

## ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی (مطالعه موردی: آبخوان کارستی آژوان-بیستون استان کرمانشاه)

- ❖ **علی دسترنج\***: استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد.
- ❖ **احمد نوحه‌گر**: استاد دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ❖ **آرش ملکیان**: دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ **حمید غلامی**: استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

### چکیده

حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب کارست می‌باشد. از سوی دیگر آبخوان آژوان-بیستون نقش مهمی در تأمین آب شرب و کشاورزی جوامع محلی اطراف خود دارد. بنابراین هدف این پژوهش، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی آژوان-بیستون در استان کرمانشاه در برابر آلودگی‌های سطحی با استفاده از مدل COP می‌باشد. این مدل خصوصیات لایه‌های پوشاننده سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تجمع جریان آب زیرزمینی (عامل C)، و بارش بر روی آبخوان (عامل P) را به عنوان پارامترهای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد. نتایج نشان داد که میزان آسیب‌پذیری منطقه بین صفر تا ۵/۴ به دست آمد، که در نهایت به پنج طبقه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی گردید. پهنه آسیب‌پذیری خیلی زیاد با ۳۱۷/۹ کیلومتر مربع بیشترین مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. به طور کلی در منطقه به ترتیب پارامترهای C، P و O بیشترین نقش را در میزان آسیب‌پذیری منطقه دارا می‌باشند. در نهایت می‌توان گفت که مدل COP کارایی مطلوبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی دارا می‌باشد.

**کلید واژگان:** آژوان-بیستون، آبخوان کارستی، آسیب‌پذیری، منابع آب، مدل COP

## ۱. مقدمه

امکان نفوذ و انتشار آلاینده‌ها به درون سیستم آب‌زیرزمینی را آسیب‌پذیری می‌نامند [۴، ۲۲]. با توجه به تأثیر زیان بار آلودگی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و به دلیل این که پاکسازی آبخوان آلوده نیاز به مدت زمان بسیار طولانی داشته و همچنین هزینه‌های بسیاری را نیز در پی خواهد داشت، بنابراین اهمیت چنین مطالعاتی دوچندان می‌شود [۷]. آبخوان‌های کارستی در مناطق نیمه‌خشک غرب ایران با توجه به شرایط طبیعی منطقه و فعالیت‌های انسانی مستعد آلودگی می‌باشند [۲۱]. حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب کارست می‌باشد [۲]. سفره‌های آب کارست به علت ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاص خود متمایز از دیگر سفره‌های آبی می‌باشند [۱۲، ۱۸، ۲۳]. مخاطرات مربوط به منابع بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی، بطور عمده ناشی از فعالیت‌های انسان در سطح زمین است [۸، ۹]. [۵] در پژوهشی به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان‌های قطر پرداخت. نتایج نشان داد که مناطق کارستی دارای بیشترین آسیب‌پذیری هستند. [۱] به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در کشور عراق با استفاده از روش DRASTIC و COP پرداختند. نتایج نشان داد که منطقه از نظر آسیب‌پذیری به چهار کلاس خیلی کم، کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌شود. [۶] به ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی در منطقه گیلان غرب پرداختند. نتایج نشان داد که بیشتر منطقه در کلاس آسیب‌پذیری کم و متوسط قرار دارد. [۲۱ و ۲۴] به ترتیب به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گلین در استان کرمانشاه و حوضه بقیع نیشابور با استفاده از روش COP پرداختند. [۱۷] به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان رامهرمز با تلفیق مدل دراستیک و تحلیل سلسله مراتبی

مارین پرداختند. [۱۶] دو روش COP و Paprika را در مناطق اسپانیا و فرانسه مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها در نتایج خود به مؤثر بودن این دو روش نسبت به روش‌های دیگر در ارزیابی آبخوان‌های کارستی دست یافتند. با توجه به توسعه کارست و استفاده از منابع آب توده‌های آژوان-بیستون به عنوان آب شرب، ارزیابی آسیب‌پذیری این آبخوان‌های کارستی لازم و ضروری می‌باشد. بنابراین از روش COP برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کربناته در چهارچوب استاندارد اروپایی European COST Action 620 استفاده شد. این روش خصوصیات لایه‌های پوشاننده سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تجمع جریان آب‌زیرزمینی (عامل C)، و بارش بر روی آبخوان (عامل P) را به عنوان پارامترهای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آب‌زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد. این روش به طور عمده دو جنبه یعنی زمان جا به جایی آلودگی از منشاء به مقصد و کاهش غلظت آن در طول مسیر را مورد بررسی قرار می‌دهد [۳]. روش COP توسط کیروس و ژو [۱۴] در اتیوپی، دوسی [۱۱] در ایتالیا، راف بار [۲۰] در سلونی، دیمیترو [۱۰] در یونان، لی‌لند [۱۵] در آفریقای جنوبی و پلان [۱۹] در استرالیا به منظور بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شده است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به DRASTIC، GOD و AVI اشاره نمود. این روش‌ها در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی کارایی بسیار کمی دارند و پیچیدگی‌های نواحی کارستی را مد نظر قرار نمی‌دهند. اما روش COP خصوصیات هیدرولوژیک ویژه نواحی کارستی را مد نظر قرار می‌دهد [۱۳]. هدف از این پژوهش به کارگیری مدل COP با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان یک روش مؤثر در ارزیابی خطر آلودگی منابع آب کارست و در نهایت تهیه نقشه‌های

Flow Concentration

Precipitation

Overlying layers

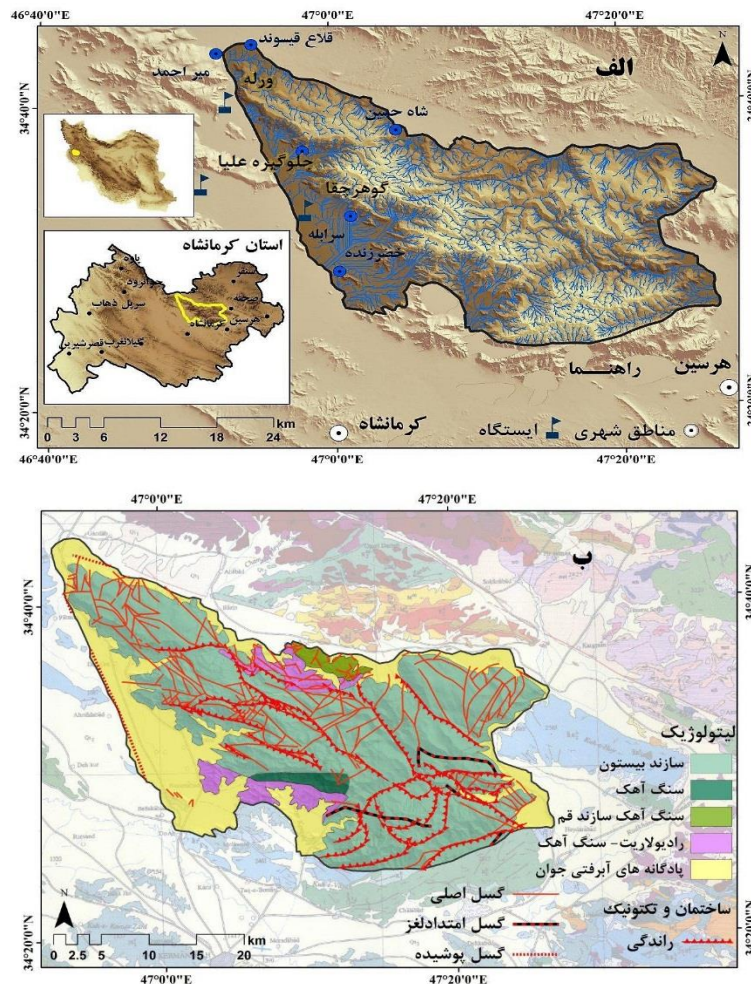
آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دالاهو می‌باشد.

## ۲. روش شناسی

### ۲.۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

آبخوان بیستون، منطبق بر کوهستان بیستون، در شمال و شمال شرقی شهر کرمانشاه واقع شده و شهرهای صحنه و هرسین نیز در شرق و جنوب شرقی آن واقع شده‌اند. مساحت این آبخوان، ۱۰۱۵ کیلومترمربع می‌باشد. این کوهستان، با روند شمال غرب- جنوب شرق، بین عرض‌های جغرافیایی ۲۴' ۳۴° تا ۴۴' ۳۴° شمالی و طول‌های جغرافیایی ۲۷' ۴۶° تا ۲۷' ۴۷° شرقی واقع شده

است. ارتفاع حداکثر و ارتفاع حداقل آن، به ترتیب ۳۴۰۰ و ۱۲۹۶ متر از سطح دریا می‌باشد که حاکی از مرتفع بودن این کوهستان است (شکل ۱، الف). توده آهکی بیستون در واحد ساختمانی زاگرس مرتفع واقع گردیده و در آن رخنمون‌های از سنگ‌های کرتاسه فوقانی تا کواترنری دیده می‌شود (شکل ۱، ب). چشمه‌های توده بیستون شامل میراحمد، ورمنجه، شاه‌حسین، سرابله، خضرزنده و قلاع قیسوند می‌باشد. در این توده آهکی نیز به دلیل وجود آهک ضخیم لایه بیستون، اشکال سطحی توسعه یافته‌ای همچون فروچاله‌ها، کارن، کارن فیلد، غار و دشت‌های آهکی (پولیه) شکل گرفته است.



شکل ۱. نقشه موقعیت (الف) و زمین‌شناسی (ب) توده‌های آهکی بیستون

## ۲،۲. روش کار

در این پژوهش که یک تحقیق توسعه‌ای-کاربردی مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی می‌باشد، برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کربناته از روش COP در چهارچوب استاندارد اروپایی European COST Action 620 استفاده شد. در روش COP آسیب‌پذیری به عنوان برآیندی از سه عامل C، O، P مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عامل O بررسی حفاظت از مناطق غیراشباع آبخوان در برابر رخداد یک عامل آلاینده است و عوامل P و C برای تصحیح درجه حفاظت (عامل O) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. قبل از تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه ابتدا مدل‌سازی فروچاله‌های کارستی با استفاده از بازدید میدانی، تفسیر بصری و تحلیل مدل ارتفاع رقومی با استفاده از مدل‌های منحنی بسته، ترسیم گردید. سپس از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی و میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، تاثیر بسزایی دارد، به منظور توسعه کارست‌سطحی، متغیرهای لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، بارش، دما، کاربری اراضی و خاک به عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب گردیدند. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، از مدل منطق‌فازی و عملگر گاما استفاده شد. مدل‌های فازی عموماً در مدل‌سازی مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب هستند. تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صدر صدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب می‌باشد، زیرا با استفاده از نظریه فازی، می‌توان متغیرهای نا دقیق و مبهم را، به شکل ریاضی درآورد. در مدل فازی، هر فرد هم‌زمان در مجموعه‌های مختلف اما به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و یا

خود این دو حد را می‌پذیرد. روش فازی با پنج عملگر که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل اجرا می‌باشد. اجتماع فازی، اشتراک فازی، ضرب فازی، جمع فازی و گاما. به دلیل نقش تعدیلی عملگر گاما و نزدیک به واقعیت بودن آن، از این عملگر استفاده شد.

سپس لایه‌های روش COP به صورت زیر تهیه شدند:

**الف- لایه تمرکز جریان (C):** همان‌طوری که در جدول (۱) مشاهده می‌شود تمرکز جریان برای مناطق کارستی در قالب دو سناریو تعریف شده است که با توجه به خصوصیات هیدروژئومورفولوژیکی و همچنین زمین‌شناسی منطقه یکی یا هر دو سناریو انتخاب و اجرا می‌شود [۷]. در این مطالعه جهت ارزیابی عامل C سناریو یک تعریف گردید. مطابق این سناریو، نیاز به تهیه سه نقشه فاصله از فروچاله‌ها (dh)، شیب- پوشش گیاهی<sup>۲</sup> (sv) و فاصله از جریان‌های فرورونده (ds) می‌باشد تا نقشه نهایی عامل C تهیه گردد. برای اختصاص امتیاز به عامل (dh) ابتدا نقشه توزیع فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها در هر یک از توده‌های مورد بررسی، با استفاده از بازدید میدانی، تفسیر بصری و تحلیل مدل ارتفاع رقومی با استفاده از مدل‌های منحنی بسته، ترسیم گردید. سپس با استفاده از جدول (۱) نقشه نهایی (dh) به کمک GIS تهیه گردید. برای تهیه نقشه شیب- پوشش گیاهی، ابتدا نقشه شیب منطقه تهیه شد. سپس نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی نیز مطابق با معیارهای جدول (۱) تهیه گردید. سپس برای تهیه نقشه شیب- پوشش گیاهی (sv)، دو نقشه شیب و نقشه پوشش گیاهی با هم ترکیب و ارزش‌گذاری شدند. در نهایت نقشه‌های فاصله از فروچاله‌ها (dh) و شیب- پوشش گیاهی (sv) همپوشانی و کلاس‌بندی شدند و نقشه

<sup>۱</sup>Slope and Vegetation(sv)

<sup>۲</sup>Distance to sinking stream(ds)

<sup>۱</sup>Distance to swallow hole(dh)

مطالعه (کرمانشاه، گوهر چقا، ورله، جلوگیره علیا، چشمه باغ، مرزبانی، طاق بوستان، سنگ سفید، زنگی چقا، حسن آباد سفلا و ...) استفاده شد. برای تهیه نقشه بارش و محاسبه شاخص Pq از روش میانایی<sup>۳</sup> IDW استفاده شد. توزیع زمانی بارش، برای هر ایستگاه باران‌سنجی بر اساس رابطه (۲) محاسبه گردید. سپس با درون‌یابی و طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری، نقشه توزیع بارش تهیه گردید (جدول ۱).

$$PI = \frac{p}{N^{\circ}} \quad \text{رابطه (۲):}$$

که در آن، P: میانگین بارش سالانه (میلیمتر بر سال)،  
N<sup>o</sup>: تعداد روزهای بارانی می‌باشد.  
در نهایت نقشه‌های مقدار بارش و توزیع زمانی بارش هم‌پوشانی شدند و نقشه بارش حاصل گردید.  
در نهایت بعد از محاسبه سه فاکتور C، O، P و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آن‌ها، با استفاده از مدل COP و با کمک تابع Raster Calculator در محیط نرم افزار GIS، این لایه‌ها در هم ضرب شده و نقشه نهایی آسیب‌پذیری<sup>۴</sup> آبخوان‌های آژوان-بیستون محاسبه شد (رابطه ۳) و (جدول ۱).

$$COP = C.O.P \quad \text{رابطه (۳):}$$

### ۳. نتایج

#### ۳.۱. پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌های

##### توده آژوان-بیستون

شکل (۲) نقشه پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌های کوهستان بیستون با استفاده از مدل منحنی بسته را نشان

۳Precipitation Temporal distribution

۴inverse distance weighting

۵Vulnerability

تمرکز جریان (C) به‌دست آمد.

**ب- لایه‌های پوششی (عامل O):** لایه‌های پوششی (عامل O) حفاظت آبخوان را مد نظر قرار می‌دهد که به وسیله خصوصیات فیزیکی و ضخامت لایه‌های بالای منطقه غیر اشباع مشخص می‌گردد. در روش COP فقط دو لایه مهم به منظور ارزیابی عامل O در نظر گرفته شده است که شامل: نقشه خاک (O<sub>s</sub>) و نقشه زمین‌شناسی (O<sub>L</sub>) می‌باشند (جدول ۱). نقشه بافت خاک (O<sub>s</sub>) منطقه از نقشه واحد اراضی تهیه شده به وسیله مؤسسه آب و خاک استخراج شد. به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی (O<sub>L</sub>) به زمین‌شناسی هر لایه (سازند) موجود یک ارزش داده می‌شود و با توجه به ضخامت هر لایه (با استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ استان کرمانشاه) و از طریق رابطه (۱) یک اندیس برای هر لایه (سازند) به‌دست می‌آید. در مرحله بعد رتبه پارامتر cn برای منطقه مورد مطالعه مشخص می‌شود (که برای مناطق مورد مطالعه به علت این‌که آبخوان از نوع آزاد است، برابر یک می‌باشد) و در نقشه مرحله قبل ضرب می‌شود، در نتیجه نقشه عامل (O<sub>L</sub>) حاصل می‌گردد.

$$\text{رابطه (۱):} \quad \text{Layer-index} = \sum (Ly.m)$$

که در آن، Ly: ارزش داده‌شده به هر لایه، m: ضخامت لایه

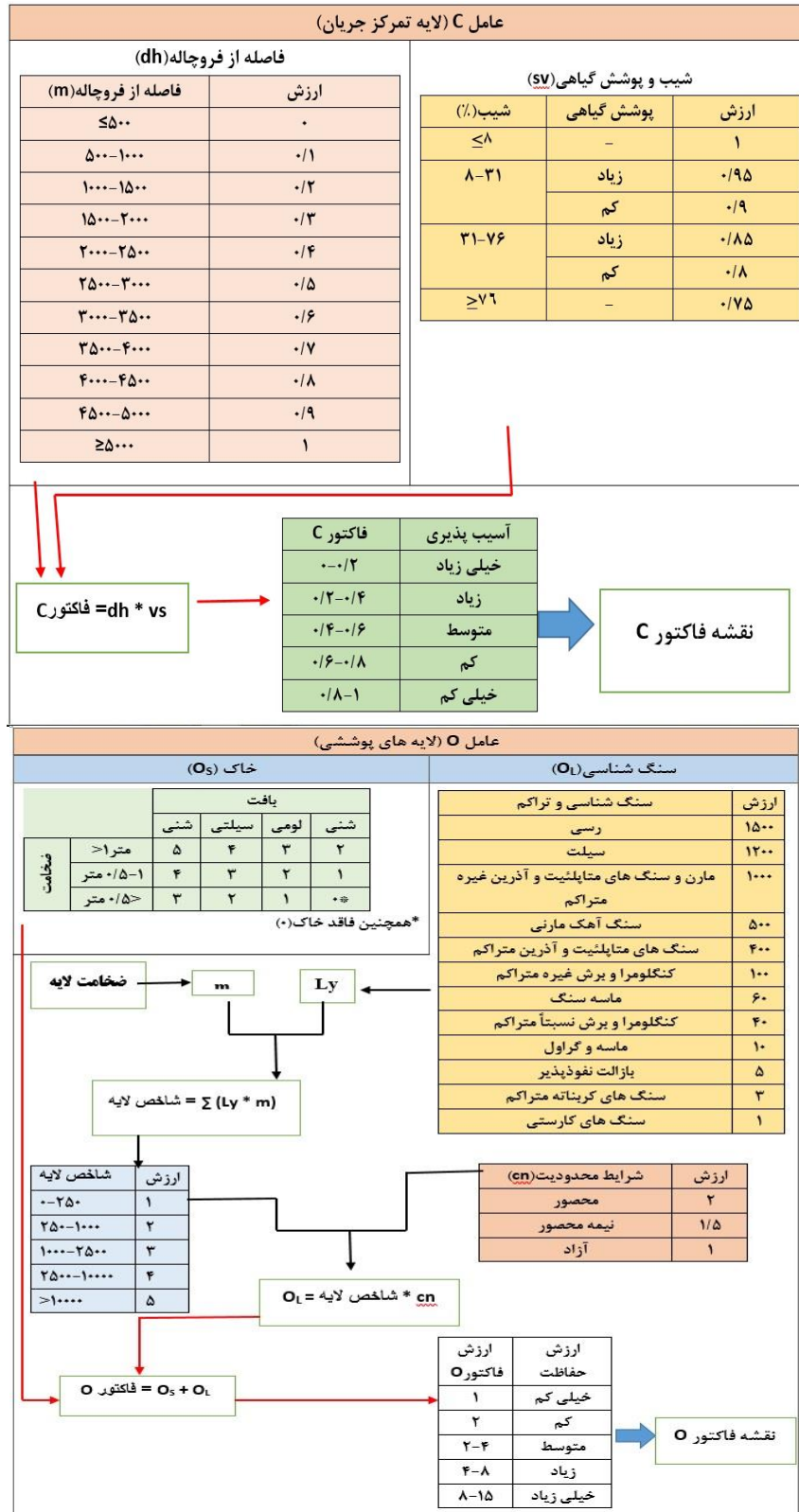
در نهایت نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی همپوشانی و کلاس‌بندی شدند و نقشه لایه‌های پوششی (O) به‌دست‌آمد.

**ج- لایه بارش (عامل P):** عامل P به وسیله دو زیر عامل مقدار بارش (P<sub>q</sub>) و توزیع زمانی بارش (P<sub>t</sub>) ارزیابی می‌گردد. برای تهیه نقشه بارش و محاسبه شاخص P<sub>q</sub> از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در مناطق مورد

۶Precipitation Quantity

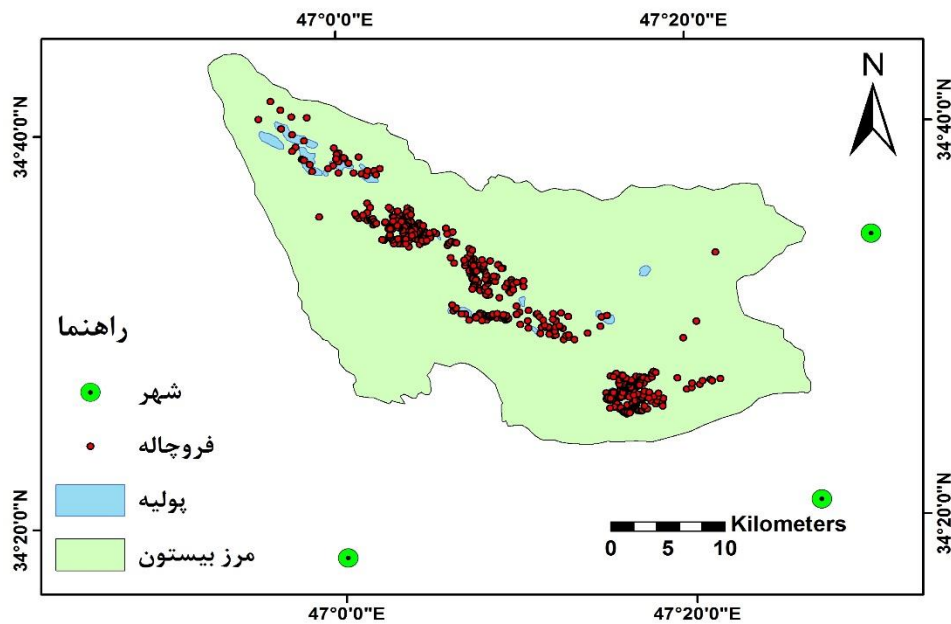
می‌دهد که حاکی از توسعه یافتگی کارست سطحی در این منطقه می‌باشد.

جدول ۱. نحوه محاسبه شاخص COP [۲۲]



ادامه جدول ۱.

عامل P (بارش)																					
مقدار بارش (P <sub>Q</sub> )	توزیع زمانی بارش (P <sub>T</sub> )																				
<table border="1"> <tr> <th>بارش (میلی‌متر در سال)</th> <th>ارزش</th> </tr> <tr> <td>۱۶۰۰ ≤</td> <td>۰/۴</td> </tr> <tr> <td>۱۲۰۰-۱۶۰۰</td> <td>۰/۳</td> </tr> <tr> <td>۸۰۰-۱۲۰۰</td> <td>۰/۲</td> </tr> <tr> <td>۴۰۰-۸۰۰</td> <td>۰/۳</td> </tr> <tr> <td>۴۰۰ ≥</td> <td>۰/۴</td> </tr> </table>	بارش (میلی‌متر در سال)	ارزش	۱۶۰۰ ≤	۰/۴	۱۲۰۰-۱۶۰۰	۰/۳	۸۰۰-۱۲۰۰	۰/۲	۴۰۰-۸۰۰	۰/۳	۴۰۰ ≥	۰/۴	$P_T = \frac{P \left(\frac{mm}{year}\right)}{N^{\circ}}$ <p>(تعداد روز بارانی)</p> <table border="1"> <tr> <th>توزیع زمانی بارش (میلی‌متر در روز)</th> <th>ارزش</th> </tr> <tr> <td>۱۰ ≥</td> <td>۰/۶</td> </tr> <tr> <td>۱۰-۲۰</td> <td>۰/۴</td> </tr> <tr> <td>≥ ۲۰</td> <td>۰/۲</td> </tr> </table>	توزیع زمانی بارش (میلی‌متر در روز)	ارزش	۱۰ ≥	۰/۶	۱۰-۲۰	۰/۴	≥ ۲۰	۰/۲
بارش (میلی‌متر در سال)	ارزش																				
۱۶۰۰ ≤	۰/۴																				
۱۲۰۰-۱۶۰۰	۰/۳																				
۸۰۰-۱۲۰۰	۰/۲																				
۴۰۰-۸۰۰	۰/۳																				
۴۰۰ ≥	۰/۴																				
توزیع زمانی بارش (میلی‌متر در روز)	ارزش																				
۱۰ ≥	۰/۶																				
۱۰-۲۰	۰/۴																				
≥ ۲۰	۰/۲																				
<p>↓ ↓ ↓</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> <math>P \text{ فاکتور} = P_T * P_Q</math> </div> <table border="1"> <tr> <th>P فاکتور</th> <th>آسیب‌پذیری</th> </tr> <tr> <td>۰/۴-۰/۵</td> <td>خیلی زیاد</td> </tr> <tr> <td>۰/۶</td> <td>زیاد</td> </tr> <tr> <td>۰/۷</td> <td>متوسط</td> </tr> <tr> <td>۰/۸</td> <td>کم</td> </tr> <tr> <td>۰/۹-۱</td> <td>خیلی کم</td> </tr> </table> </div>		P فاکتور	آسیب‌پذیری	۰/۴-۰/۵	خیلی زیاد	۰/۶	زیاد	۰/۷	متوسط	۰/۸	کم	۰/۹-۱	خیلی کم								
P فاکتور	آسیب‌پذیری																				
۰/۴-۰/۵	خیلی زیاد																				
۰/۶	زیاد																				
۰/۷	متوسط																				
۰/۸	کم																				
۰/۹-۱	خیلی کم																				
شاخص COP																					
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math>COP \text{ شاخص} = C * O * P</math> </div>	<table border="1"> <tr> <th>COP شاخص</th> <th>ارزش</th> </tr> <tr> <td>۰-۰/۵</td> <td>خیلی زیاد</td> </tr> <tr> <td>۰/۵-۱</td> <td>زیاد</td> </tr> <tr> <td>۱-۲</td> <td>متوسط</td> </tr> <tr> <td>۲-۴</td> <td>کم</td> </tr> <tr> <td>۴-۱۵</td> <td>خیلی کم</td> </tr> </table>	COP شاخص	ارزش	۰-۰/۵	خیلی زیاد	۰/۵-۱	زیاد	۱-۲	متوسط	۲-۴	کم	۴-۱۵	خیلی کم								
COP شاخص	ارزش																				
۰-۰/۵	خیلی زیاد																				
۰/۵-۱	زیاد																				
۱-۲	متوسط																				
۲-۴	کم																				
۴-۱۵	خیلی کم																				
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin-left: auto;"> <p>COP نقشه</p> </div>																					



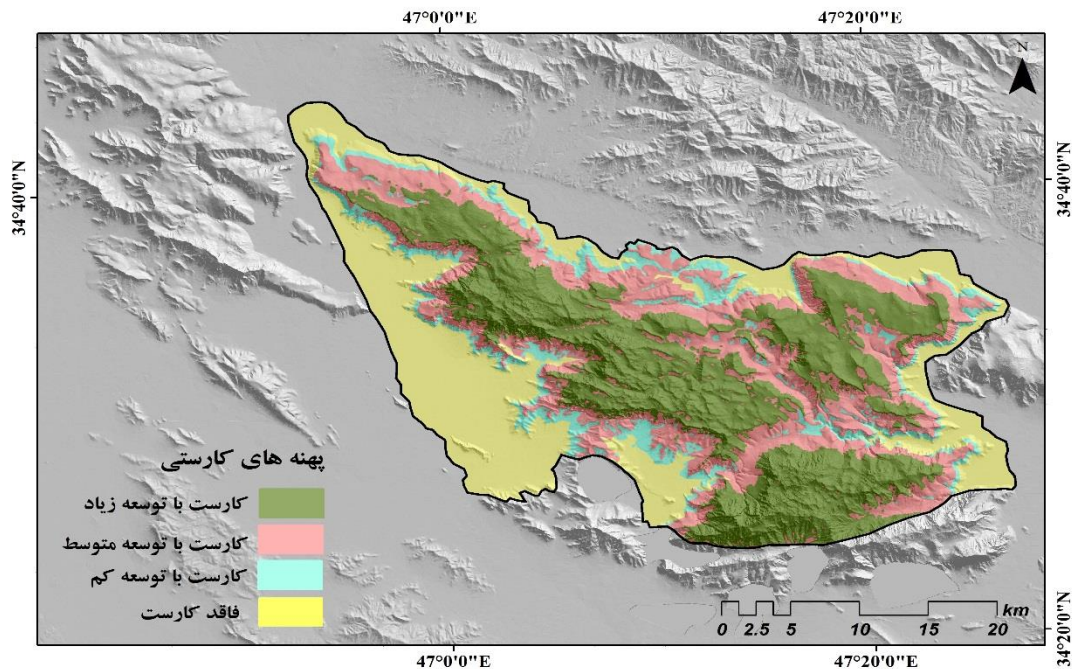
شکل ۲. نقشه پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌های کوهستان آژوان - بیستون

چهار کلاس فاقد کارست (۰-۰/۱۳۹)، کارست با توسعه کم (۰/۱۳۹-۰/۳۵۶)، کارست با توسعه متوسط (۰/۳۵۶-۰/۵۵۴) و کارست با توسعه زیاد (۰/۳۵۶-۰/۹۸۵) یافته شده است.

### ۲.۳. پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده

#### آژوان - بیستون

نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی بیستون (شکل ۳) با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی به



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی مدل فازی توده بیستون

نیمه‌متراکم، جنگل تنک و بیرون‌زدگی سنگی)، شیب کم تا زیاد واقع شده است. پهنه با آسیب‌پذیری متوسط در قسمت‌های نیمه‌مرتفع منطقه و منطبق بر سازند آهکی بیستون، رادیولاریت-مارلاستون، آهک دوره‌تریاس (Rb) و تراس‌های جوان رودخانه‌ای که دارای کاربری مراتع متراکم و نیمه‌متراکم و شیب کم تا متوسط واقع شده است. پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم نیز، منطبق بر نهشته‌های کواترنری (پادگانه‌های جوان رودخانه‌ای Q2) و سازند قم واقع شده‌اند، که دارای کاربری کشاورزی (دیم، آبی و باغ)، شیب کم و فاقد ژئومورفولوژی کارست هستند.

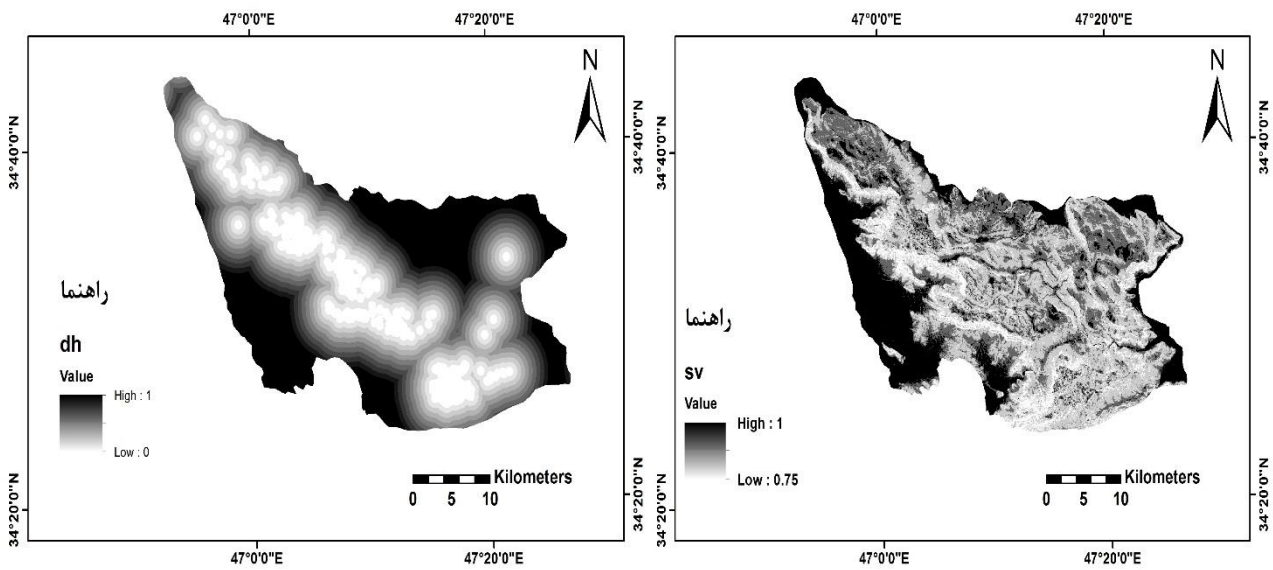
### ۳.۳. تهیه لایه‌های روش COP

الف - لایه تمرکز جریان (C): شکل (۴) نقشه فاصله از فروچاله‌ها (dh) و شیب-پوشش گیاهی (sv) و شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی عامل C را نشان می‌دهد. امتیاز نهایی این عامل بین صفر تا یک می‌باشد. جدول (۲) مساحت و درصد مساحت هر کدام از طبقه‌های آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. در این نقشه پهنه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد در قسمت‌های مرتفع منطقه و منطبق بر سازند آهکی بیستون که دارای بیشترین دولین و پولیه، کاربری (مراتع متراکم و

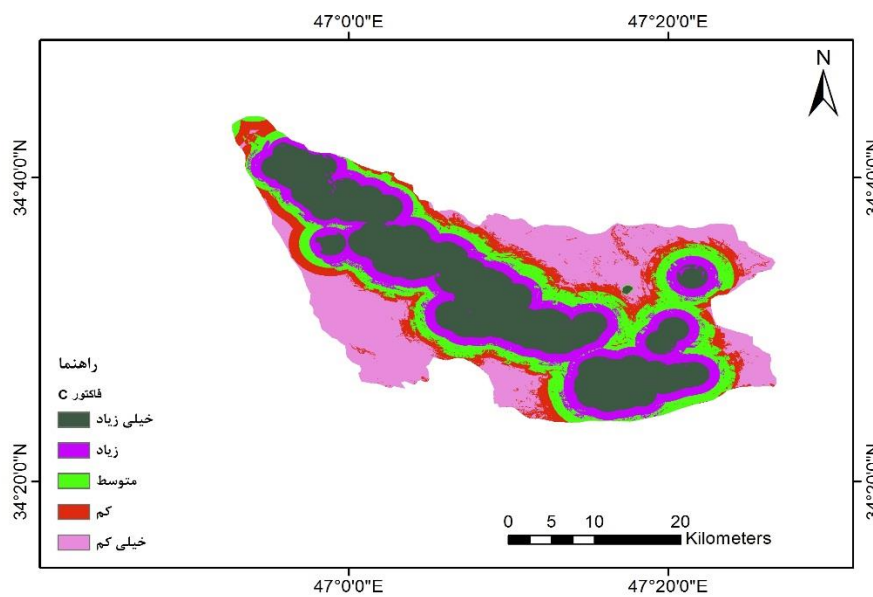


جدول ۲. امتیاز و مساحت طبقات آسیب‌پذیری شاخص C

امتیاز شاخص C	آسیب‌پذیری	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت
۰ - ۰/۲	خیلی زیاد	۳۰۹/۳	٪ ۳۰/۴۸
۰/۲ - ۰/۴	زیاد	۱۷۲/۸	٪ ۱۷/۰۴
۰/۴ - ۰/۶	متوسط	۱۵۸	٪ ۱۵/۵۸
۰/۶ - ۰/۸	کم	۱۱۰/۶	٪ ۱۰/۰۹
۰/۸ - ۱	خیلی کم	۲۶۳/۷	٪ ۲۵/۹۹



شکل ۴. نقشه فاصله از فروچاله‌ها (dh) و شیب - پوشش گیاهی (sv) منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی فاکتور C

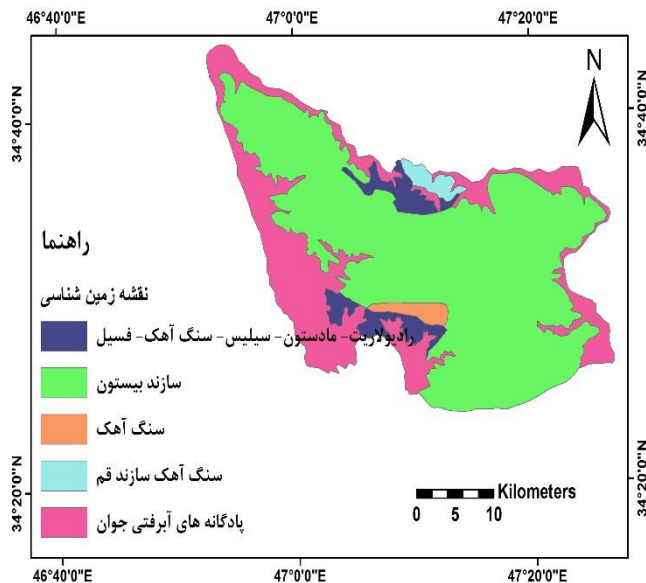
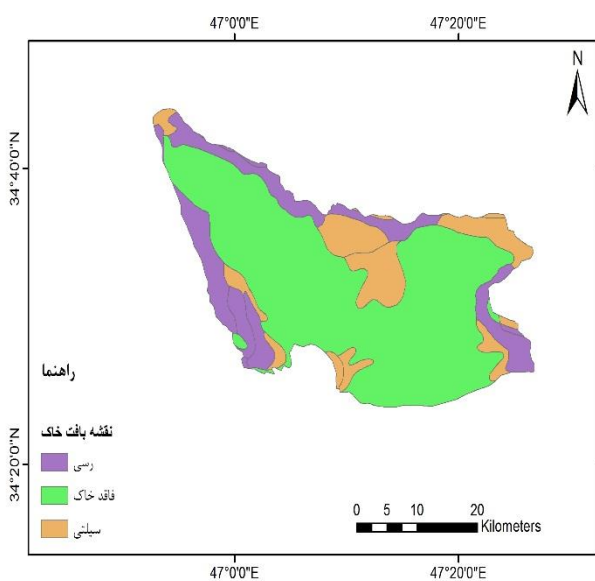
می‌باشد. مناطقی که در پهنه حفاظتی زیاد و برعکس در پهنه آسیب‌پذیری کم واقع شده‌اند، در قلمرو سازندهای قم، بخش‌های از سازند بیستون و پادگانه‌های آبرفتی (Q<sub>2</sub>) می‌باشند و مناطقی که در پهنه حفاظتی کم و متوسط و برعکس در معرض آسیب‌پذیری زیاد و متوسط واقع شده‌اند، در قلمرو سازندهای بیستون، آهک دوره تریاس (Rb) و بخش‌های از پادگانه‌های آبرفتی (Q<sub>2</sub>) می‌باشند. طبق جدول (۳)، ۲۲/۶۵ درصد منطقه دارای حفاظت بالا می‌باشد، یعنی ۷۷/۳۵ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط و زیاد می‌باشد که این امر حاکی از آسیب‌پذیر بودن منطقه از نظر گسترش آلودگی در منابع آب کارستی می‌باشد.

از آنجایی که برای به‌دست آوردن عامل C از سناریو جدول (۱) استفاده شد، بنابراین به ترتیب فاصله از دولین، فاصله از پلژه و شیب- پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را در میزان عامل C دارا می‌باشند. مطابق جدول (۲) ۶۳/۱ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد، زیاد و متوسط می‌باشد که این امر حاکی از آسیب‌پذیر بودن منطقه از نظر گسترش آلودگی در منابع آب کارستی می‌باشد.

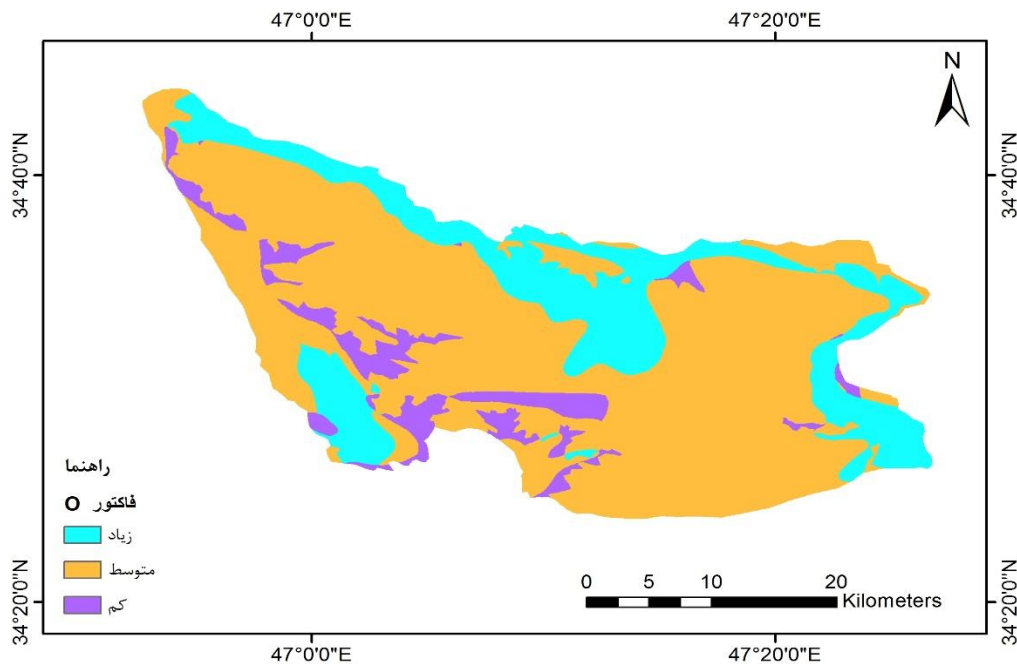
**ب- لایه‌های پوششی (عامل O):** شکل (۶) نقشه بافت خاک و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و شکل (۷) نقشه لایه‌های پوششی (عامل O) و جدول (۳) مساحت و درصد مساحت هر کدام از طبقات آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. امتیاز نهایی این عامل بین ۲ تا ۶

جدول ۳. مساحت طبقات حفاظتی شاخص O

درصد مساحت	مساحت (کیلومتر مربع)	حفاظت	امتیاز شاخص O
۷/۹٪	۸۰/۵۶	کم	۲
۶۹/۴٪	۲۲۹/۶۸	متوسط	۲ - ۴
۲۲/۶۵٪	۷۰۳/۷۷	زیاد	۴ - ۶



شکل ۶. نقشه بافت خاک و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی فاکتور O

۰/۶ تا ۰/۹ می‌باشد و پهنه با آسیب‌پذیری کم بیشترین مساحت منطقه را تشکیل می‌دهد. در مناطق مرتفع که بارش افزایش می‌یابد، آسیب‌پذیری هم افزایش می‌یابد. مطابق جدول (۴)، ۱۴/۶ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری زیاد می‌باشد.

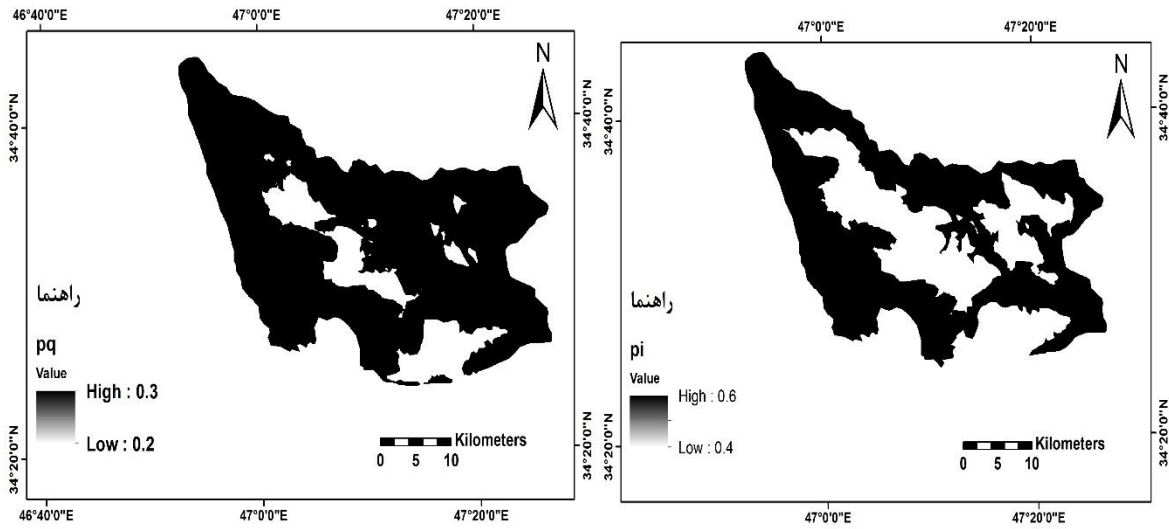
#### ۴.۳. محاسبه مدل COP

شکل (۱۰) نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی آژوان-بیستون و جدول (۵) مساحت و درصد مساحت هر کدام از طبقات آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

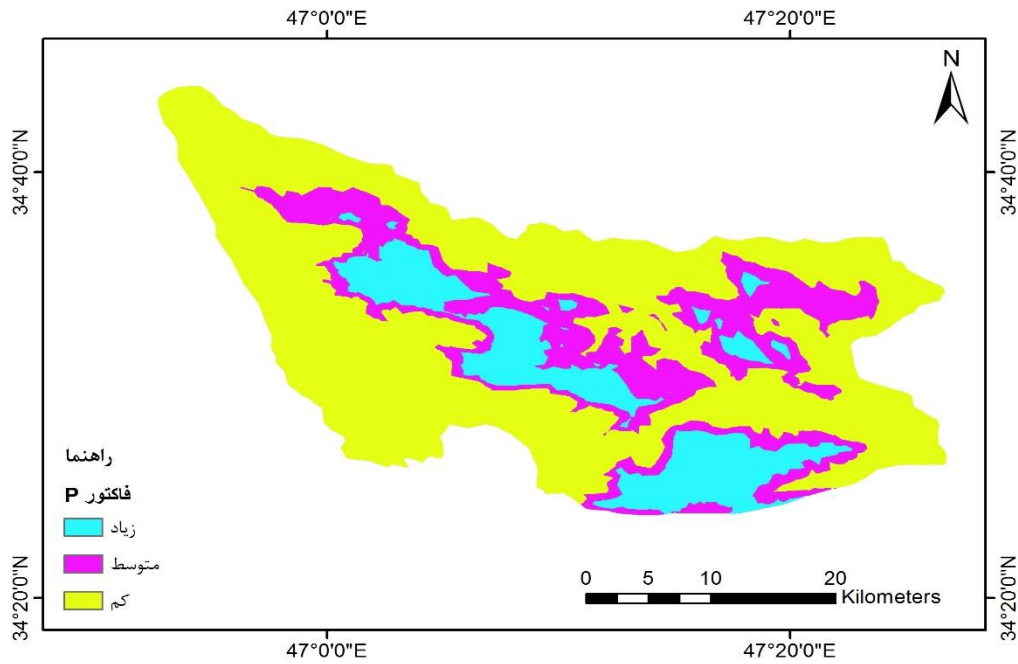
**ج- لایه بارش (عامل P):** میانگین بارش سالیانه منطقه بین ۵۵۳ تا ۱۰۲۷ میلی‌متر است. در قسمت‌های کم ارتفاع منطقه بارش کمتر و در نواحی مرتفع و به‌خصوص نواحی کوهستانی بارش افزایش می‌یابد. میانگین تعداد روزهای بارشی منطقه ۷۳ روز در سال می‌باشد. شکل (۸) نقشه مقدار بارش (P<sub>Q</sub>) و توزیع زمانی بارش (P<sub>I</sub>) و شکل (۹) نقشه لایه بارش (عامل P) و جدول (۴) مساحت و درصد مساحت هر کدام از طبقات آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. امتیاز نهایی این عامل بین

جدول ۴. امتیاز و مساحت طبقات آسیب‌پذیری شاخص P

امتیاز شاخص P	آسیب‌پذیری	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۰/۶	زیاد	۱۴۸/۲۴	٪ ۱۴/۶
۰/۷	متوسط	۲۱۰/۲۵	٪ ۲۰/۷
۰/۸ - ۰/۹	کم	۶۵۶/۲	٪ ۶۴/۶



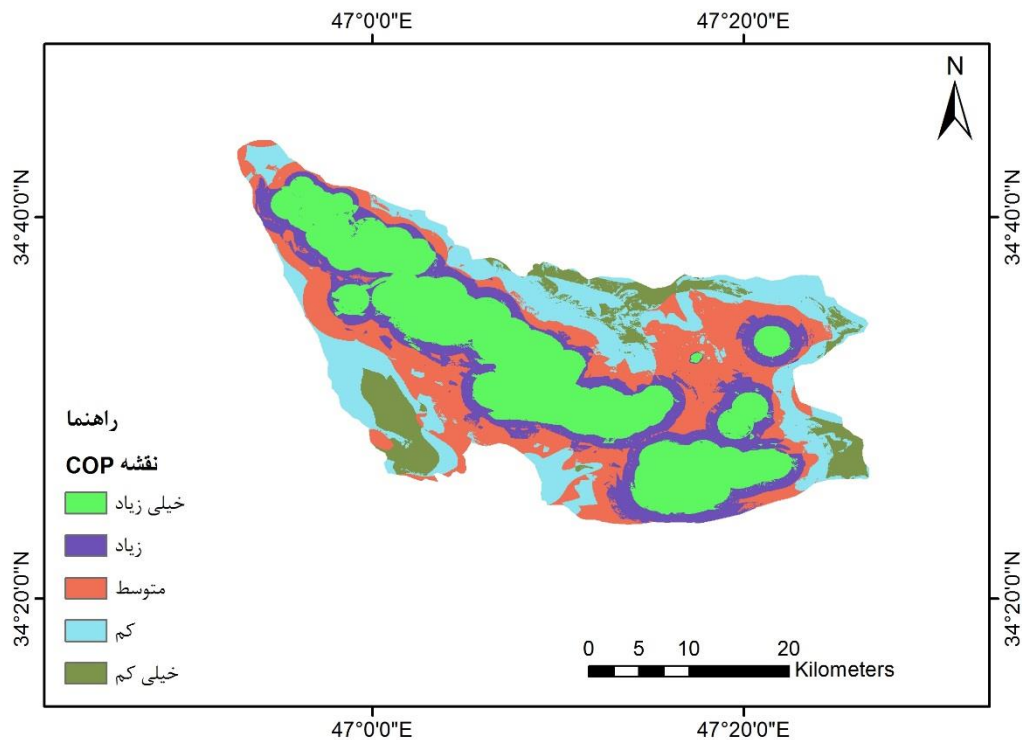
شکل ۸. نقشه مقدار بارش (P<sub>Q</sub>) و توزیع زمانی بارش (P<sub>T</sub>) منطقه مورد مطالعه



شکل ۹. نقشه بهینه‌بندی فاکتور P

جدول ۵. مساحت طبقات آسیب‌پذیری

شاخص COP	آسیب‌پذیری	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۰ - ۰/۵	خیلی زیاد	۳۱۷/۹۹	٪ ۳۱/۳۸
۰/۵ - ۱	زیاد	۱۶۳/۳۷	٪ ۱۶/۱۲
۱ - ۲	متوسط	۲۳۷/۳۸	٪ ۲۳/۴۳
۲ - ۴	کم	۲۱۲/۷	٪ ۲۱
۴ - ۵/۴	خیلی کم	۸۱/۶۱	٪ ۸



شکل ۱۰. نقشه آسیب‌پذیری آبخوان آخوان-بیستون بر اساس روش COP

و خلوص آهک سازند کربناته بیستون، نقش مهمی در توسعه و شکل‌گیری پولیه‌های بیستون دارا می‌باشد. بر اساس نتایج نقشه توسعه کارست سطحی، طبقه فاقد کارست، منطبق بر سطح نهشته‌های کواترنری و آهک‌های بیوکلاسیک سیلیسی می‌باشد. همچنین، جهت شیب‌های جنوبی، جنوب غربی و غرب، تأثیر کم عامل زمین ساخت و ارتفاع، حداقل بارش و ماندگاری کم آن نسبت به ارتفاعات و پوشش گیاهی کم تراکم و مبتنی بر زراعت و کشاورزی، اصلی‌ترین عوامل در توسعه نیافتگی کارست در این طبقه می‌باشند. این طبقه، بیشترین مساحت توده بیستون را به خود اختصاص داده است. طبقه با توسعه کارست کم، بر حواشی تاقدیس بیستون و کوهپایه‌های آن منطبق می‌باشد. بخش‌های کمی از آهک بیستون و قم و همچنین رادیولاریت و سیلیس در این طبقه واقع شده‌اند. این طبقه دارای شیب زیاد و مراتع کم تراکم

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نقشه پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها نشان داد که بیشترین تراکم فروچاله‌ها (بیش از ۹۸٪) در توده آهکی بیستون بوده و مابقی نیز در آهک دوره تریاس شکل گرفته‌اند. در سطح دشت‌های منطقه نیز به علت عدم رخنمون سازندهای کربناته، فروچاله شکل نگرفته است. همچنین پراکنش فروچاله‌ها، شرایط مساعد کارست‌زایی را در سازند بیستون نسبت به دیگر سازندهای آهکی منطقه نشان می‌دهد. البته سازند بیستون و ارتفاعات بیستون، علاوه بر خلوص لیتولوژیکی و تکتونیزه‌تر بودن، به علت ارتفاع بیشتر، دارای شرایط اقلیمی مساعدتری جهت فرایند کارست‌زایی نسبت به سایر مناطق کربناته آن می‌باشند. پولیه‌های شکل گرفته در توده بیستون، بیشتر از نوع ساختاری بوده و در امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند. تکتونیزه بودن زون زاگرس مرتفع

هستند. پهنه آسیب‌پذیری خیلی زیاد با مساحت ۳۱۷/۹ کیلومتر مربع بیشترین مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. این پهنه از لحاظ لیتولوژی سازند آهکی بیستون و آهک دوره تریاس (Rb) را در برمی‌گیرد و دارای بارش بین ۱۰۲۷-۸۰۰ میلی‌متر و خاک کم عمق می‌باشد. پوشش گیاهی و کاربری این پهنه مراتع متراکم و نیمه‌متراکم، جنگل‌های تنک و برون‌زدگی سنگی می‌باشد و دارای شیب کم تا زیاد می‌باشد. تمامی فروچاله‌ها و پولیه‌های استخراج شده در منطقه در این پهنه قرار دارد. این پهنه از لحاظ توسعه کارست سطحی دارای کلاس کارست با توسعه زیاد می‌باشد. از لحاظ ارتفاعی در مناطق مرتفع با ارتفاع ۳۴۰۰-۲۵۰۰ متر قرار دارد. پهنه با آسیب‌پذیری متوسط با مساحت ۲۷۳/۳۸ کیلومتر مربع بعد از پهنه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد بیشترین مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. از لحاظ زمین‌شناسی منطبق بر سازند آهکی بیستون در ارتفاعات پایین با ارتفاع ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر می‌باشد. کاربری این پهنه مراتع متراکم و نیمه‌متراکم و جنگل می‌باشد و دارای شیب کم تا متوسط و دارای بارش بین ۶۰۰-۷۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد و از لحاظ پوشش خاک دارای خاک کم عمق و از لحاظ توسعه کارست سطحی دارای کلاس کارست با توسعه متوسط می‌باشد. پهنه با آسیب‌پذیری زیاد ۱۶/۱۲ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته است. این پهنه از لحاظ لیتولوژی سازند آهکی بیستون را در برمی‌گیرد و دارای بارش بین ۸۰۰-۷۰۰ میلی‌متر بوده و خاک کم عمق می‌باشد. پوشش گیاهی و کاربری این پهنه مراتع متراکم و نیمه‌متراکم، جنگل‌های تنک و برون‌زدگی سنگی می‌باشد و دارای شیب کم تا متوسط بوده و از لحاظ توسعه کارست سطحی دارای کلاس کارست با توسعه زیاد می‌باشد. و همچنین در مناطق مرتفع با ارتفاع ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متر قرار دارد. پهنه‌های با آسیب‌پذیری کم و خیلی کم در مجموع ۲۹ درصد مساحت منطقه را به خود اختصاص می‌دهند و منطبق بر دشت‌های کم ارتفاع با ارتفاع

می‌باشد. طبقه با توسعه متوسط کارست بر آهک بیستون و بر دامنه‌های تاقدیس بیستون، مناطق با تراکم گسل‌ها و درزه و شکاف‌ها، دامنه‌های رو به آفتاب کوهستان، ارتفاع و بارش زیاد، دمای کم، مراتع نیمه‌متراکم تا متراکم منطبق می‌باشد. مرتفع‌ترین قسمت‌های تاقدیس بیستون واقع در آهک بیستون، با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل‌ها، قرارگیری در هسته پیشینه بارش، قرارگیری در جهت شیب‌های شمال، شمال شرقی و شرقی، پوشش گیاهی به صورت مرتع متراکم، ارتفاع بالا و بارش به صورت برف و دمای بسیار کم در طبقه کارست با توسعه زیاد واقع شده است.

با توجه به توسعه کارست و استفاده از منابع آب آبخوان آژوان-بیستون به عنوان آب شرب، ارزیابی آسیب‌پذیری این آبخوان‌های کارستی لازم و ضروری می‌باشد. بنابراین از روش COP برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کربناته در چهارچوب استاندارد اروپایی European COST Action 620 استفاده شد. این روش خصوصیات لایه‌های پوشاننده سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تجمع جریان آب زیرزمینی (عامل C) و بارش بر روی آبخوان (عامل P) را به عنوان پارامترهای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد. روش COP از جدیدترین روش‌هایی است که جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با هر سیستم جریان، ابداع شده است. تلفیق این روش با تکنولوژی سیستم‌اطلاعات جغرافیایی (GIS) و علم سنجش از دور باعث شده است تا با صرف وقت و هزینه کمتر به نتایج مطلوبی دست پیدا کنیم که میزان آسیب‌پذیری منطقه بین صفر تا ۵/۴ به دست آمد و در نهایت به پنج طبقه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی گردید. با توجه به نقشه نهایی آسیب‌پذیری قسمت‌های مرکزی به علت وجود اشکال ژئومورفولوژیک کارستی (فروچاله‌ها، دولین‌ها، کارن‌ها، غارها و غیره)، خطواره‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها، پوشش نازک خاک و بارش بیشتر دارای آسیب‌پذیری بیشتری

که منطقه از نظر آسیب‌پذیری به چهار کلاس خیلی کم، کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌شود. [۶] به ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی در منطقه گیلان غرب پرداختند. نتایج نشان داد که بیشتر منطقه در کلاس آسیب‌پذیری کم و متوسط قرار دارد. [۲۴] در پژوهشی به منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان حوضه بقیع نیشابور در برابر انتشار آلودگی با استفاده از دو روش COP و PaPRIKa و آراء راهکارهای مدیریتی برای حفظ این منابع پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص COP برای منطقه مورد مطالعه بین ۰/۵ تا ۱۲ متغیر می‌باشد. بنابراین محدوده مورد مطالعه از نظر آسیب‌پذیری به چهار رده مختلف پهنه‌بندی گردید که عبارتند از: آسیب‌پذیری زیاد، متوسط، کم و خیلی کم. نتایج حاصل از این مطالعات با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش هم‌خوانی دارند. محاسبه شاخص COP در محیط GIS و نمایش آن، می‌تواند نتایج بسیار خوبی در تعیین پتانسیل آلودگی در نواحی کارستی ارائه دهد و مدیریت منابع آب و کاربری اراضی را بهبود بخشد. با توجه به این که آبخوان آژوان-بیستون نقشی اساسی در تأمین آب شرب و کشاورزی مناطق اطراف خود دارد، جهت حفاظت از این منابع آب، باید راهکارهای زیست محیطی ویژه‌ای برای نواحی با خطر آلودگی متوسط و زیاد در نظر گرفت.

۱۵۰۰-۱۲۹۶ متر و کم شیب می‌باشند. این پهنه‌ها از لحاظ زمین‌شناسی در برگیرنده سازندهای جوان کواترنری (پادگانه‌های آبرفتی جوان) و قم بوده و این پهنه‌ها از لحاظ توسعه کارست سطحی فاقد کارست بوده و دارای بارش کم، بین ۶۰۰-۵۵۳ میلی‌متر در سال می‌باشند. این پهنه دارای کاربری کشاورزی (دیم، آبی و باغ) و بستر رودخانه‌ها می‌باشد و فاقد ژئومورفولوژی کارست هستند. به‌طور کلی در کل منطقه مطالعاتی به ترتیب P, C و O بیشترین نقش را در میزان آسیب‌پذیری منطقه دارا می‌باشند که با نتایج [۶] هم‌خوانی دارد. بررسی نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمده نشان می‌دهد که عامل C به علت وسعت زیاد پهنه کارست تکامل یافته، وسعت کم مناطق غیر کارست، شیب متوسط منطقه، نقش اصلی را در میزان آسیب‌پذیری منطقه دارا می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت که مدل COP دارای کارایی مطلوبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی می‌باشد. [۷ و ۲۱] به مطالعه میزان آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی شیمبا (استان خوزستان) و گلین (استان کرمانشاه) به استفاده از روش COP پرداختند که نتایج حاصله از این مطالعات با نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر مطابقت دارد. [۱] به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در کشور عراق با استفاده از روش DRASTIC و COP پرداختند. نتایج نشان داد

## References

- [1] Abdullah, T., Ali, S., Al-Ansari, N., & Knutsson, S. (2016). Groundwater vulnerability using DRASTIC and COP models: Case study of Halabja Saidsadiq basin, Iraq. *Engineering*, 8(11), 741-760.
- [2] Afrasiabian, A. (2007). The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environmental geology*, 52(4), 673-677.
- [3] Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16(5), 911-925.
- [4] Azizi, F and Mohamadzadeh, F. (2012). Vulnerability zoning and assessment of spatial variations of aquifer quality in Imamzadeh plain of Jafar-e-Chesaran using DRASTIC model and GWQI quality index. *Journal of management system*. 5(13), 1-17.

- [5] Baalousha, H. M. (2016). Groundwater vulnerability mapping of Qatar aquifers. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 75-93.
- [6] Bagheri, S., Davoodi, M., Yahmadi, D., Jaafari-aghdam, M., & Soltani, M. (2013). Assessing and mapping the vulnerability of karstic aquifer using gis and cop model.
- [7] Bagherzadeh, S. Kalantari, N. Moradzadeh, M. Rahimi, M and Fazleli, M. (2010). The latest method of zoning vulnerability of karstic aquifers using GIS and remote sensing techniques: COP method (case study: Shimba karstic aquifer). *Geomatics National Conference 2010*.
- [8] De Jong, C., Cappy, S., Finckh, M., & Funk, D. (2008). A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Engineering Geology*, 99(3), 228-238.
- [9] De Ketelaer, D., Htzi, H., Neukum, C., Civita, M., & Sappa, G. (2003). Hazard analysis and mapping.
- [10] Dimitriou, E., Karaouzas, I., Sarantakos, K., Zacharias, I., Bogdanos, K., Diapoulis, A. (2008). Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the impacts on a periurban wetland, *Journal of Environmental Management* 88, No. 3, pp. 526-538.
- [11] Ducci, D. (2007). Intrinsic vulnerability of the Alburni karst system (southern Italy). Geological Society, London, Special Publications, 279(1), 137-151.
- [12] Ford, D., Williams, P. D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. *John Wiley & Sons*.
- [13] Rangzan, K. Mehrabinezhad, A. Alijani, F and Ostadhashemi, T. (2017). Vulnerability and Contamination of Naal-Aspi Karstic Aquifer, Southeast of Izeh, Using Cop Method. *Journal of Advanced Applied Geology*. 23, 20-29.
- [14] Kiros, M., Zhou, Y. (2006). GIS-based vulnerability assessment and mapping for the protection of the Dire Dawa groundwater basin, Ethiopia, 34th Congress of international association of hydrogeologists, Beijing, P.R. China.
- [15] Leyland, R. (2008). Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site, Master thesis.
- [16] Marín, A.I., Dörfliker, N., Andreo, B. (۲۰۱۲). Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain). *Environ. Earth Sci.* 65 (8), ۲۴۰۷-۲۴۲۱. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1056-2>.
- [17] Moradi, P. Roohi, H. Rangzan, K. Kalantari, N and Ghanbari, N. (2016). Assessing groundwater vulnerability in Ramhormoz aquifer using a GIS and DRASTIC Techniques. *Journal of RS and GIS for natural resources*. 7(4). 62-79.
- [18] Mudarra, M., & Andreo, B. (2011). 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*, 397(3), 263-280.
- [19] Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., Grasemann, B. (2008). Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus, *Environmental Geology*.
- [20] Ravbar, N. (2007). The Protection of Karst Waters, a Comprehensive Slovene Approach to Vulnerability and Contamination Risk Mapping, ZRC Publishing Ljubljana, pp. 254.
- [21] Saif, A. Jaafari aghdam, M and Jahanfar, A. (2014). Evaluation and preparation of vulnerability map of karstic aquifers using COP model (Case study: Golin karstic aquifer, Kermanshah province). *Journal of quantitative geomorphological researches*. 3 (3), 65-79.
- [22] Tabarmayeh, M and Vaezi, H. (2014). Assessment of vulnerability of aquifer to Tabriz plain. *Journal of Water and Soil*. 28(6), 1137-1151.
- [23] Vías, J., Andreo, B. Ravbar, N., Hötzi, H. (۲۰۱۰). Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe, *Journal of Environmental Management*, No. 91, pp. 1500-1510.
- [24] White, W. B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford university press.
- [25] Zanganeh asadi, M. Baghayieenezhad, S and Gholampoor. (2015). Preparing the vulnerability map for Khaki-e-Razavi aquifer contamination using two methods of COP and PRIK, using remote sensing and GIS. *Journal of management system*. 8, 43-51.