

## پهنه‌بندی مکانی مناطق تغذیه آبخوان در مناطق کارستی (مطالعه موردی: آبخوان کارستی آژوان- بیستون استان کرمانشاه)

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

### چکیده

مناطق تغذیه، میزان و توزیع فضایی تغذیه در آبخوان‌های کارستی، به عواملی چون ژئومورفولوژی کارست و میزان توسعه آن، اقلیم، شیب، پوشش گیاهی، خاک و عوامل زمین‌شناسی بستگی دارد. آبخوان کارستی آژوان-بیستون در استان کرمانشاه، نقش اصلی را در گسترش مدنیت و تأمین آب موردنیاز جوامع انسانی دارد. هدف این تحقیق، مدل‌سازی مناطق تغذیه آبخوان آژوان-بیستون در استان کرمانشاه با استفاده از مدل KARSTLOP است. نقشه توزیع فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها در هر یک از توده‌های موردبررسی، با استفاده از بازدید میدانی، تفسیر بصری و تحلیل مدل رقومی ارتفاع با استفاده از مدل‌های منحنی بسته، ترسیم گردید. سپس به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، از مدل منطق‌فازی و عملگر گاما استفاده شد و در نهایت به منظور مدل‌سازی مناطق تغذیه از مدل KARSTLOP استفاده شد. نتایج پهنه‌بندی تغذیه نشان می‌دهد که میزان تغذیه سالانه به‌دست‌آمده برای آبخوان کارستی بیستون بین ۳۶ تا ۸۳ درصد می‌باشد. بیشترین میزان تغذیه در نواحی با بیش از ۷۸ درصد تغذیه، منطبق بر سطح هموار پولیه‌ها که دارای فروچاله می‌باشند، رخ داده و کمترین میزان تغذیه ۳۶ تا ۴۰ درصد و ۴۰ تا ۴۵ درصد نیز در دشت‌های آبرفتی روی می‌دهد. نتایج کلی، بیانگر نقش اصلی ژئومورفولوژی کارست کوه بیستون در توزیع مکانی میزان تغذیه در آبخوان است. نتایج پهنه‌بندی تغذیه با نتایج حاصل از پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، کاملاً منطبق است.

**کلید واژگان:** تغذیه آبخوان، کرمانشاه، کارست، مدل، بیستون، KARSTLOP

## ۱. مقدمه

با توجه به موقعیت خاص آبوهوایی ایران و کمبود بارش و همچنین توزیع نامناسب مکانی و زمانی آن، منابع آب زیرزمینی از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی به علت محدودیت منابع آب، از نظر کیفی و کمی و همچنین گسترش و وسیع سازندهای کارستی در سطح کشور، مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست به منظور بهره‌برداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۷]. منابع آب زیرزمینی کارستی از بزرگ‌ترین منابع آب شیرین جهان هستند به طوری که [۴] تخمین زده‌اند که آب شرب حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان از منابع آب موجود در سنگ‌های مناطق کارستی تأمین می‌شود. ایران نیز بعد از کشورهای آمریکا، چین و ترکیه، بالاترین درصد کارست را دارد و بیش از ۱۱ درصد سطح کشورمان را سازه‌های کارستی می‌پوشاند [۵]. حجم آب ذخیره شده در این مناطق می‌تواند نیاز آبی بسیاری از شهرها و روستاها را تأمین کند. شهرهای بزرگی همچون شیراز، کرمانشاه و مناطق وسیعی از استان ایلام، لرستان، کردستان و کهگیلویه و بویراحمد از منابع آب کارست تغذیه می‌کنند [۱، ۱۳]. در سازندهای کارستی صدها چشمه با دبی قابل ملاحظه و کیفیت بسیار خوب خارج می‌گردند. آب این چشمه‌ها می‌تواند مورد استفاده شرب، کشاورزی و آب‌معدنی قرار گیرد. کارست فرصت‌های زیادی برای بشر از نظر تأمین منابع آب، منابع اقتصادی و گردشگری ایجاد نموده است. از این فرصت‌ها است که می‌توان با برنامه‌ریزی منسجم و اصولی به توسعه اقتصادی محلی و در سطحی گسترده‌تر اقتصاد ملی کمک شایانی کرد. از طرفی عدم رعایت اصول توسعه پایدار در بهره‌برداری از منابع کارست، چالش‌های بزرگی برای محیط‌زیست ایجاد کرده است [۱۷]. سناریایک [۱۶] در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در سریلانکا به کمک تکنیک GIS پرداختند. آن‌ها ابتدا لایه‌های بارش، خطواره‌ها، شیب، زهکشی، کاربری زمین، پوشش زمین، سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی و خصوصیات

خاک را به دست آوردند. سپس این لایه‌ها با استفاده از روش وزن دهی ترکیب خطی، وزن دهی شدند. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل تغذیه متوسط تا زیاد تقریباً ۴۳ درصد است. [۱۰] با تلفیق سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه Timnavos در یونان پرداختند. برای به دست آوردن نقشه پتانسیل آب زیرزمینی از لایه‌های بارش، سنگ‌شناسی، پتانسیل تغذیه، تراکم خطواره، شیب، تراکم زهکشی و عمق آب‌های زیرزمینی استفاده شد. نتایج نشان داد که منطقه از نظر پتانسیل آب زیرزمینی دارای پنج کلاس خیلی خوب تا خیلی کم است. محققان مختلفی [۲، ۶، ۸، ۹، ۱۴، ۱۵] در تحقیقات خود به بررسی پتانسیل منابع آب زیرزمینی پرداختند. آبخوان‌های کارستی دارای سه منطقه تغذیه، انتقال و تخلیه می‌باشند. مناطق تغذیه، به‌عنوان تأمین‌کننده ورودی آبخوان، نقش اساسی در چرخه هیدرولوژیکی آبخوان‌های کارستی دارند. 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. تفاوت در نوع تغذیه منجر به تفاوت در ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها می‌گردد [۳]. به‌عبارت‌دیگر، ویژگی‌های منطقه تغذیه (زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، ژئومورفولوژی و...) در آبخوان‌های کارستی، نوع تغذیه، جریان و میزان آسیب‌پذیری آبخوان از آلودگی، کنترل می‌کند. در اطراف توده مورد بررسی، چشمه، تالاب و سراب‌های متعددی واقع شده است که تأمین‌کننده اصلی آب جوامع شهری و روستایی اطراف خود می‌باشند. بنابراین، می‌توان گفت این جوامع، وابسته به منابع آب کارست بوده و این منابع، به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب جوامع پیرامون خود، به دلیل بهره‌برداری

طول‌های جغرافیایی  $۵۲^{\circ} ۴۶'$  تا  $۴۷^{\circ} ۲۷'$  شرقی واقع شده است. ارتفاع حداکثر و حداقل آن، به ترتیب ۳۴۰۰ و ۱۲۹۶ متر از سطح دریا هست که نشان از مرتفع بودن این کوهستان دارد. چشمه‌های شاه حسین، ورمنج، خضرزنده، قلاع قیسوند، میراحمد و سرابله از این آبخوان تغذیه شده و خروجی آبخوان را تشکیل می‌دهند (جدول ۱ و شکل ۱).

## ۲.۲. روش تحقیق

### ۲.۲.۱. شناسایی و تهیه نقشه پراکنش

#### فروچاله‌های کارستی

استفاده از مدل‌سازی نقشه مدل رقومی ارتفاع در شناسایی فروچاله‌های کارستی، علاوه بر کاهش زمان و هزینه، دارای دقت زیادی بوده و نقشه لندفرم‌های کارستی به دست آمده دارای کاربردهای زیادی همچون شناسایی مناطق تغذیه، بررسی‌های هیدرودینامیکی، بررسی وضعیت بیلان آبی و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها، می‌باشند. به منظور تهیه نقشه پراکنش فروچاله‌ها با انجام بازدیدهای میدانی، فروچاله‌ها شناسایی و موقعیت مکانی آن‌ها با استفاده از دستگاه GPS برداشت شد. در ادامه برای جداسازی قله از فروچاله از شیب به‌عنوان فیلتر استفاده شد. آستانه شیب بیش از ۱۰ درجه برای قله‌ها و کمتر از ۱۰ درجه برای فروچاله‌ها در نظر گرفته شد. سپس منحنی‌های تراز بسته کمتر از ۱۰۰۰ متر استخراج شد. این منحنی‌ها هم نشان‌دهنده قله و هم فروچاله می‌باشند. برای جداسازی قله از فروچاله مرکز ثقل منحنی‌های بسته به دست آمد. آستانه منفی برای قله‌ها و مثبت برای فروچاله‌ها در نظر گرفته شد. در ادامه قله‌های باقی‌مانده حذف و نقشه فروچاله‌ها به دست آمد. با توجه به مطالب گفته‌شده، نقشه توزیع فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها در هر یک از توده‌های مورد بررسی، با استفاده از بازدید میدانی، تفسیر بصری و تحلیل مدل رقومی ارتفاع با استفاده از مدل‌های منحنی بسته، ترسیم گردید.

بی‌رویه، آلودگی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و خشک‌سالی‌های متعدد در طول چندین دهه گذشته در توده مورد بررسی، از لحاظ کمی و کیفی تحت فشار بوده است. بنابراین با توجه به تأثیر حیاتی منابع آب کارست در زندگی انسان و پژوهش‌های محدودی که در زمینه کارست صورت گرفته است، انجام هر نوع پژوهشی از دیدگاه بنیادی، کاربردی و توسعه‌ای در زمینه مدل‌سازی لندفرم‌های کارستی و بررسی پتانسیل منابع آب کارست این مناطق، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، شناخت مناطق تغذیه در آبخوان‌های کارستی نقش کلیدی در شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدرو شیمیایی آبخوان‌ها و همچنین مدیریت و بهره‌برداری علمی و بهینه از آن‌ها را دارد. هدف این تحقیق، مدل‌سازی مناطق تغذیه آبخوان آژوان-بیستون در استان کرمانشاه با استفاده از مدل KARSTLOP است. در این تحقیق، به منظور مدیریت بهینه منابع آب کارستی به لحاظ کمی و کیفی، شناخت آلودگی، آسیب‌پذیری و ارزیابی ریسک آبخوان، به مدل‌سازی مناطق تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از مدل KARSTLOP پرداخته شده است. مدل KARSTLOP توسط [۱۲] ارائه و در مناطق کارستی مونته‌نگرو مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج، حاکی از کارایی بالایی این مدل در تعیین مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی است.

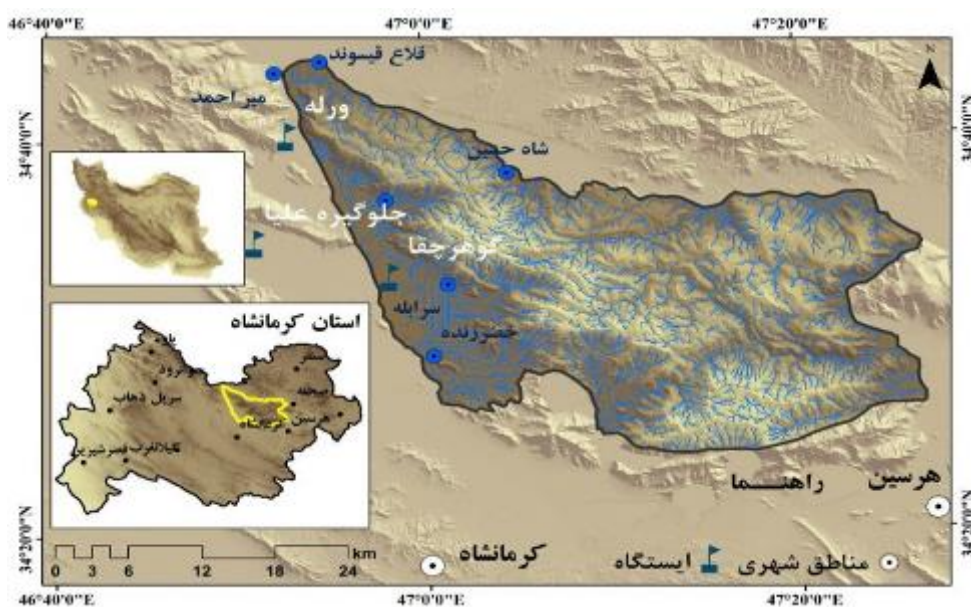
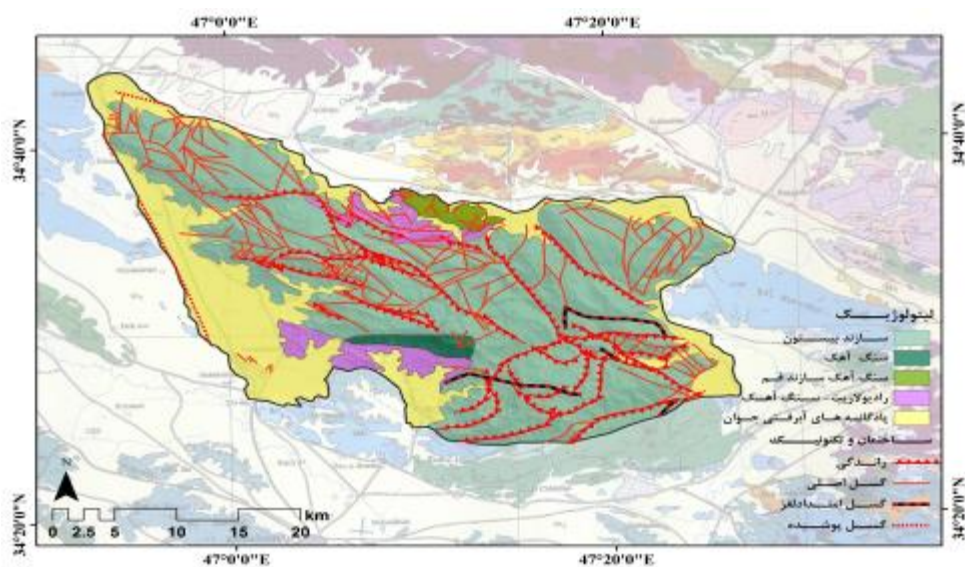
## ۲. روش شناسی

### ۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

آبخوان بیستون، منطبق بر کوهستان بیستون، در فاصله بسیار کوتاهی در شمال و شمال شرقی شهر کرمانشاه واقع شده و شهرهای صحنه و هر سین نیز با فاصله بسیار کوتاهی در شرق و جنوب شرقی آن واقع شده‌اند. مساحت این آبخوان، ۱۰۱۵ کیلومترمربع است. این کوهستان، با روند شمال غرب- جنوب شرق، بین عرض‌های جغرافیایی  $۲۴^{\circ} ۲۴'$  تا  $۳۴^{\circ} ۴۴'$  شمالی و

جدول ۱. خصوصیات زمین‌شناسی توده آژوان-بیستون

واحد سنگ‌شناسی	سن	ضخامت (متر)	لیتولوژی
واحد Rb	دوره تریاس	۳۰۰	آهک با لایه‌بندی سبتر در پایین و آهک‌های توده‌ای در بالاست
سازند بیستون (JKb)	ژوراسیک تا کرتاسه	۲۰۰۰	سنگ آهک فسیل شده
سازند قم (OM <sup>1</sup> )	الیگوسن پایانی و میوسن آغازی	۲۵۰	آهک‌های کرم رنگ متوسط تا ضخیم لایه سنگواره‌دار را شامل می‌شود
واحد Q <sup>2</sup>	کواترن	-	رسوبات آبرفتی، تراس‌های جوان رودخانه‌ای، انباشته‌های آواری سخت نشده



شکل ۱. نقشه لیتولوژی و زمین ساخت آژوان- بیستون و موقعیت توده آهکی آژوان- بیستون

می‌کند. بنابراین از این عملگر استفاده شد.

#### ۴,۲. پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه آبخوان‌های

##### کارستی

در این پژوهش جهت پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه آبخوان‌های کارستی به منظور مدیریت بهینه منابع آب کارستی به لحاظ کمی و کیفی، شناخت آلودگی، آسیب‌پذیری و ارزیابی ریسک آبخوان، از مدل KARSTLOP استفاده شد.

##### مدل KARSTLOP

این مدل در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 قابل اجرا بوده و قضاوت شخصی پژوهشگر، در انتخاب پارامترهای تحلیلی و تعریف معیارهای ارزشیابی و الگوریتم، دخیل است [۱۱]. در نهایت نیز، با بررسی پارامترهای این مدل و محاسبه میزان آن‌ها، نقشه نهایی تغذیه آبخوان با استفاده از رابطه (۱) تهیه شد. نقشه نهایی تغذیه، نشانگر توزیع مکانی تغذیه متوسط سالانه (Rch) بوده و میزان تغذیه به درصد بیان می‌گردد.

##### رابطه (۱)

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

بررسی این معادله نشان می‌دهد که به پارامترهای کارستیفیکاسیون، رواناب و سنگ‌شناسی، بیشترین امتیاز اختصاص داده شده است، پارامترهای KARSTLOP عبارت‌اند:

**نقشه میزان کارستی شدن (K):** نقشه میزان کارستی شدن از تجزیه و تحلیل میزان کارستی شدن سطحی و زیرسطحی ( $K_{ss}$ ) به دست می‌آید. نقشه نهایی درجه کارستی شدن با همپوشانی نقشه کارستی شدن سطحی ( $K_{sf}$ ) و نقشه کارستی شدن زیرسطحی ( $K_{ss}$ ) به دست می‌آید (رابطه ۲). لایه توسعه کارست (K) به عنوان مهم‌ترین لایه در مدل KARSTLOP مطرح بوده و تهیه آن نیازمند ترسیم

#### ۳,۲,۲. پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده

##### آهکی مورد مطالعه

از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، تأثیر به‌سزایی دارد، تهیه نقشه توسعه‌یافتگی سطحی کارست، لازم و ضروری است. به‌منظور توسعه کارست سطحی، متغیرهای سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی و خاک به‌عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب گردیدند. به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، از مدل منطق فازی و عملگر گاما استفاده گردید. ابتدا لازم است، تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی سازی شوند. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما، با توجه به ماهیت رستری آن‌ها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰/۳ نرم‌افزار ArcGIS و یا کد نویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی سازی گردیدند. تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست زایی دارد، تعیین گردیده است. مدل‌های فازی اغلب در مدل‌سازی مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب‌اند. تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صد درصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب است، زیرا با استفاده از نظریه فازی، می‌توان متغیرهای نادقیق و مبهم را، به شکل ریاضی درآورد. روش فازی با پنج عملگر که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل اجرا است. اجتماع فازی<sup>۱</sup>، اشتراک فازی<sup>۲</sup>، ضرب فازی<sup>۳</sup>، جمع فازی<sup>۴</sup> و گاما<sup>۵</sup>. عملگر گاما نقش تعدیلی نسبت به نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیک‌تر

<sup>۱</sup>Fuzzy SUM

<sup>۲</sup>Fuzzy Gamma

<sup>۳</sup>Recharge

<sup>۱</sup>Fuzzy OR

<sup>۲</sup>Fuzzy AND

<sup>۳</sup>Fuzzy Product

زیرسطحی ( $K_{ss}$ ) با توجه جدول (۲، ۳) تهیه شدند.

نقشه ژئومورفولوژی کارست سطحی، محاسبات هیدرولوژیکی و محاسبه نمایه اشباع (SI)<sup>۱</sup> است. نقشه میزان کارستی شدن سطحی ( $K_{sf}$ ) و نقشه میزان کارستی شدن

$$K = (k_{sf} + k_{ss}) / 2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

جدول ۲. وزن دهی به فاکتورهای نقشه کارستی شدن سطحی

سطح مناطق تخریب شده (کارن ها و غیره) بر واحد سطح	$k_{sf1}$	سطحی از فرورفتگی های کارستی بر واحد سطح	$k_{sf1}$	$K_{sf} = (k_{sf1} + k_{sf2}) / 2$
<۶۰	۱	<۲۵	۱	۱
۶۰-۱۲۰	۲	۲۵-۵۰	۲	>۱-۲
۱۲۰-۱۸۰	۳	۵۰-۷۵	۳	>۲-۳
۱۸۰-۲۴۰	۴	۷۵-۱۰۰	۴	>۳-۴
>۲۴۰	۵	>۱۰۰	۵	>۴-۵

جدول ۳. وزن دهی به فاکتورهای نقشه کارستی شدن زیرسطحی

$Q_{max}/Q_{min}$	$K_{ss1}$	V (cm/s)	$K_{ss2}$	$d > 4 \text{ km}$ SI	$d > 1-4 \text{ km}$ SI	$d < 1 \text{ km}$ SI	$K_{ss3}$	$K_{ss} = (k_{ss1} + k_{ss2} + k_{ss3}) / 3$
<۵	۱	<۰/۱	۱	>۰/۳	>۰	>۰/۳	۱	۱
۵-۵۰	۲	۰/۱-۱	۲	۰-۰/۳	-۰/۳-۰	-۰/۶-۰/۳	۲	>۱-۲
۵۰-۱۰۰	۳	۱-۱۰	۳	-۰/۳-۰	-۰/۶-۰/۳	-۰/۹-۰/۶	۳	>۲-۳
>۱۰۰	۴	>۱۰	۴	<-۰/۳	<-۰/۶	<-۰/۹	۴	>۳-۴
محدوده ۲۰۰ متر با اشیاء و موارد کشف شده موجود (مخصوصاً غارها، گودال ها و چاله های مکنده)								>۵

بهره گیری از نقشه مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۱۰ متر منطقه مورد بررسی، میزان دریافت تابش خورشید امتیازبندی گردید و در نهایت با بهره گیری از رابطه ۳ پارامتر A محاسبه می گردد.

$$A = (A_1 + A_2) / 2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

نقشه عوامل جوی ( $A_1$  و  $A_2$ ): شرایط جوی (A)

میزان تغذیه را در درجه اول از طریق تبخیر و تعرق تحت تأثیر قرار می دهد. شرایط دما و بارش را می توان به طور غیرمستقیم به عنوان یک تابع از ارتفاع ( $A_1$ ) در نظر گرفت. شدت تابش خورشیدی ( $A_2$ ) و جهت دامنه نیز مقدار تبخیر، تعرق و تغذیه را تحت تأثیر قرار می دهند. با

جدول ۴. وزن دهی به فاکتورهای نقشه ارتفاع

ارتفاع (متر)	$A_1$
i	۱
o	S
n	a
I	t
n	u
d	r
e	a
x	t

< ۳۰۰	۱
۳۰۰ - ۸۰۰	۲
۸۰۰ - ۱۳۰۰	۳
۱۳۰۰ - ۱۸۰۰	۴
> ۱۸۰۰	۵

بارندگی دارد. با توجه به نبود جریان دائمی در منطقه مورد مطالعه تمامی سطح منطقه دارای امتیاز ۵ است (جدول ۵).

**نقشه رواناب سطحی (R):** رواناب (R) در کارست بستگی به نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، شیب و میزان

جدول ۵. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه رواناب سطحی

R	سطحی در حوزه آبخیز که مربوط به چشمه‌های منطقه است
۱	محدوده ۲۰۰ متری در دو طرف رودخانه‌های دائمی که از خروج آب از سنگ‌های آهکی یا دولومیتی که بیشتر به بخش‌های کربناتی نزدیک هستند.
۳	محدوده ۲۰۰ متری در دو طرف رودخانه‌های دائمی که در لبه‌های فرورفتگی‌های کارستی (پلژه، اوولا و غیره) تشکیل شده‌اند. همان‌طور که در اطراف رودخانه‌های دائمی در اراضی غیر کارستی تشکیل شده‌اند.
۵	باقیمانده مساحت حوزه

رواناب تأثیر دارد. نقشه شیب (S) بر اساس DEM به‌دست آمده است (جدول ۶).

**نقشه شیب (S):** شیب زمین (S) یکی از عوامل اصلی است که باعث ایجاد رواناب می‌گردد و همچنین بر میزان

جدول ۶. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه شیب

S	شیب (درجه)
۵	۰ - ۵
۴	۵ - ۱۵
۳	۱۵ - ۲۵
۲	۲۵ - ۳۵
۱	> ۳۵

به‌دست آمده از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی، به‌عنوان مبنایی برای تولید نقشه TF و Td مورد استفاده قرار گرفت. سپس طبق (رابطه ۴) نقشه نهایی تکتونیک به دست آمد. جهت ایجاد این لایه که گسل‌ها، محور ناودیس‌ها و محور طاق‌دیس‌ها را شامل می‌شود از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور و نقشه خطواره‌های تکتونیک

**لایه عنا صر تکتونیک (T):** مقدار تغذیه آبخوان به میزان قابل توجهی تحت تأثیر درجه درز و شکافدار شدن توده سنگ است. در مناطق گسل خورده اصلی و مناطق با تخریب زمین ساختی، این میزان به وضوح بیشتر است. لایه عناصر تکتونیک (T) شامل دو زیر عامل است: تراکم گسل‌ها<sup>۱</sup> (Tf) و شیب لایه‌ها<sup>۲</sup> (Td). عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی، با اطلاعات

<sup>۱</sup>Density of faults

<sup>۲</sup>Dip of strata

لایه‌های نوع سنگ کربناته (فاکتور فرعی a)، لایه زیرین (فاکتور فرعی b) و مواد تشکیل‌دهنده‌های سنگ و کانی‌شناسی سنگ‌های کربناته (فاکتور فرعی c) تهیه گردید، سپس طبق (رابطه ۵) با ضرب نقشه‌های به دست آمده، نقشه نهایی سنگ شناسی به دست آمد (جدول ۹).

$$(L=a*b*c)$$

رابطه (۵)

۱:۵۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی استفاده و عناصر نام‌برده در نرم‌افزار Arc GIS استخراج و رقوم‌سازی شدند (جدول ۷، ۸).

$$T = (Tf + Td) / 2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

نقشه سنگ شناسی (L): ترکیب سنگ شناسی به‌طور مستقیم نفوذ پذیری و در نتیجه میزان تغذیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای تهیه نقشه سنگ شناسی،

جدول ۷. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه تراکم گسل‌ها

Tf	طول گسل‌ها (km/km <sup>2</sup> )
۱	۰ - ۱
۲	۱ - ۲
۳	۲ - ۳
۴	۳ - ۴
۵	> ۴

جدول ۸. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه شیب لایه‌ها

Td	شیب طبقات (درجه)
۱	< ۳۰
۲	۳۰ - ۶۰
۵	> ۶۰

جدول ۹. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه سنگ‌شناسی

سنگ‌های کربناته	آهک	A	۱
بستر	دولومیت	B	۰/۷
کانی‌های مواد تشکیل‌دهنده سنگ	بستر ضخیم و پر حجم	B	۲/۴
	سنگ‌بستر	C	۱/۸
	لامینه‌ها با لایه‌های نازک	C	۱/۲
	کلسیت		۲
	دولومیت		۱/۶
	سیلیسی		۱/۲
	مارن، بتمنس، رس		۰/۸

جلوگیری می‌کند. نقشه‌های خاک‌شناسی به‌عنوان پایه‌ای برای به دست آوردن نقشه رتبه‌بندی خاک (O<sub>1</sub>) استفاده شد. پوشش‌های زمین‌شناسی (O<sub>2</sub>) شامل رسوبات رانشی

نقشه لایه پو شاننده (O): لایه پو شاننده (O) نقش مهمی را در کاهش پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی برخی از اراضی دارد، عمدتاً به‌عنوان یک مانع اضافی که از نفوذ آب



تهیه نقشه پوشش گیاهی (P): پوشش گیاهی (P) بر میزان تغذیه تأثیر دارند. پوشش گیاهی بیشتر به‌طور مستقیم تبخیر و تعرق متوسط سالانه را افزایش می‌دهد و در نتیجه کاهش مقدار نفوذ آب را در بردارد. در مورد پوشش گیاهی و ویژگی‌های اصلی آن، توسعه سیستم ریشه و انشعاب شاخه، برای این لایه در نظر گرفته شد (جدول ۱۲).

نفوذپذیر بر روی سنگ‌های کربناته است که بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی به دست آمد. نقشه نهایی طبق رابطه (۶) از هم‌پوشانی نقشه‌های  $O_1$  و  $O_2$  به دست می‌آید (جدول ۱۱، ۱۰).

$$O = (O_1 + O_2) / 2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

جدول ۱۰. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه رتبه‌بندی خاک

O1 خاک	ضخامت (سانتی‌متر)				
	< ۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۱۰۰	> ۱۰۰
خاک‌های سیاه و سفید و قهوه‌ای (calcomelanosol)	۵	۴	۳	۲	۱
خاک‌های euthric soils خاک‌های منطقه معتدل هستند					
خاک Rendzina تیره، قهوه‌ای مایل به خاکستری، غنی از هوموس. این خاک نزدیک‌ترین ارتباط را با توجه به نوع سنگ‌بستر دارد.					
خاک calcocambisol اصلی‌ترین انواع خاک جنگلی در قلمرو مدیریت شده است.	۴	۳	۲	۱	۱
خاک terra rossa یک نوع از خاک رس قرمز تولید شده توسط هوازدگی سنگ آهک است.					

جدول ۱۱. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه رتبه‌بندی پوشش زمین‌شناسی

O2	ضخامت (متر)		
	< ۳	۳-۶	> ۶
پوشش سنگ‌شناسی			
رسوبات آبرفت، یخ‌رفت و سنگ‌ریزه	۵	۳	۱
رسوبات کوهرفتی	۳	۲	۱
لایه مواد آلی یخ‌رفت	۲	۱	۱

جدول ۱۲. وزن‌دهی به فاکتورهای نقشه پوشش گیاهی

گیاهان	P
صخره‌های لخت	۵
مناطق با پوشش گیاهی کم	۴
علفزارها و چراگاه‌ها	۳
بوته‌زارهای جنگل انتقالی	۲
جنگل‌ها	۱

شکل (۲) نقشه پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها و نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی بیستون را نشان می‌دهد که حاکی از توسعه‌یافتگی کارست سطحی در این منطقه است. نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی

### ۳. نتایج

۱،۳. پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها و پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی توده آژوان-بیستون

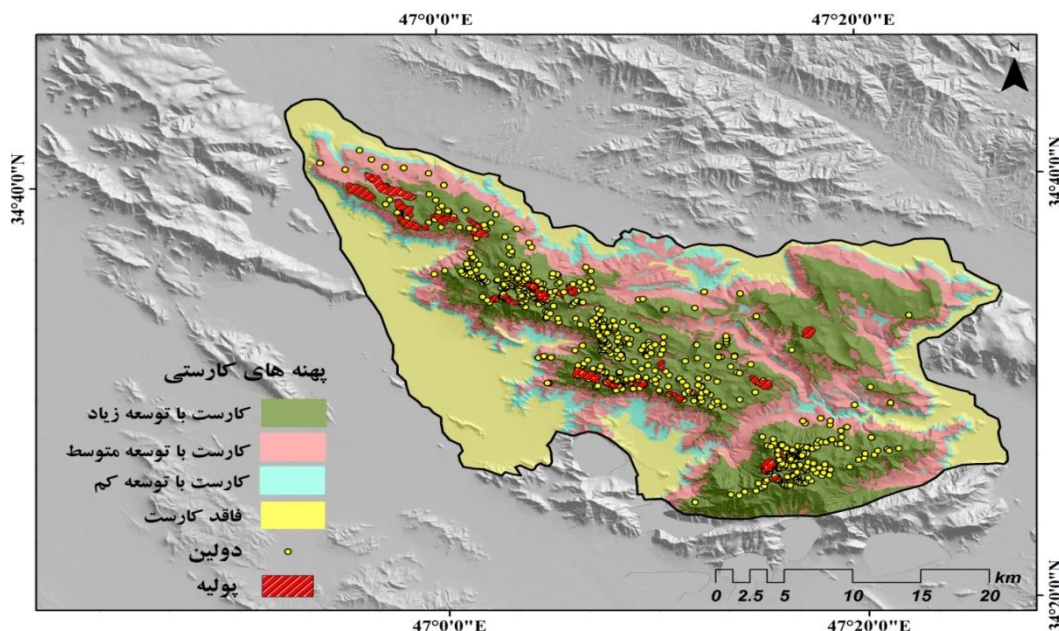
نشان می‌دهد. بررسی نقشه نهایی تغذیه توده بیستون (شکل ۴) و ژئومورفولوژی سطحی کارست آن، نشان می‌دهد که میزان تغذیه سالانه به دست آمده برای آبخوان کارستی بیستون بین ۳۶ تا ۸۳ درصد است. به عبارت دیگر، با توجه به پارامترهای ۸ گانه، بین ۳۶ تا ۸۳ درصد بارش ورودی سالانه نفوذ و تبدیل به تغذیه شده و ما بقی آن، از دسترس خارج می‌گردد. مساحت و درصد مساحت پهنه‌های توزیع تغذیه سالیانه توسط مدل KARSTLOP در جدول (۲) نشان داده شده است.

بیستون با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی<sup>۱</sup> به چهار کلاس فاقد کارست (۰-۱۳۹)، کارست با توسعه کم (۰/۳۵۶-۰/۱۳۹)، کارست با توسعه متوسط (۰/۵۵۴-۰/۳۵۶) و کارست توسعه یافته (۰/۹۸۵-۰/۵۵۴) طبقه‌بندی شده است.

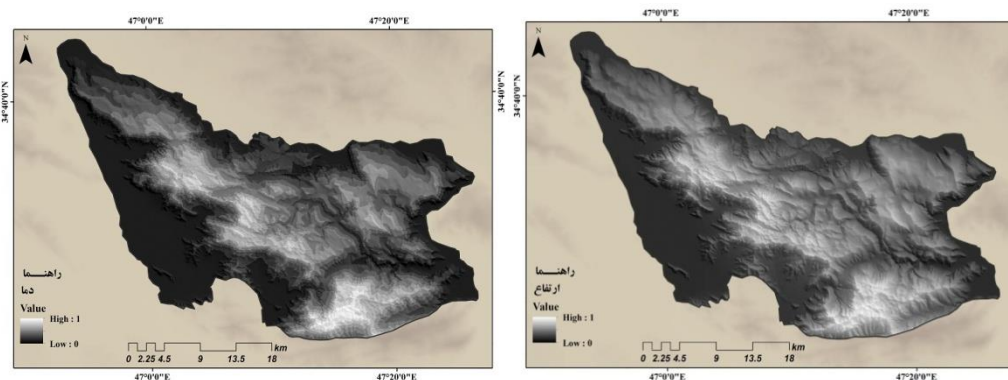
۲,۳. پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه توده

آژوان-بیستون

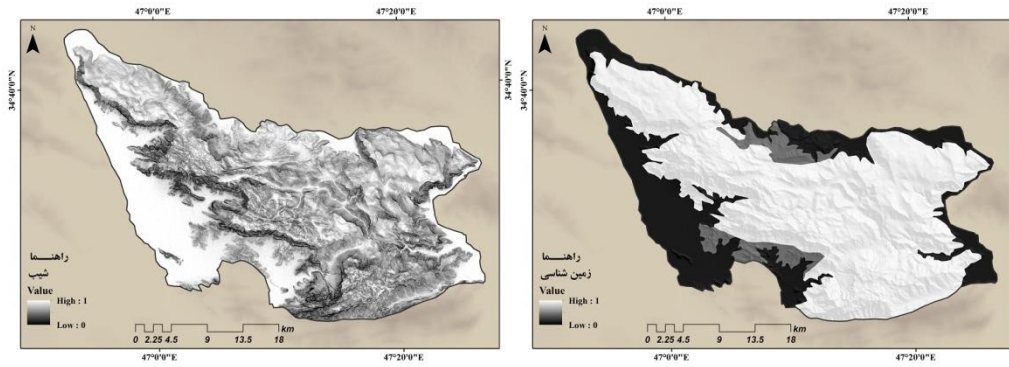
شکل (۳) نقشه‌های عوامل مدل KARSTLOP را



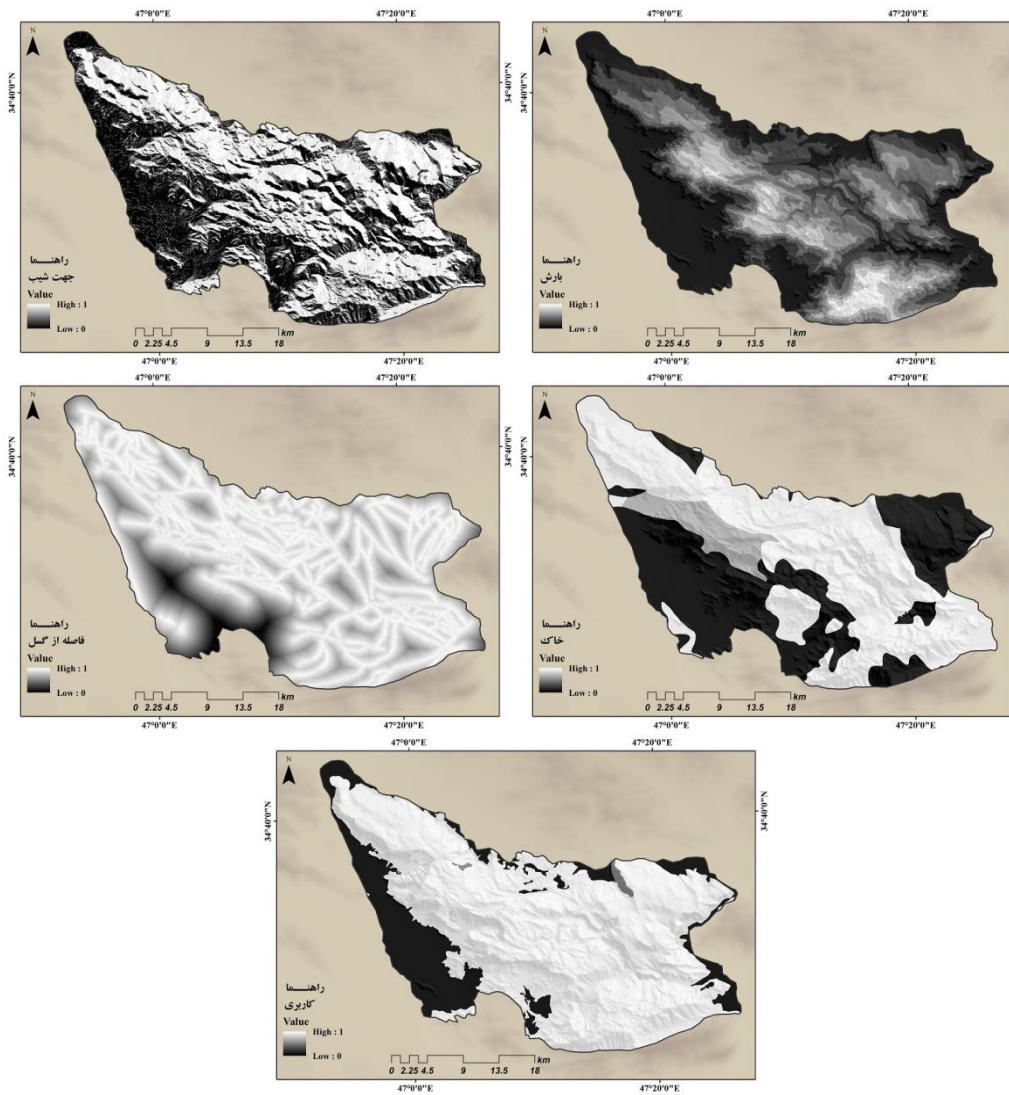
شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی توسعه یافته و پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌های توده بیستون



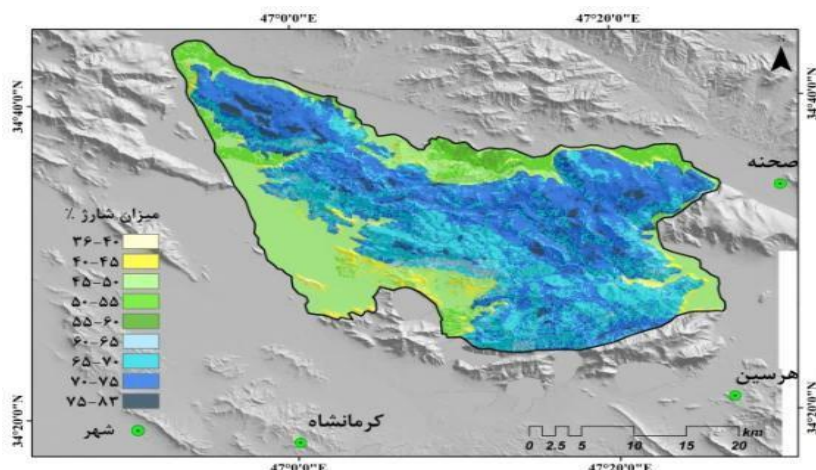
<sup>۱</sup>Natural Breaks (Jenks)



شکل ۳. نقشه‌های عوامل مدل KARSTLOP



ادامه شکل ۳.



شکل ۴. نقشه نهایی توزیع فضایی تغذیه آبخوان با استفاده از مدل KARSTLOP در بیستون

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت پهنه‌های توزیع تغذیه سالیانه توسط مدل KARSTLOP

ردیف	تغذیه (درصد)	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت
۱	۴۰-۳۶	۳	۰/۲۹
۲	۴۰-۴۵	۳۵/۴۸	۳/۴۹
۳	۴۵-۵۰	۲۱۷/۶۶	۲۱/۴۶
۴	۵۰-۵۵	۶۷/۳۳	۶/۶۳
۵	۵۵-۶۰	۸/۵۵	۰/۸۴
۶	۶۰-۶۵	۲۹/۳۰	۲/۸۸
۷	۶۵-۷۰	۲۷۲/۱۶	۲۶/۸۳
۸	۷۰-۷۵	۳۴۴/۱۹	۳۳/۹۳
۹	۷۵-۸۳	۳۶/۵۳	۳/۶۰
	جمع	۱۰۱۴/۲۴	۱۰۰

نسبت به سایر مناطق کربناته آن می‌باشند. پولیه‌های شکل گرفته در توده بیستون، بیشتر از نوع ساختاری بوده و در امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند. وجود شکستگی‌ها و درزهای فراوان در زون زاگرس مرتفع و خلوص بالای آهک سازند کربناته بیستون، نقش مهمی در توسعه و شکل‌گیری پولیه‌های بیستون دارد. بر اساس نقشه توسعه کارست سطحی به دست آمده (شکل ۳)، طبقه فاقد کارست که بیشترین مساحت توده آژوان- بیستون را به خود اختصاص داده، منطبق بر سطح دشت‌های شمالی شهر کرمانشاه و دشت‌های منتهی به رودخانه گاماسیاب و نهشته‌های کواترنری و آهک‌های بیوکلاسیک سیلیسی است. جهت

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نقشه پراکنش فضایی فروچاله‌ها و پولیه‌ها نشان داد که بیشترین تراکم فروچاله‌ها (بیش از ۹۸ درصد) 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 کارستی شدن را در سازند بیستون نسبت به دیگر سازندهای آهکی منطقه نشان می‌دهد. البته سازند بیستون به علت گسترش بیشتر سنگ‌های آهکی با درجه خلوص بالا و ارتفاع بیشتر، دارای شرایط اقلیمی مساعدتری جهت فرایند کارست شدن

درصد است. بیشترین میزان تغذیه در نواحی با بیش از ۷۸ درصد تغذیه، منطبق بر سطح هموار پولیه‌ها که دارای فروچاله می‌باشند، رخ داده و کمترین میزان تغذیه ۳۶ تا ۴۰ درصد و ۴۰ تا ۴۵ درصد نیز در دشت‌های آبرفتی روی می‌دهد. در سطح دشت‌های اطراف کوه آژوان- بیستون، میزان تغذیه بین ۴۵ تا ۵۰ درصد و ۵۰ تا ۵۵ درصد و ۶۰ تا ۶۵ درصد است. این مناطق مجموعاً بیش از ۲۸ درصد مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که منطبق بر نهشته‌های کواترنری می‌باشند. مناطق با تغذیه بین ۶۰ تا ۶۵ درصد و ۶۵ تا ۷۰ درصد به صورت مناطق پراکنده دامنه‌های خرده شده با درزه و شکاف‌های زیاد را به خود اختصاص داده‌اند. این دامنه‌ها علی‌رغم شیب نسبتاً زیاد، به شدت خرده شده و اغلب به صورت رخنمون‌های سنگی درزه و شکاف‌دار است. همچنین خاک این دامنه‌ها کم ضخامت و پوشش گیاهی آن تنک و به این علت، میزان نفوذ در این مناطق زیاد هست. مناطقی با تغذیه بین ۷۰ تا ۷۵ درصد بر سطح کوهستان بیستون و توده آهکی دوره کرتاسه بیستون منطبق بوده و بیش از ۳۳ درصد مساحت بیستون را به خود اختصاص داده است. نواحی با تغذیه بین ۷۵ تا ۸۳ درصد منطبق بر پولیه‌های رأس کوه بیستون بوده و بیش از ۳ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرند. شیب این نواحی کم، خاک آن‌ها کم ضخامت و درشت‌دانه، پوشش گیاهی تنک و ژئومورفولوژی کارست توسعه یافته و منطبق بر سازند بیستون و به شدت تکتونیزه هست. وجود فروچاله‌ها و پونورها و کارن و امکان تغذیه متمرکز از طریق آن‌ها، نقش بسیار مهمی در بالا بودن میزان تغذیه در این نواحی دارا است. موارد گفته شده، بیانگر نقش اصلی ژئومورفولوژی کارست کوه بیستون در توزیع مکانی مقادیر تغذیه در آبخوان است که با نتایج [۲۰] منطبق است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده نقش بالای لیتولوژی و کارستی شدن در پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه کارستی است که این نتایج با یافته‌های [۱۹] هم‌خوانی دارد. نتایج پهنه‌بندی تغذیه با نتایج حاصل از پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، کاملاً

شیب‌های جنوبی، جنوب غربی و غرب، تأثیر کم عامل زمین‌ساخت و ارتفاع، بارش کم و ماندگاری کم آن، پوشش گیاهی کم تراکم و مبتنی بر زراعت و کشاورزی، اصلی‌ترین عوامل در توسعه نیافتگی کارست در این طبقه می‌باشند. طبقه با توسعه کارست کم، بر حواشی تاقدیس بیستون و کوهپایه‌های آن منطبق است. بخش‌های کمی از آهک بیستون و قم و همچنین رادیولاریت و سیلیس در این طبقه واقع شده‌اند. این طبقه دارای شیب زیاد، مراتع کم تراکم است. طبقه با توسعه متوسط کارست بر آهک بیستون و بر دامنه‌های تاقدیس بیستون و همچنین این طبقه بر مناطق با تراکم گسل‌ها و درزه و شکاف‌ها بالا، دامنه‌های رو به آفتاب کوهستان، ارتفاع و بارش زیاد، دمای کم، مراتع نیمه متراکم تا متراکم منطبق هست. طبقه کارست با توسعه زیاد بر مرتفع‌ترین قسمت‌های تاقدیس بیستون واقع در آهک بیستون، با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل‌ها، دارای بیشینه بارش، واقع در جهت شیب‌های شمال، شمال شرقی و شرقی، وجود پوشش گیاهی به صورت مرتع متراکم، ارتفاع بالا و بارش به صورت برف و دمای بسیار کم واقع شده است. ارزیابی نقش پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی توده بیستون با نقشه پراکنش پولیه‌های کارستی حاکی از دقت بالای این مدل در ارزیابی توسعه کارست سطحی است. از ۲۵ پولیه شناسایی شده در توده مورد مطالعه، ۲۰ پولیه در پهنه کارست با توسعه زیاد، ۵ پولیه در طبقه با توسعه متوسط کارست واقع شده‌اند. همچنین هم‌پوشانی لایه فروچاله‌های شناسایی شده در بیستون با نقشه پهنه‌بندی نهایی نیز نشان می‌دهد که در حدود ۷۹ درصد از فروچاله‌ها در طبقه کارست توسعه یافته و ۲۱ درصد از آن‌ها در طبقه کارست با توسعه متوسط واقع شده‌اند. قرار گرفتن در حدود ۹۶ درصد فروچاله‌ها در این دو طبقه، حاکی از کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این توده است. بررسی نقشه نهایی تغذیه توده بیستون و ژئومورفولوژی سطحی کارست آن، نشان می‌دهد که میزان تغذیه سالانه به دست آمده برای آبخوان کارستی بیستون بین ۳۶ تا ۸۳

که باید تدابیر لازم به منظور برداشت صحیح و محافظت از آن صورت پذیرد.

منطبق است. بالا بودن میزان تغذیه و همچنین توزیع مکانی مناطق تغذیه آبخوان، نشان می‌دهد که این آبخوان دارای پتانسیل بالایی در ذخیره منابع آب زیرزمینی است

## References

- [1] Afrasiabian, A. (2007). The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environmental geology*, 52(4), 673-677.
- [2] Amin, M. M., Veith, T. L., Collick, A. S., Karsten, H. D., & Buda, A. R. (2017). Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst watershed: A variable source area hydrology model evaluation. *Agricultural Water Management*, 180, 212-223.
- [3] Bagheri, S., Davoodi, M., Yarahmadi, D., Jafari-Agdam, M., & Soltani, M. (2013). Assessing and mapping the vulnerability of karstic aquifer using gis and cop model.
- [4] Ford, D., & Williams, P. D., (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- [5] Hamidzadeh, F., Kalantari, N., Keshavarzi, M. (2012). Hydrogeological and geo-structural assessment of the Dareh-e-Anari spring in the Shirin Bahar karstic area, Khuzestan province. *Iran-Water Resources Research*. Issue 24, Page 30-40.
- [6] Kumar, A., & Pandey, A. C. (2016). Geoinformatics based groundwater potential assessment in hard rock terrain of Ranchi urban environment, Jharkhand state (India) using MCDM–AHP techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 2, 27-41.
- [7] Lashnizand, M., Gholamrezaee, S. (2012). Investigating the relationship between climatic variables and drainage of karstic heads in order to manage urban water resources (Case study: Khorramabad city). *Journal Of Environmental Based Territorial Plannig*. Issue 15, Page 61-80.
- [8] Moradi, S., Kalantari, N., & Charchi, A. (2016). Karstification Potential Mapping in Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Fuzzy Logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques. *Geopersia*, 6(2), 265-282.
- [9] Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3), 158-172.
- [10] Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197-208.
- [11] Radulovic, M. M. (2009). KARSTLOP method–Multiparameter analysis of karstic terrains potential for effective infiltration. *Fac. Min. Geol., University of Belgrade, Belgrade*.
- [12] Radulovic, M., Stevanovic, Z., & Radulovic, M. (2012). A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies. *Environmental Earth Sciences*, 65(8), 2221-2230.
- [13] Raeisi, E. (2008). Ground-water storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries. *Journal of cave and Karst studies*, 70(1), 62-70.
- [14] Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372.
- [15] Rahmati, O., Samani, A. N., Mahmoodi, N., & Mahdavi, M. (2015). Assessment of the contribution of N-fertilizers to nitrate pollution of groundwater in western Iran (Case Study: Ghorveh–Dehgela Aquifer). *Water Quality, Exposure and Health*, 7(2), 143-151.

- [16] Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124.
- [17] Taheri, K., Raeesi, E. (2010). Iran's Cartesian Resources Introduction to a Concept. [https://www.civilica.com/Paper-INCWR01-INCWR01\\_182.html](https://www.civilica.com/Paper-INCWR01-INCWR01_182.html).
- [18] Venkateswaran, S., & Ayyandurai, R. (2015). Groundwater potential zoning in upper Gadilam river basin Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4, 1275-1282.
- [19] Vaezihir, A., Vafadar, M., Aghaie, V. (2019). Evaluation of groundwater potential in the karstic and hard rock formations of Moro Mountain using AHP, SAW and F-AHP methods. *Journal of geographical-space*. 18(64), 215-234.
- [20] Entezari, M., Yamani, M., Jaafari-aghdam, M. (2015). Spatial modeling of feeding areas of karst aquifers using KARSTLOP model (case study: Khorestan karstic aquifer). Issue2, 121-137.