتشر در آبخوان شده است. بدیهی است که در نواحی که تغذیه متمرکز می‌باشد، بیشتر آب ورودی صرف تغذیه آبخوان می‌شود. در واقع میزان تغذیه آبخوان‌های کارستی وابسته به ژئومورفولوژی کارست سطحی می‌باشد. نقشه نهایی پهنه‌بندی آبخوان خورین به لحاظ تغذیه نشان می‌دهد که ۶۱٪ از مساحت آبخوان دارای میزان تغذیه بیش از ۷۰٪ و ۸۸٪ از مساحت آبخوان دارای میزان تغذیه بیش از ۵۰٪ می‌باشد. این امر نشانگر میزان نفوذپذیری بالای آبخوان خورین می‌باشد. بررسی نقشه پهنه‌بندی نهایی حاصل از مدل KARSTLOP و تطابق آن با نقشه ژئومورفولوژی منطقه، حاکی از نقش اصلی ژئومورفولوژی کارست کوه خورین در توزیع مکانی مقادیر تغذیه در آبخوان می‌باشد. به عبارت دیگر مناطق با میزان تغذیه کمتر از ۵۰٪ منطبق بر نواحی اطراف کوهستان می‌باشند که کارست سطحی در آن‌ها توسعه نیافته است. مناطق با میزان تغذیه بیش از ۷۵٪ منطبق بر نواحی توسعه یافته کارستی رأس کوهستان می‌باشند. ضخامت کم خاک، پوشش گیاهی نسبتاً تنک، تکتونیزه بودن منطقه، رخنمون سازند کربناته بیستون از دیگر عوامل مؤثر در میزان تغذیه بالای خورین می‌باشند. نتایج بیانگر نقش اصلی ژئومورفولوژی کارست در بالا بودن میزان تغذیه آبخوان است. بالا

بودن میزان تغذیه و همچنین توزیع مکانی مناطق تغذیه آبخوان نشان می‌دهد که این آبخوان در برابر انتشار آلودگی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشد، زیرا در مناطق رأس کوه، به علت غلبه نفوذ متمرکز و توسعه یافته بودن ژئومورفولوژی کارست سطحی، انتشار آلودگی به صورت نقطه‌ای و بسیار سریع می‌باشد؛ بنابراین این امر نیازمند برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی جهت مبحث مرتبط با آلودگی با مدنظر قرار دادن نقشه پهنه‌بندی تغذیه و تغذیه و همچنین نقشه ژئومورفولوژی کارست سطحی می‌باشد.

منابع و مأخذ

- Bakalowicz, M. , 2005. *Karst Groundwater: a Challenge for New Resources: Hydrogeology Journal*, v. 13 (1) , 148-160.
- Bauer, S.,and Liedl, R.,and Sauter. M., 2005. *Modeling the influence of epikarst evolution on karst aquifer genesis, a time-variant recharge boundary condition for joint karst-epikarst development: Water Resour Res* ,v. 41(9) :W09416. doi:10.1029/2004WR003321.
- Ford. D. ,and Williams, P. , 2007.*Karst Hydrogeology and Geomorphology: John&Sons, Ltd.*
- Geyer, T. ,and Birk, S. ,and Liedl, R. ,and Sauter, M. ,2008. *Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems: spring hydrographs, J. Hydrol*, v.348 , p. 452-463.
- Goldscheider, N. ,and Drew, D. , 2004. *Methods in Karst Hydrogeology: Taylor& Francis.*
- Gondwe, B. ,and Alonso. G. and Gottwein,G. ,2011. *The influence of conceptual model uncertainty on management decisions for a groundwater-dependent ecosystem in karst: Journal of Hydrology* , v. 400, p. 24-40.
- Healy. RW. ,2010. *Estimating groundwater recharge: Cambridge University Press Cambridge.*
- Hughes. AG. ,and Mansour, MM. ,and Robins, NS. ,and Peach, DW. ,2006. *Numerical modeling of runoff recharge in a catchment in the West Bank. In: MODFLOW and More 2006: Managing Ground-Water Systems. Conference Proceedings*, v. 1, Golden, CO. p. 385-389.
- Janza, M. 2010. *Hydrological modeling in the karst area, Rizana spring catchment, Slovenia. Environ Earth Sci* ,v.61,p. 909-920.
- Jones William, K. ,and, 2001. *Introduction to epikarst: Karst Waters Institute Special Publication 9.*
- Jukic, D. ,and Denic-Jukic. V. ,2008. *Estimating parameters of groundwater recharge model in frequency domain. Karst springs Jadro and Zrnovnica: Hydrol Process.* v.22, p.4532-4542.
- Karimi, H. ,and Raeisi, E. ,and Zare, M. , 2003. *Hydrodynamic behavior of the Gilan karst spring, west of the Zagros, Iran: Cave and Karst Science*, v. 30(1) ,p. 15-22.
- Kova´cs, A. ,2005. *A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis: J. of Hydrology*, v. 303 (1-2) ,p. 152-160.
- Lerner, DN. ,and Issar, AS. ,and Simmers, I. ,1990. *Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge: IAH Int Contrib Hydrogeol 8. Heinz Heise, Hannove.*

- Mangin, A , 1984. *Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses correlatoire et spectral*, Vol, 67, PP.25-43.
- Martinez-Santos, P. ,and Andreu, JM. ,2010. *Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers: J Hydrol*, v. 388, p.389–398.
- Milanović, P. ,2005. *Water Resources Engineering in Karst: Taylor & Francis*.
- Radulovic, M. ,and Stevanovic, Z. ,and Radulovic, M. ,2012. *A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies: Environ Earth Sci*, v. 65, p.2221–2230. DOI 10.1007/s12665-011-1378-0.
- Radulovic, MM. ,2009. *KARSTLOP method—Multiparameter analysis of karstic terrains potential for effective infiltration (in Serbian): Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade*.
- Sauter, M. ,1992. *Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany): Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten*. v. 13, p. 150.
- Shaban, A. ,and BouKheir, R. ,and Froidefond, J. ,and Khawlie, M. , Girard M-C. , 2004. *Characterization of morphometric factors of drainage system interrelated to rock infiltration: the case of the Occidental Lebanon: Caractérisation des facteurs morphométriques des réseaux hydrographiques correspondant aux capacités d'RP des roches au Liban Occidental. Zeitschrift Fur Geomorphologie*.v. 48. p.1.
- Sharma. ML (ed). ,1989. *Groundwater recharge: AA Balkema, Rotterdam*.
- Simmers, I. ,and Hendickx, JMH. ,and Kruseman, GP. ,and Rushton, KR. ,1997. *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. International Association of Hydrogeologists: International Contributions to Hydrogeology*. v. 19, IAH, Wallingford, UK.
- Teutsch, G. ,and Sauter, M. ,1998. *Distributed parameter modeling approaches in karst-hydrological investigations: Bull Hydrogeolo*. v. 16, p.99–109.
- Waltham, T. ,and Bell, F. ,and Culshaw, M. ,2005. *sinkholes and Subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*, Springer.
- White, W.b. ,1998. *Geomorphology and hydrology of a karst terrains: Oxford University press*.