پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال هشتم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۸
صص. ۱۵-۱

ارزیابی مناطق مناسب تغذیه آبخوان کارستی پرآو–بیستون با استفاده از مدل KARSTLOP

مهرنوش قدیمی– استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران.
ساسان زنگنه‌تبار*– کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴ تائید نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

چکیده

ویژگی‌های منطقه تغذیه در آبخوان‌های کارستی بر نوع تغذیه، جریان و میزان آسیب‌پذیری آبخوان از آلودگی موثر است. 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 دارد. آبخوان پرآو-بیستون به دلیل داشتن ۱۵ چشمه دائمی و پرآب نقش مهمی در تامین آب شرب و کشاورزی نواحی اطراف خود دارد. در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد تغذیه آبخوان پرآو-بیستون، از مدل KARSTLOP استفاده شده است. این مدل از ۸ لایه فرایند کارست زایی (توسعه کارست)، شرایط جوی، رواناب، شیب، تکتونیک، سنگ‌شناسی، لایه پوشاننده و پوشش گیاهی تشکیل شده است. با اجرای مدل، نقشه نهایی میزان تغذیه آبخوان پرآو-بیستون به دست آمد. طبق نقشه نهایی، طبقه با میزان تغذیه ۷۰ تا ۸۰ درصد، بیشترین درصد (۶۵ درصد) از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود و مناطق با بیشترین میزان تغذیه(بالای ۸۰ درصد)، منطبق بر راس کوه مرتفع پرآو و مناطق هموار راس سایر کوه‌های میانی بود. هم‌چنین در کل حدود ۹۶ درصد از مساحت آبخوان پرآو-بیستون دارای پتانسیل تغذیه ۶۰ درصد به بالا است که بیانگر بالا بودن میزان نفوذپذیری این آبخوان است این امر نشان می‌دهد که آبخوان مورد نظر در برابر انتشار آلودگی آسیب‌پذیر بوده و نیازمند برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی است.

واژگان کلیدی: کارست، منابع آب، آبخوان پرآو-بیستون، تغذیه، مدل KARSTLOP.

* نویسنده مسئول: E-mail: Zangenegeo154@gmail.com

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهمترین منابع طبیعی جهانی برای جوامع و نیز فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی است (مناپ[۱] و همکاران، ۲۰۱۴، ۷۱۳). با توجه به افزایش جمعیت و به دنبال آن نیاز روزافزون به این منبع، بر ضرورت و اهمیت وجود آب به عنوان منبعی حیات‌بخش افزوده می‌شود. تقریباً یک پنجم از سطح کره زمین توسط سازندهای مختلف کربناته پوشیده شده است (لاموراکس[۲]، ۱۹۹۱، ۲۱۸). از طرف دیگر بیش از ۲۵ درصد جمعیت جهان یا مستقیماً بر روی مناطق کارستی زندگی می‌کنند و یا آب مورد نیاز خود را از منابع کارستی تأمین می‌نمایند (فورد و ویلیامز[۳]، ۲۰۰۷، ۲۳۵). در ایران حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور و حدود ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس از سازندهای کارستی تشکیل شده است (افراسیابیان، ۱۳۷۷، ۱۲۸). با توجه به شرایط آب و هوایی منحصر به فرد ایران، کمبود بارش و توزیع و زمان‌بندی فضایی ناکافی و همچنین کمبود منابع آب از نظر کیفیت و کمیت و گسترش گسترده سازند کارست در سراسر کشور، مطالعه منابع آب کارست بسیار مهم است (یه[۴] و همکاران، ۲۰۰۹، ۸۶ و جرنر[۵] و همکاران، ۲۰۱۲، ۲). توپوگرافی ویژه کارست، در ارتباط با زهکشی زیرزمینی است و نقش مهمی در تغذیه آبخوان‌های کارستی دارد. آبخوان‌های کارستی، سنگ‌های کربناته‌ای هستند که دارای آب زیرزمینی با قابلیت بهره‌برداری می‌باشند (باکالوویچ[۶]، ۲۰۰۵، ۱۵۰). در واقع، آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی بوده که آب را در شبکه‌ای از درزه و شکاف‌های به هم پیوسته، غارها و کانال‌ها ذخیره می‌کنند (میلانوویچ[۷]، ۲۰۰۵، ۲۱۷). به طورکلی آبخوان‌های کارستی دارای سه منطقه تغذیه، انتقال و تخلیه می‌باشند. مناطق تغذیه، به عنوان تأمین کننده 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 (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۲۲). به طورکلی سه نوع تغذیه خودزا، دگرزا و مخلوط در آبخوان‌های کارستی وجود دارد (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷، ۲۵۲). به اعتقاد فورد و ویلیامز تفاوت در نوع تغذیه منجر به تفاوت در ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها می‌گردد. به عبارت دیگر، ویژگی‌های منطقه تغذیه در آبخوان‌های کارستی بر نوع تغذیه، جریان و میزان آسیب‌پذیری آبخوان از آلودگی موثر است. 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.

سابقه مطالعه تغذیه آب‌های زیرزمینی به اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط شارما[۸] (۱۹۸۹)، لرنر[۹] و همکاران (۱۹۹۰)، سیمرز[۱۰] و همکاران (۱۹۹۷) و هیلی[۱۱] (۲۰۱۰) برمی‌گردد. مطالعات انجام گرفته در زمینه تغذیه آبخوان‌های کارستی در حیطه مباحث هیدرودینامیکی و تعیین نوع تغذیه و نوع جریان بوده و بر ویژگی‌های منطقه انتقالی آبخوان تاکید داشته‌اند.

---

۱ Manap

۲ Lamoreaux

۳ Ford and williams

۴ Yeh

۵ Gerner

۶ Bakalowicz

۷ Milanovic

۸ Sharma

۹ Lerner

۱۰ Simmers

۱۱ Healy

ازجمله این پژوهش‌ها می‌توان به پرتوگز[۱] و همکاران (۲۰۰۵)، کوواکس و ساوتر[۲] (۲۰۰۷)، گیر[۳] و همکاران (۲۰۰۸)، هوگس[۴] و همکاران (۲۰۰۸)، جانزا[۵] (۲۰۱۰)، سانتوس و اندرو[۶] (۲۰۱۰)، کوهتا[۷] و همکاران (۲۰۱۲)، مایود[۸] و همکاران (۲۰۱۴)، استیاکاکیس[۹] (۲۰۱۸)، کلانتری و روحی (۲۰۱۸)، حسینی و همکاران (۱۳۹۴)، بهرامی و همکاران (۱۳۹۵)، قبادی و همکاران (۱۳۹۶) و حاتمی‌فرد و همکاران (۱۳۹۷)، اشاره کرد. اما مدل KARSTLOP به عنوان مدل مورد استفاده در این پژوهش، اولین بار توسط رادوویچ[۱۰] و همکاران ابتدا در سال ۲۰۱۲ به منظور تعیین مناطق تغذیه منطقه کارستی مونته‌نگرو[۱۱] و سپس در سال ۲۰۱۵ برای حوضه دریاچه اسکادار[۱۲] ارائه شد و نتایج، حاکی از کارایی بالای این مدل در تعیین مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی می‌باشد.

با توجه به افزایش جمعیت و نیاز روز افزون به منابع آب سالم، شناسایی و دور نگه داشتن این منابع از آلودگی‌های محیطی یکی از اولویت‌های مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. منابع آب کارستی مهم‌ترین منبع تامین آب در استان کرمانشاه می‌باشد (باقری و همکاران، ۱۳۹۴، ۳۳۵). آبخوان کارستی پرآو–بیستون به دلیل داشتن ۱۵ چشمه پرآب و دائمی، سهم مهمی در تامین آب شرب و کشاورزی ساکنان نواحی اطراف این توده کارستی دارد. با توجه به جنس سنگ‌شناسی که غالبا از آهک و دولومیت می‌باشد، رخنمون سنگی و با پوشش نازک خاک، ارتفاع زیاد و به تبع بارش فراوان نسبت به نواحی کم‌ارتفاع اطراف و وجود اشکال کارستی توسعه یافته احتمال تغذیه فراوانی را برای این آبخوان می‌توان متصور شد. به همین منظور شناخت و تعیین میزان تغذیه این آبخوان با مدل KARSTLOP می‌تواند در مدیریت، شناخت منابع آلاینده، ارزیابی ریسک و حفاظت منابع آب آن از آلودگی موثر باشد.

مواد و روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

توده کوهستانی پرآو–بیستون واقع در استان کرمانشاه دارای روند شمال‌غربی–جنوب شرقی است. این توده از نظر ژئومورفولوژی، جزئی از زون زاگرس مرتفع است. مساحت آن ۹۳۰/۵ کیلومتر مربع و محیط آن ۴۴۹ کیلومتر می‌باشد. موقعیت جغرافیایی آن از ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۴درجه و ۴۴دقیقه عرض شمالی و از ۴۶درجه و ۵۳دقیقه تا ۴۷درجه و ۲۷دقیقه طول شرقی می‌باشد. کوه پرآو با ۳۳۸۵ متر از سطح دریا بلندترین نقطه و حداقل ارتفاع منطقه مورد مطالعه ۱۲۸۴متر می‌باشد. شکل ۱، موقعیت آبخوان پرآو–بیستون را نشان می‌دهد. این آبخوان، جزئی از زون زاگرس مرتفع می‌باشد. سنگ‌های آهکی بیستون و رادیولاریت‌های کرمانشاه واحدهای اصلی منطقه را تشکیل می‌دهند. کهن‌ترین بخش

---

۱ Portoghese

۲ Kovacs and sauter

۳ Geyer

۴ Highes

۵ Janza

۶ Santos and Andreu

۷ Kuhta

۸ Mayaud

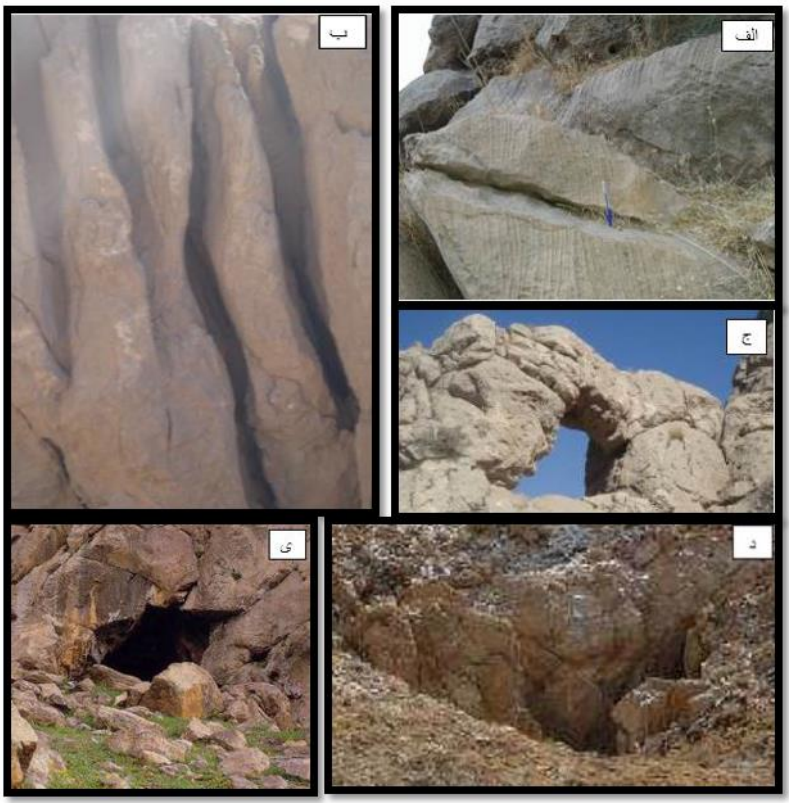
۹ Steiakakis

۱۰ Radulovic

۱۱ Montenegro

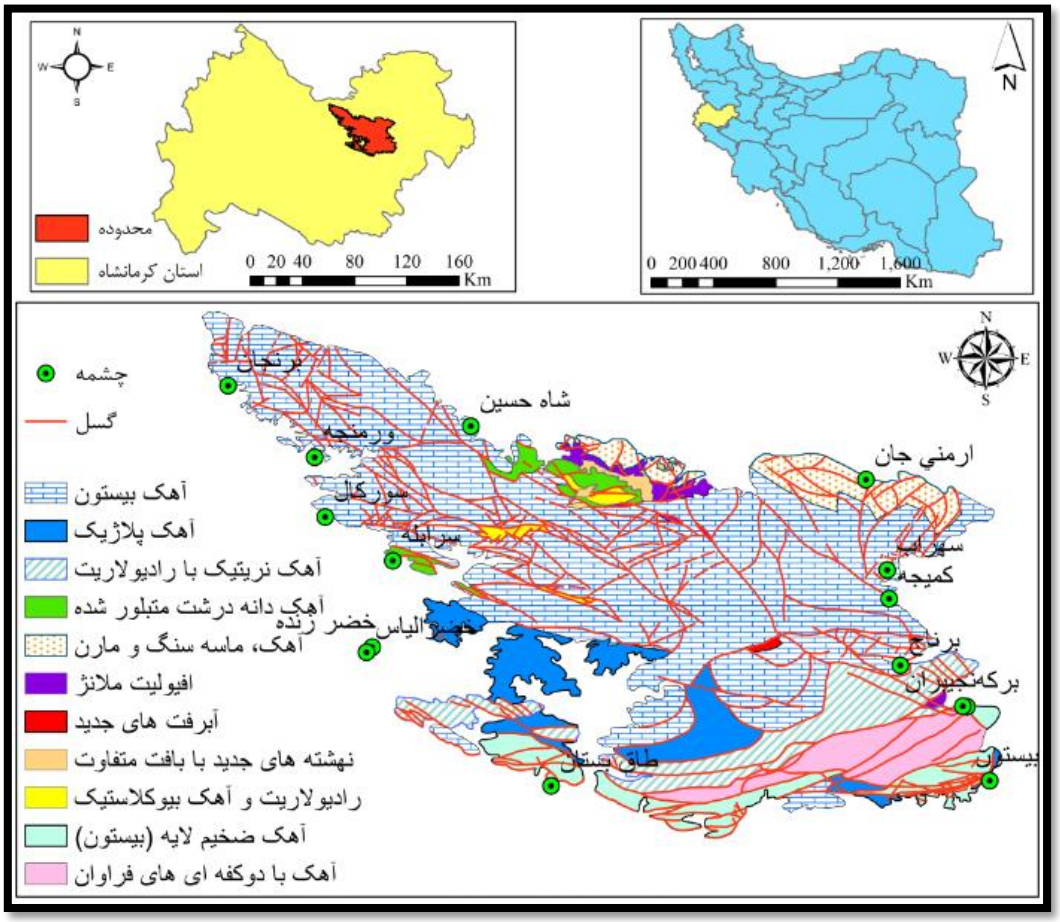
۱۲ Skadar

آهک‌های بیستون، شامل آهک‌های ستبر لایه در زیر و آهک‌های توده‌ای ریفی در بالا به ضخامت حدود ۳۰۰ متر است که دیرینه تریاس بالا دارد (براود[۱]، ۱۹۸۹). واحدهای ژوراسیک بالایی بیستون، آهک‌های ستبرلایه‌ای هستند که صخره‌های کوه بیستون را تشکیل می‌دهند. واحد آهکی بیستون با حدود ۷۴ درصد از مساحت منطقه، مهم‌ترین واحد آهکی در توده پرآو–بیستون است. رادیولاریت‌ها با مساحتی حدود ۲۰ درصد، دیگر واحد سنگ‌شناسی منطقه هستند و شامل رادیولاریت‌هایی با نسبتی از گل‌سنگ، آهک سیلیس‌دار، طبقاتی از چرت رادیولاریتی و سنگ رس‌دار و آهک‌های بیوکلاستیک است. جهت غالب گسل‌های منطقه مورد مطالعه به تبعیت از گسل‌های اصلی زاگرس شمال‌غربی–جنوب-شرقی است. معمولاً مجاری کارستی از مسیر گسل‌ها، درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی تبعیت می‌نمایند. افق‌هایی که دارای دو یا چند گسل هستند و یا همدیگر را قطع می‌کنند مستعدترین نقاط برای فرآیند کارستی شدن می‌باشند (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹، ۱۵۷). گسل‌ها به دلیل تاثیر بر مقدار نفوذ و تغذیه منابع آب زیرزمینی از پارامترهای مهم زمین شناسی می‌باشند. انواع اشکال کارستی از کارن‌های سطحی گرفته تا فروچاله‌های متعدد در این توده کارستی شکل گرفته‌اند. شکل۱، اشکال کارستی توده کارستی پرآو–بیستون و شکل ۲، نقشه سنگ‌شناسی و موقعیت گسل‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل۱ . نمونه اشکال کارستی توده پرآو–بیستون: الف و ب) لاپیه(کارن): (الف: دامنه جنوبی طاق بستان و ب: دامنه کوه بیستون)، ج) طاق سنگی: ارتفاعات پرآو، د) فروچاله (دولین): ارتفاعات پرآو و ی) غار مر تاریک در دامنه کوه بیستون.

[۱] Braud



شکل۲. موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین‌شناسی آبخوان پرآو-بیستون

روش کار

این پژوهش یک تحقیق توسعه‌ای-کاربردی است که بر روش‌های میدانی، ابزاری و کتابخانه‌ای متکی است. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی مکانی مناطق تغذیه آبخوان پرآو-بیستون از مدل KARSTLOP استفاده شد. 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 و P: پوشش گیاهی می‌باشد. این مدل در محیط نرم‌افزار Arc GIS قابل اجرا بوده و قضاوت شخصی پژوهشگر در انتخاب پارامترهای تحلیلی و تعریف معیارهای ارزیابی و الگوریتم دخیل می‌باشد. لایه توسعه کارست (K) به عنوان مهمترین لایه در مدل KARSTLOP مطرح بوده و تهیه آن نیازمند بررسی و تعیین موقعیت اشکال کارستی، محاسبات هیدرولوژیکی و محاسبه نمایه اشباع (SI) می‌باشد. لایه‌های شرایط جوی (A)، رواناب (R) و شیب (S) بر اساس Dem ده متر منطقه تهیه شدند و لایه‌های تکتونیک (T) و لیتولوژی (L) با استفاده از نقشه زمین شناسی کرمانشاه، کامیاران و میانراهان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰تهیه گردید. لایه پوشش سطحی (O) از نقشه خاک منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و لایه پوشش گیاهی (P) از نقشه کاربری اراضی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ به دست آمد. جهت تعیین منشأ کارستی بودن آب چشمه‌های تغذیه شده از آبخوان پرآو-بیستون و همچنین برای محاسبات هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی از اطلاعات چشمه‌ها برگرفته از آب منطقه‌ای استان کرمانشاه و برای تهیه نمودار پایپر آنها از نرم افزار RockWare Aq.Qa و از نرم‌افزار PHREEQC به منظور محاسبه نسبت اشباع، استفاده شد. از روش Fill Sink برای استخراج فروچاله‌ها از DEM ده متری منطقه مورد مطالعه استفاده

شد و بازدیدهای میدانی جهت شناسایی ژئومورفولوژی کارست سطحی و ثبت موقعیت لندفرم‌ها و بررسی صحت نتایج روش Fill sink به عمل آمد. به منظور مدل‌سازی مدل مذکور از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰,۳ استفاده شده است.

K - Karstification

Area of degraded zone (karren fields, etc) Per unite square	Ksf1	Area of karst despressios per unite square	Ksf2	Ksf= (ksf1 + ksf2)/2
<60	1	<25	1	1
60 - 120	2	25 - 50	2	>1 - 2
120 - 180	3	50 - 75	3	>2 - 3
180 - 240	4	75 - 100	4	>3 - 4
>240	5	>100	5	>4 - 5

Qmax/Qmin	Kss1	V (cm/s)	Kss2	d > 4 km SI	d > 1-4 km SI	d < 1 km SI	Kss3	Kss= (kss1 + kss2 + kss3) / 3
<5	1	<0.1	1	>0.3	>0	>-0.3	1	1
5 - 50	2	0.1 - 1	2	0.3 - 0	0 - -0.3	-0.3- -0.6	2	>1 - 2
50 - 100	3	1 - 10	3	0 - -0.3	-0.3 - -0.6	-0.6 - -0.9	3	>2 - 3
>100	4	>10	4	<-0.3	<-0.6	<-0.9	4	>3 - 4
Zone of 200 m from all sides of speleogically explored sibsurface objects								5

A – Atmospheric conditions

Altitude (m)	A1
<300	1
300 - 800	2
800 - 1300	3
1300 - 1800	4
>1800	5

A= (A1 + A2) / 2

Reflectance value	A2
>0.5	1
<0.5	5

R - runoff

Surface within the catchment area of referrred spring	R
Zone of 200 m from both sides of perenial streams formed by discjarge of contect of karstificated limestone or dolomite with more compact carbonate sections	1
Zone of 200 m from both sides of perennial streams formed at the edge of karst depressins (polie, uvala etc.) as well as around perennial streams which runs from nonkarrstic trrain etc.	3
Remaining of catchment area	5

S - slope

Slope (^{0})	S
0 - 5	5
5 - 15	4
15 - 25	3
25 - 35	2
>35	1

P - plants

Plants	P
Dare rocks	5
Sparsely vegetated areas	4
Pastures	3
Transitional woodland-scrub	2
Forests	1

T - tectonics

lengths of faults (km/km^2)	Tf
0 - 1	1
1 - 2	2
2 - 3	3
3 - 4	4
>4	5

Dip angle of strem	Td
<30	1
30 - 60	3
>60	5

T= (Tf+Td)/2

L - lithology

Carbonate rocks	a
limestone	1
dolomite	0.7

Bedding	b
Massive, thickly bedded	2.4
bedded	1.8
Lamineted, thinly laminated	1.2

Mineralogical-petrographic ingradients	c
Calcified	2
Dolomite	1.6
Sandy, silicicated	1.2
Marly, clayish, dituminous	0

L= a * b * c

O – overlying layers

O1	Thickness				
Soil	<15	15-30	30-60	60-100	>100
Calcomalanosols, euthric cambisols, rendzina	5	4	3	2	1
Cacocambisols, terra rossa	4	3	2	1	1

O2	Thickness		
Geological cover	<3	3-6	>6
Alluvial, glacial-fluvial	5	3	1
Diluvium	3	2	1
Glacial-limnic sediments	2	1	1

O= (O1+O2) / 2

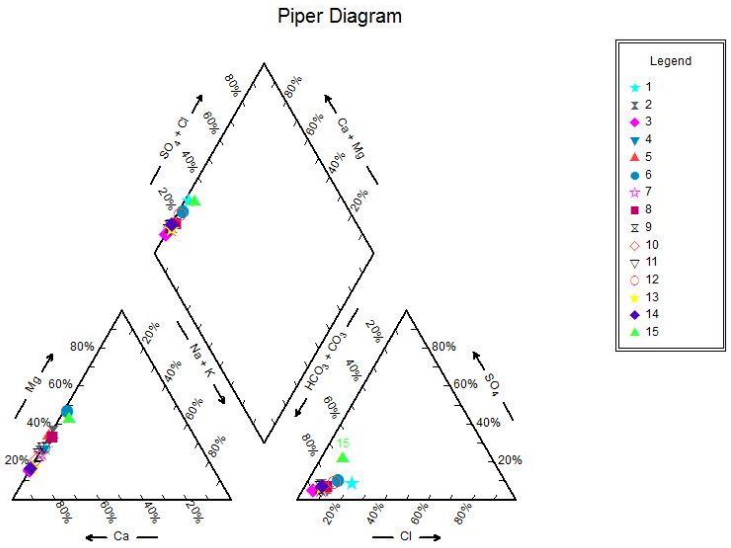
شکل۳. مراحل محاسبه مدل KARSTLOP (منبع: رادویچ و همکاران، ۲۰۱۲).

بحث و یافته‌ها

بررسی وضعیت هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی چشمه‌های توده پرآو-بیستون

آب موجود در آبخوان پرآو-بیستون با استفاده از ۱۵ چشمه مهم آن به خارج راه می‌یابد. اطلاعات مربوط به این چشمه‌ها در جدول ۱ نشان داده می‌شود. حداکثر دبی چشمه‌های موردمطالعه در اواخر زمستان و اوایل بهار و حداقل دبی آنها در

شهریورماه مشاهده می‌شود. معمولاً مقدار هدایت الکتریکی(EC) چشمه های کارستی کمتر از (۵۰۰µs/cm) به دست می‌آید. میزان EC چشمه‌های موردمطالعه (به غیر از چشمه طاق‌بستان) کمتر از ۵۰۰ بوده و برای اکثر آن‌ها بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ µs/cm می‌باشد. افزایش غلظت Mg یا کاهش نسبت مولار Ca/Mg نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند تغذیه کننده چشمه است (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹، ۲۱۷). مقدار این نسبت در چشمه‌های موردمطالعه بیشتر از ۲ و برای بعضی از چشمه‌ها بالاتر از ۸ می‌باشد که این امر حاکی از زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس‌کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌ها است. بررسی اطلاعات چشمه‌های منطقه مورد مطالعه طبق جدول ۱، نشان می‌دهد که از دید آنیونی، یون بی‌کربنات (HCO3) در چشمه‌ها غالب و تیپ آب آنها کربناته است. به لحاظ کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و بعد از آن منیزیم بوده و آب چشمه‌ها، رخساره کلسیک دارد. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها تأییدکننده منشأ کارستی آن‌ها می‌باشد. چشمه‌های موردمطالعه در ناحیه چپ نمودار پایپر (شکل۴) قرار می‌گیرند که حاکی از تیپ بی‌کربناته و بالا بودن قلیایی‌های دوظرفیتی کلسیم – منیزیم در آب چشمه‌ها است، این امر تأییدکننده منشأ کارستیک چشمه‌های موردمطالعه و تأمین آب آنها از ارتفاعات کربناته منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین بررسی نسبت مولار حاکی از زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس‌کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌ها است.



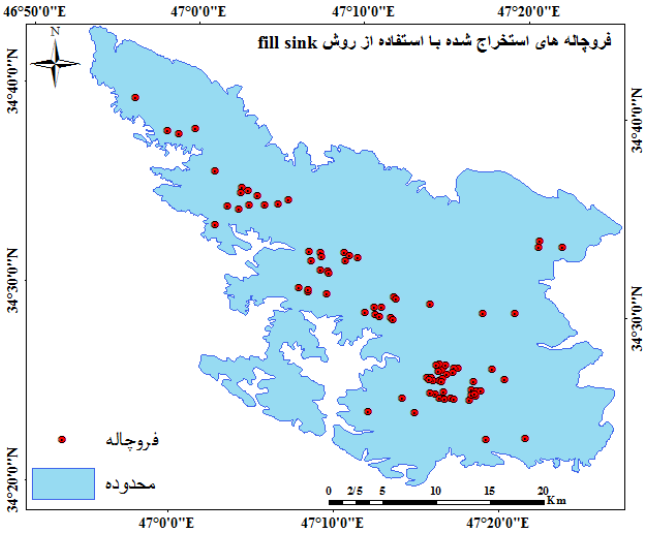
شکل۳. نمودار پایپر چشمه‌های اطراف آبخوان پرآو-بیستون.

جدول ۱. داده‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های آبخوان پرآو-بیستون.

نام چشمه	code	EC	TDS	PH	HCO3	So4	Cl	Na	K	Ca	Ma	ca/mg
		µs/cm	ppm		mEq/l							
طاق بستان	1	569	364	7.34	4.5	0.37	0.7	0.09	0.1	4.5	1	4.5
شاه حسین	2	332	212	7.88	2.9	0.19	0.15	0.06	0	2.4	0.8	3
خضر زنده	3	324	207	7.83	2.9	0.11	0.1	0.03	0	2.8	0.3	9.3
سرابله	4	291	183	8.04	2.5	0.11	0.2	0.03	0	2.3	0.5	4.6
ورمنجه	5	311	199	8.03	2.7	0.11	0.2	0.03	0	2.3	0.7	3.28
خضر الیاس	6	298	188	7.77	3.17	0.31	0.33	0.12	0	2.4	1.1	1.85
برنجان	7	384	246	7.75	3.4	0.14	0.2	0.06	0.02	3.1	0.6	5.16
سورکال	8	321	205	7.86	2.7	0.17	0.2	0.09	0	2.3	0.7	3.28
برناج	9	336	215	7.78	2.9	0.16	0.15	0.03	0	2.7	0.5	5.4
برکه	10	307	196	7.94	2.6	0.16	0.15	0.03	0	2.5	0.4	6.25
کمیجه	11	384	246	7.9	3.4	0.14	0.2	0.06	0	3	0.7	4.28
سهراب	12	401	257	7.65	3.3	0.27	0.3	0.09	0	3.1	0.7	4.42
ارمنی جان	13	395	253	7.94	3.5	0.17	0.2	0.09	0	3.4	0.4	8.5
نجیبران	14	307	196	7.95	2.6	0.16	0.15	0.03	0	2.6	0.3	8.7
بیستون	15	477	305	7.63	3.5	0.8	0.3	0.32	0	2.9	1.4	2.07

استخراج فروچاله‌ها با استفاده از روش Fillsink

این روش بر اساس تفاضل DEM اصلاح نشده و اصلاح شده با روش Fillsink در محیط نرم‌افزار Arc GIS و با استفاده از ابزار Arc hydro انجام شد و نتیجه آن، استخراج تمام فرورفتگی‌های موجود در DEM بود که با استفاده از بازدیدهای میدانی و بررسی نقشه‌های توپوگرافی پهنه‌های فروافتاده و فروچاله‌های کاذب شناسایی شدند و از نقشه نهایی حذف گردیدند. شکل ۴، نقشه فروچاله‌های توده کارستی پرآو-بیستون را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه فروچاله‌های توده کارستی پرآو-بیستون با استفاده از روش Fillsink.

تهیه لایه‌های مدلKARSTLOP

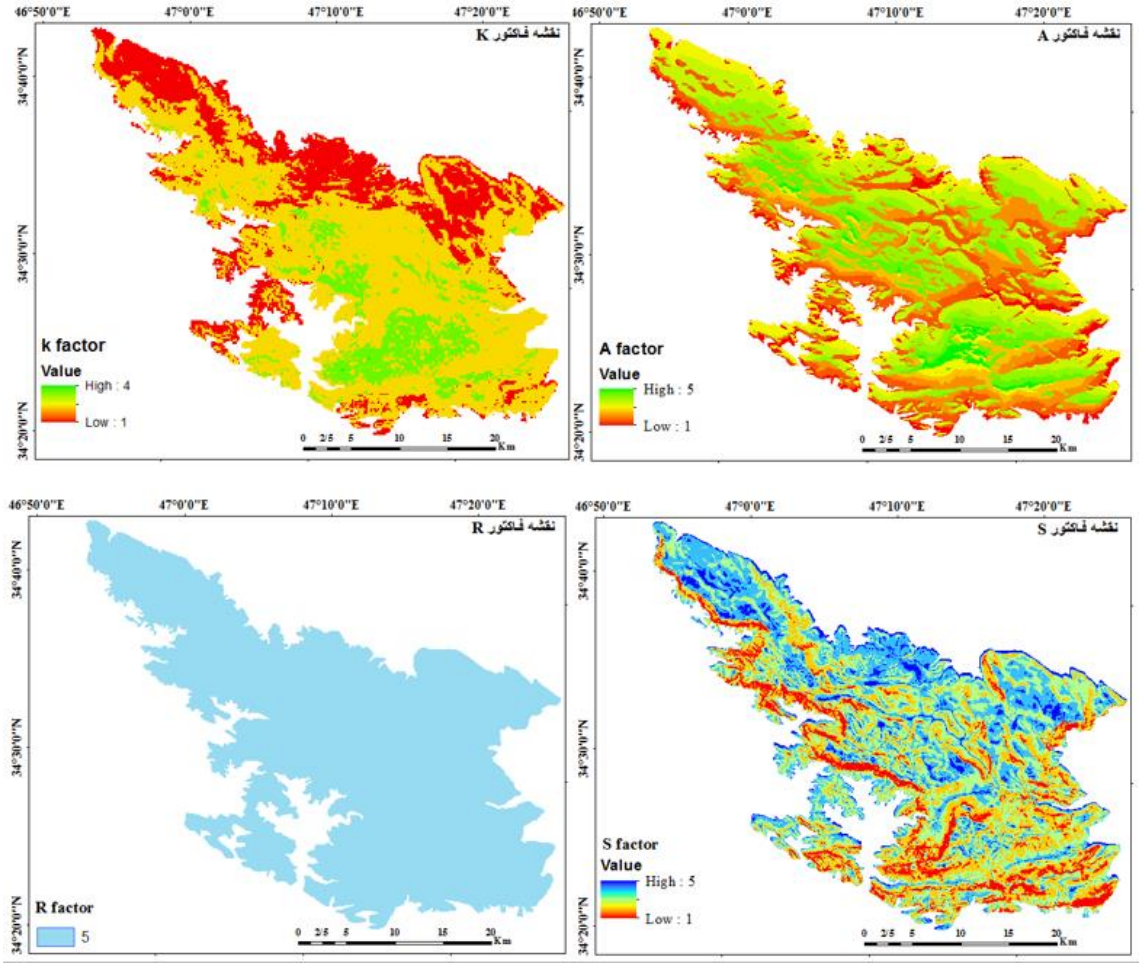
نقشه کارستیفیکاسیون (لایه K) از دو زیر پارامتر کارست سطحی (ksf) و کارست زیرسطحی (kss) به دست می‌آید. کارست سطحی (ksf) بر اساس ویژگی‌های کارست منطقه و لندفرم‌های کارستی، به دو زیر فاکتورKsf1 (کارن فیلدها و درزه و شکاف‌ها) و Ksf2 (فروچاله‌های کارستی) تقسیم شده است. به منظور تهیه نقشه کارستیفیکاسیون سطحی، از معیار تراکم در واحد سطح استفاده می‌شود. از ادغام این دو نقشه، نقشه کارست سطحی (Ksf) به دست می‌آید. بررسی کارست زیر سطحی منطقه (Kss) بر اساس مراحل زیر صورت می‌پذیرد: به منظور برآورد (Kss1) دامنه نوسانات دبی چشمه‌های کارستی حوضه توسط معادله Qmin/Qmax آنالیز می‌گردد. (Kss2) توسط سرعت متوسط جریان بر مبنای سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. در این پژوهش سرعت متوسط آب با توجه به شرایط منطقه موردمطالعه، ۱ تا ۱۰ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است. درجه اشباع کلسیت آب چشمه (SI) که بستگی به طول متوسط مسیر آب‌های زیرزمینی به کیلومتر دارد، منجر به محاسبه (Kss3) می‌شود (رادوویچ، ۲۰۱۲). با توجه به وسعت زیاد آبخوان پرآو–بیستون، میزان شاخص d بیش از ۴ کیلومتر در نظر گرفته شد و با استفاده از نرم‌فزار PHREEQC و داده‌های فصل مرطوب سال ۱۳۹۶، شاخص اشباع کلسیت چشمه‌های منطقه مورد مطالعه به دست آمد که در جدول ۲ نشان داده می‌شود. نتایج شاخص اشباع کلسیت، حاکی از ماندگاری کم آب در آبخوان و وجود جریان مجرایی در آبخوان پرآو–بیستون می‌باشد. درنهایت کارست زیرسطحی (Kss) بر مبنای میانگینKss3+Kss2+Kss1، محاسبه می‌گردد. نقشه نهایی درجه کارستی شدن توده کارستی پرآو–بیستون دارای مقادیری بین ۱/۵ تا ۴ می‌باشد. مقادیر حداکثر، منطبق بر مناطق هموار واقع در رأس ارتفاعات و مناطق توسعه‌یافته کارستی می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده می‌شود.

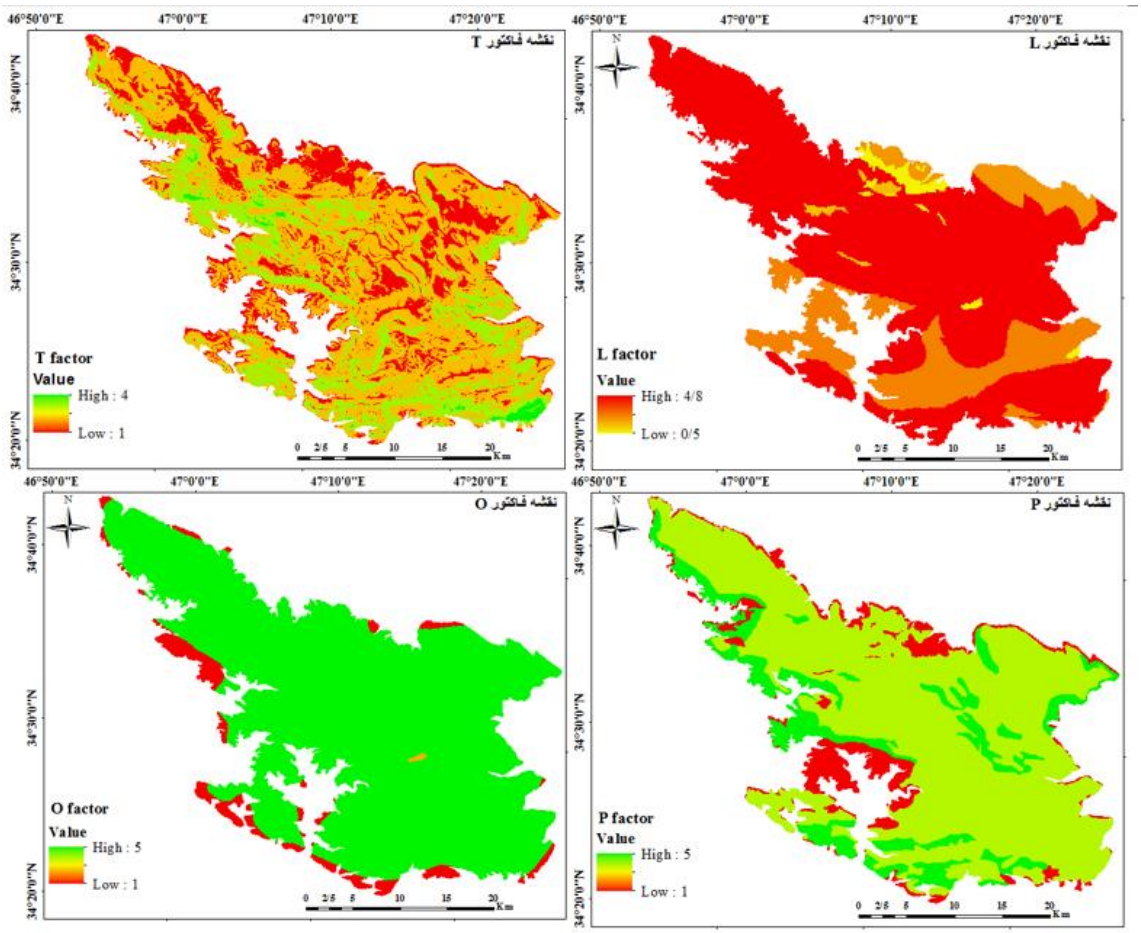
جدول۲. اطلاعات دبی و نسبت اشباع چشمه‌های آبخوان پرآو-بیستون.

ردیف	نام چشمه	Q max	Q min	Q max/Q min	نسبت اشباع (SIc)	نسبت اشباع (SId)
۱	ارمنی جان	۹	۱	۹	−۲/۵۳	−۵/۸۵
۲	برکه	۱۸۶	۱۶	۱۱/۶	−۲/۱۶	−۴/۹۸
۳	برناج	۱۳۶۵	۲۵	۵۴/۶	−۲/۶۱	−۵/۸۳
۴	برنجان	۵۴	۰	۵۴	−۲/۵۷	−۵/۷۱
۵	بیستون	۴۲۰	۱۷	۲۴/۷	−۲/۶۱	−۵/۴۱
۶	چشمه سهراب	۱۴۵	۵	۲۹	−۲/۵۷	−۵/۶۵
۷	خضر زنده	۲۳	۹	۲/۵	−۲/۵۹	−۶/۰۳
۸	خضر الیاس	۳۵	۴	۸/۷	−۲/۶۸	−۵/۴۹
۹	سرابله	۱۰۱۱	۲۶	۳۸/۸	−۲/۳۷	−۵/۲۷
۱۰	سورکال	۵۰۸	۱۹	۲۶/۷	−۲/۳۸	−۵/۱۴
۱۱	شاه حسین	۹۳۳	۳۵	۲۶/۶	−۲/۶۶	−۵/۶۷
۱۲	طاق بستان	۱۹۸۷	۱۵	۱۳۲/۴	−۲/۳۱	−۵/۴۳
۱۳	کمیجه	۹۵	۳	۳۱/۶	−۲/۲۸	−۵/۰۶
۱۴	نجیبران	۸۹۷	۴	۲۲۴/۲	−۲/۳۲	−۵/۴۴
۱۵	ورمنجه	۴۹۲	۱۳	۳۷/۸	−۲/۲۰	−۴/۷۸

در پارامتر شرایط جوی(A) ، 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 درنتیجه 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 کمترین امتیاز از پارامتر (A2) را به خود اختصاص می‌دهند. با بهره‌گیری از Dem ۱۰ متر منطقه مورد بررسی، میزان دریافت تابش امتیازبندی و درنهایت پارامتر A محاسبه گردید. در مناطقی کارستی، میزان نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، شیب و میزان بارندگی از پارامترهای بسیار مؤثر در میزان رواناب (R) 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 سنگ آهک و دولومیت باشد را نشان دهد و ممکن است هدایت هیدرولیکی کمتر از پوشش خاک یا زمین‌شناسی باشد. با توجه به نبود جریان دائمی در منطقه موردمطالعه تمامی سطح منطقه دارای امتیاز ۵ می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده می‌شود. همان طور که در قسمت رواناب نیز اشاره گردید، شیب (S) 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 شکل ۳ آمده است. لازم به ذکر است که این پارامتر نیز به وسیله Dem 10 متر منطقه قابل محاسبه است. میزان امتیاز دریافتی در این پارامتر نسبت عکس با میزان شیب دارد. پارامتر تکتونیک (T)، از دو زیر پارامتر تراکم گسل (Tf) (طول گسل‌ها به کیلومتر در هر واحد سطح به کیلومترمربع) و شیب لایه‌های زمین‌شناسی به درجه (Td) محاسبه می‌گردد. مقدار تغذیه به طور قابل توجهی به درجه شکستگی سنگ بستگی دارد که معمولاً در مناطق گسل خورده این ضریب افزایش پیدا می‌کند. Td یکی از عواملی است که نفوذ آب و تغذیه آبخوان را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. 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 (رادوویچ، ۲۰۱۲، ۲۲۲۳). با تداخل این دو زیر فاکتور نقشه نهایی تکتونیک به دست می‌آید که در شکل ۵ نشان داده می‌شود. ترکیب سنگ‌شناسی (L) به طور مستقیم، نفوذپذیری و درنتیجه میزان تغذیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای سنگ آهک و دولومیت زیرفاکتورهای زیر در نظر گرفته می‌شود: نوع سنگ کربناته (زیر فاکتور a)، لایه زیرین (زیرفاکتورb)، ترکیب پتروگرافی و کانی‌شناسی سنگ کربناته (زیرفاکتورc). دولومیت معمولاً به عنوان سنگ با نفوذپذیری و انحلال‌پذیری کمتر نسبت به سنگ آهک در نظر گرفته می‌شود و شکستگی‌های زیرسطحی آن کمتر از سنگ آهک گسترش می‌یابند؛ بنابراین ارزش نسبی زیر فاکتورa برای سنگ آهک ۱ و برای دولومیت ۰/۷ است. زیرفاکتور b بر اساس ضخامت و میزان شکستگی امتیازبندی می‌شود. سنگ آهک و دولومیت به ندرت به صورت خالص وجود دارند. آنها اغلب حاوی ترکیبات مختلف از کانی‌های دیگر مانند سنگ آهک یا دولومیت مارنی، شیلی، ماسه‌ای، چرت و .... می‌باشند (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۲۶). نفوذپذیری سنگ کربناته اگر حاوی کانی‌های مختلف باشد، کم می‌شود؛ بنابراین ارزش زیرفاکتور c بر اساس وجود این ناخالصی‌ها در نظر گرفته می‌شود که بر روی کاهش نفوذ تأثیر دارند. از نقشه زمین‌شناسی برای به دست آوردن زیرفاکتورها استفاده شد و فاکتور L از ضرب سه زیر فاکتور مذکورمحاسبه شد. در توده پرآو–بیستون، سازند بیستون که بیشترین مساحت منطقه را نیز در برگرفته 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. نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی مبنای شکل‌گیری این لایه(فاکتورO) 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. پوشش زمین‌شناسی (O2) شامل رسوبات نهشته‌ای است که بر روی سازندهای کربناته قرارگرفته‌اند. این پارامتر، به وسیله سنگ‌ریزه (توده‌های سنگی سقوط کرده)، آبرفت،

مورن، رسوبات یخچالی و رسوبات دیگر مشخص می‌گردد. نقشه نهایی لایه‌های پوشاننده از تداخل دو فاکتور بالا محاسبه شده و در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. پوشش گیاهی (P) نیز بر میزان تغذیه مناطق کارستی بی‌تاثیر نیست. وجود گیاهان در این مناطق، باعث افزایش تبخیر و تعرق و کاهش مقدار نفوذ آب به زمین می‌گردد. در دسته‌بندی گیاهان بر مبنای شکل ۳، توسعه سیستم ریشه و انشعاب شاخه‌ها نیز در نظر گرفته شده است. در منطقه موردبررسی، بیرونزدگی‌های سنگی و مراتع با تراکم کم که منطبق با دامنه‌های توده کارستی پرآو–بیستون 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.

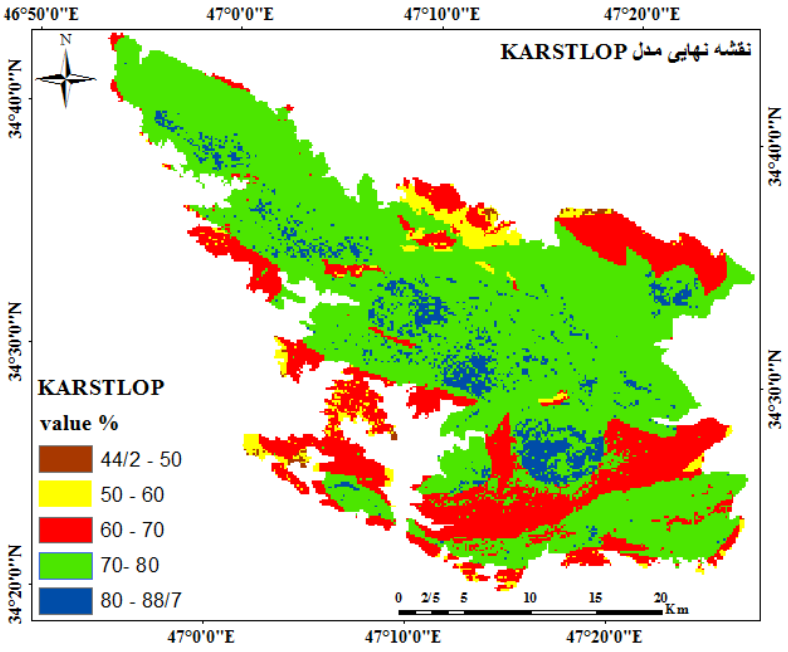




شکل۵. نقشه لایه‌های مدل KARSTLOP

در نهایت پس از تهیه نقشه‌های هشت‌گانه لازم برای مدل KARSTLOP و امتیازدهی آن‌ها بر اساس شکل ۳، طبق فرمول ۱، اقدام به تهیه نقشه نهایی مدل مذکور برای آبخوان پرآو–بیستون شد. شکل ۶ نقشه نهایی را نشان می‌دهد. طبق این نقشه میزان تغذیه آبخوان مورد نظر بین ۴۴/۲ تا ۸۸/۷ درصد بود که در ۵ کلاس، طبقه‌بندی شد. جدول ۳، مساحت و درصد مساحت هر یک از طبقات میزان تغذیه آبخوان پرآو–بیستون را نشان می‌دهد.

$$KARSTLOP= 4\times K + A + 4\times R + 2\times S + T + 4\times L + 3\times O + P \quad (۱)$$



شکل۶. نقشه نهایی حاصل از اجرای مدل KARSTLOP

جدول۳. مساحت و درصد مساحت طبقات میزان تغذیه آبخوان پرآو-بیستون.

ردیف	میزان تغذیه (٪)	مساحت (Km^2)	درصد مساحت
۱	۵۰ – ۴۴/۲	۶/۷۱۳	۰/۳
۲	۶۰ – ۵۰	۳۳/۱۵۲	۳/۶۶۲
۳	۷۰ – ۶۰	۲۱۷/۴۴۶	۲۴/۰۱۷
۴	۸۰ – ۷۰	۵۹۱/۶۶۷	۶۵/۳۵۱
۵	۸۸/۷ – ۸۰	۶۰/۳۹	۶/۶۷

نتیجه‌گیری

آبخوان پرآو-بیستون به عنوان جزئی از زون زاگرس مرتفع، در محدوده سنگ‌های کربناته قرار دارد و با توجه به ارتفاع زیاد و بارش فراوان مستعد شرایط کارست‌زایی می‌باشد که ژئومورفولوژی و اشکال توسعه یافته کارستی مانند فروچاله‌ها، اووالاها و غارهای آن موید این امر است. بررسی ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های خروجی از آبخوان پرآو-بیستون حاکی از رخساره کلسیک و تیپ کربناته این چشمه‌ها است که بیانگر منشا کارستی آن‌ها می‌باشد. هم‌چنین بررسی نسبت مولار حاکی از زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس‌کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌ها است در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از روش KARSTLOP اقدام به پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه آبخوان پرآو-بیستون شود. طبق نقشه نهایی حاصل از اجرای مدل مذکور، درصد تغذیه آبخوان پرآو-بیستون بین ۴۴/۲ تا ۸۸/۷ می‌باشد که از این میان، طبقه ۷۰ تا ۸۰ درصد با ۶۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین مساحت می‌باشد که منطبق بر مناطق مرکزی آن از شمال‌غرب تا جنوب‌شرق آن است. پس از آن طبقه ۶۰ تا ۷۰ درصد با مساحت ۲۴ درصد، قرار دارد که منطبق بر دامنه‌های حاشیه این آبخوان است. طبقه با میزان تغذیه بیشتر از ۸۰ درصد در راس کوه مرتفع پرآو و بخش‌هایی از مناطق هموار راس سایر کوه‌های منطقه قرار دارد که منطبق بر رخنمون سنگی سازند کربناته بیستون با بیشترین تراکم گسل‌ها می‌باشد. در مجموع می‌توان استنباط کرد که آبخوان پرآو-بیستون به دلیل رخنمون سنگ‌های

کربناته و بدون پوشش خاک در اغلب مناطق، دارای پتانسیل تغذیه فراوان است به طوری که حدود ۹۶ درصد از مساحت این آبخوان دارای پتانسیل تغذیه ۶۰ درصد به بالا است. درصد بالای میزان تغذیه آبخوان پرآو-بیستون و توزیع مکانی مناطق تغذیه آن که بیانگر غلبه نفوذ متمرکز توسط فروچاله و غارهای عمودی مناطق مرتفع است حاکی از این است که جهت مباحث مرتبط با آلودگی و جلوگیری از انتشار آن، نیازمند برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی هستیم.

منابع

- افراسیابیان، احمد، ۱۳۷۷، اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، تهران-کرمانشاه، صص۱۲۶-۱۳۷.
- انتظاری، مژگان؛ یمانی، مجتبی؛ جعفری اقدم، مریم، ۱۳۹۴، مدل‌سازی مکانی مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی با استفاده از مدل *KARSTLOP* (مطالعه موردی: آبخوان کارستی خورین)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، ش۲، صص ۱۲۱-۱۳۷.
- باقری سیدشکری، سجاد؛ یمانی، مجتبی؛ جعفربیگلو، منصور؛ کریمی، حاجی؛ مقیمی، ابراهیم، ۱۳۹۴، بررسی توسعه‌یافتگی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف (مورد مطالعه: آبخوان‌های کارستی حوضهٔ رودخانهٔ الوند)، پژوهشهای جغرافیای طبیعی سال چهل و هفت، شماره ۳، صص: ۳۳۳-۳۴۶.
- بهرامی، شهرام؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ جهانفر، علی، ۱۳۹۵، ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجه و توده پرآو-بیستون)، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۱۴، ش ۴۴، صص ۱۰۷-۱۲۲.
- حاتمی‌فرد، رامین؛ صفاری، امیر؛ یمانی، مجتبی؛ کریمی؛ حاجی، ۱۳۹۷، ارزیابی رفتار هیدرودینامیکی و توسعه-یافتگی کارست در محدوده تاقدیس گرین (مطالعه موردی: بلوک‌های الشتر و نورآباد)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیست و نهم، ش ۳، صص ۱۵-۳۴.
- حسینی، سید موسی؛ مقصودی، مهران؛ گورابی، ابوالقاسم؛ قدیری، هاجر، ۱۳۹۴، تحلیل هیدروژئومورفولوژیک آبخوان کارستی چشمه ساسان-دشت ارژن فارس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، ش ۳، صص ۷۰-۸۳.
- قبادی، محمدحسین؛ دهبان ایوان استخری، مریم؛ میرعری، علی، ۱۳۹۶، بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی حوضه کارستی درفک (استان گیلان، شمال شرقی رودبار)، فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، سال یازدهم، ش ۳۹، صص ۱۳-۳۱.
- کریمی وردنجانی، حسین، ۱۳۸۹، هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)، انتشارات ارم شیراز، چاپ اول.
- *Bakalowicz, M. (2005). Karst Groundwater: a Challenge for New Resources. Hydrogeology Journal, 13(1), 148-160.*
- *Braud, J. (1989). LA suture du Zagros au niveau de Kermanshah (Kurdistan Iranian): Mem Geodiffusion. 5, 489P., 125 Fig, 1, Carte H, T., Paris.*
- *Ford,D. Williams,P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John & Sons, Ltd.*
- *. Gerner, A., Schutze, N., and Schmitz, G.H. (2012). Portrayal of fuzzy recharge areas for water balance modelling – A case study in northern Oman. Adv. Geosci. 31, 1–7.*
- *Geyer, T., Birk, S., Liedl, R. and Sauter, M. (2008). Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. J Hydrol, 348, 452-463.*
- *Healy, RW. (2010). Estimating groundwater recharge: Cambridge University Press Cambridge.*

- *Hughes, AG., Mansour, MM. and Robins, NS. (2008). Evaluation of distributed recharge in an upland semiarid karst system: the West Bank Mountain Aquifer, Middle East. Hydrogeol J, 16, 845-854.*
- *Janza, M. (2010). Hydrological modeling in the karst area, Rizana spring catchment, Slovenia. Environ Earth Sci 61, 909-920.*
- *Kalantari, N. and Rouhi, H. (2018). Discharge hydraulic behavior comparison of two karstic springs in Kuhe-Safid anticline, Khuzestan, Iran, Carbonates and Evaporites. DOI: 10.1007/s13146-018-0427-0.*
- *Kovács, A. and Sauter, M. (2007). Modelling karst hydrodynamics. In: Goldscheider N, Drew D (ed) Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis, London, pp 201-222.*
- *Kuhta, M., Brkić, Ž. and Stroj, A. (2012). Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia. Geologia Croatica. 65 (1), 41-52.*
- *LaMoreaux, P. E. (1991). History of karst hydrogeological studies, Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas -I.G.U.- U.I.S.- Italy 15-27 Sept. 1991 ; Quaderni del Dipartimento di Geografia n. 13, 1991 -Università di Padova, pp. 215- 229.*
- *Lerner, DN., Issar, AS. ,and Simmers, I. (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Int Contrib Hydrogeol 8. Heinz Heise, Hannove.*
- *Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A. and Ramli, M.F. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. Arab. J. Geosci. 7(2), 711–724.*
- *Martinez-Santos, P. and Andreu, JM. (2010). Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers. J Hydrol, 388, 389-398.*
- *Mayaud, C., Wagner, T., Benischke, R. and Birk, S. (2014). Single event time series analysis in a binary karst catchment evaluated using a groundwater model (Lurbach system, Austria). Journal of Hyrology, 511, 628-639.*
- *Milanović, P. (2005).Water Resources Engineering in Karst. Taylor & Francis.*
- *Portoghese, I., Uricchio, V. and Vurro, M. (2005). A GIS tool for hydrogeological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments. Comput Geosci, 31, 15-27.*
- *Radulovic, M., Radulovic, M., Stevanovic, Z., Sekulic, G., Radulovic, V., Buric, M., Novakovic, D., Vako, E., Blagojevic, M., Devic, N. and Radojevic, D. (2015). Hydrogeology of the Skadar Lake basin (Southeast Dinarides) with an assessment of considerable subterranean inflow. Environ Earth Sci, 74, 71–82.*
- *Radulovic, M., Stevanovic, Z. and Radulovic, M. (2012). A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies. Environ Earth Sci, 65, 2221–2230. DOI 10.1007/s12665-011-1378-0.*
- *Sharma, ML. (ed). (1989). Groundwater recharge. AA Balkema, Rotterdam.*
- *Simmers, I., Hendickx, JMH., Kruseman, GP. and Rushton, KR. (1997). Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. International Association of Hydrogeologists: International Contributions to Hydrogeology, 19, IAH, Wallingford, UK.*
- *Steiakakis, E. (2018). Evaluation of Exploitable Groundwater Reservesin Karst Terrain: A Case Study from Crete, Greece. Geosciences Journal, 8, 19; doi:10.3390/geosciences8010019.*
- *Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, K.C. and Chang, P.H. (2009). GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. Environ. Geol, 58(1), 85–95.*