



# ارزیابی هیدرولوژی کارست به منظور مدل سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخوان های کارستی مطالعه موردی: شهرستان داراب

مجتبی محمدی

دانشجوی دکترای جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران (نویسنده مسئول)

mohammadimojtaba2022@gmail.com

محمد ابراهیم عقیفی

استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶

## چکیده

ارزیابی توزیع مکانی تغذیه در منطقه های کارستی نقش مهمی در مدیریت و حفاظت از منابع آبی دارد به دلیل پیچیدگی شرایط طبیعی و حرکت آب در منطقه های کارستی، چگونگی تغذیه در آبخوان های کارستی پیچیده است و به کار بردن روش های مرسوم اندازه گیری تغذیه در ناحیه های کارستی نتیجه ی رضایت بخشی نداشته است کارست لوپ روشی جدید برای تهیه نقشه ی توزیع مکانی تغذیه و محاسبه کردن میانگین تغذیه در حوزه است هدف از این پژوهش مدل سازی کردن توزیع مکانی تغذیه با روش کارست لوپ در حوزه آبخیز رودبال داراب است. نقشه ی پهنه بندی منطقه های تغذیه با روش کارست لوپ در نرم افزار ArcGIS تهیه و برای ارزیابی کردن دقت آن در یافتن محل های تغذیه، نتیجه با نقشه ی زمین ریخت شناسی کارست سطحی، و ارتفاع محل های تغذیه ی برآورد شده با شیب ارتفاعی ایزوتوری مقایسه شد. شیب ارتفاعی ایزوتویی با محتوای ایزوتویی نمونه های بارش و ارتفاع محل های نمونه برداری در دوره ی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ ترسیم شد، بررسی نقشه ی رقومی تغذیه با روش کارست لوپ نشان داد که تغذیه در ۴۵٪ از مساحت حوزه بیش از ۶۰٪ است و این محل ها بر سازندهای آهکی منطبق است و بیشترین تراکم رخساره های کارستی در آن است ارتفاع محل های تغذیه ی چشمه های گلابی، رگز و رودبال با شیب ارتفاعی ایزوتویی به ترتیب ۳۹۵، ۳۷۶ و ۴۲۹ متر برآورد شد (در طبقه ۳۵۰-۳۵۰) و نقشه ی توزیع مکانی تغذیه بدست آمده با روش کارستن لوپ نشان داد که بر طبقه ی بیشترین تغذیه (۷۶ تا ۸۶٪) منطبق است مقایسه ی نقشه ی تغذیه ی روش کارست لوپ با ارتفاع محل های تغذیه ی چشمه ها با شیب ارتفاعی ایزوتویی نشان داد که کارایی روش کارستن لوپ در شناختن محدوده ی بیشترین تغذیه، و مدل سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخیز رودبال داراب پذیرفتنی است

**واژه کلیدی:** آبخوان کارستی، داراب، کارست لوپ، ایزوتوپ

## مقدمه

آبخوان کارستی سنگ های کربناته ای با آب زیرزمینی است که می توان از آن بهره برداری کرد (عفیفی و همکاران، ۱۳۹۴) یکی از دلیل های اهمیت داشتن بررسی منطقه های کارستی نتایج مهم آبی آن است. بطور کلی سه منطقه ی تغذیه، انتقال و تخلیه در این آبخوان ها است منطقه های تغذیه تأمین کننده ی ورودی آبخوان اند که نقشی اساسی در چرخه آب شناختی آبخوان های کارستی دارند بررسی تغذیه ی آب های زیرزمینی از میانه ی دهه ی ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۶) بخش بزرگی از پوشش های تغذیه ی آبخوان های کارستی مدل سازی پویایی کارست است (راکعی و همکاران، ۱۳۹۶: ۵۷-۶۴) به علت پیچیدگی ارزیابی کردن توزیع مکانی تغذیه و نفوذ آب در منطقه های کارستی، روش های برآورد کردن تغذیه در این آبخوان ها غالباً نامستقیم است (رجبی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۰) به کار بردن روش های مرسوم اندازه گیری تغذیه مانند اندازه گیری مستقیم در سایت های آزمایشی برآورد تبخیر و تعرق با معادله های تجربی و روش های مبتنی بر قانون دارسی در ناحیه های کارستی نتیجه ی رضایت بخشی نداشته است هم اکنون واقع بینانه ترین روش برآورد تغذیه و نفوذ آب، روش جعبه سیاه بیلان آب است که در مقیاس آبخیز به کار می رود، و بارش و آبدهی اصلی ترین اجزای ورودی و خروجی آن است، هر چند به کار بردن این روش برای ارزیابی کردن توزیع مکانی و تغییر فصلی تغذیه امکان پذیر نیست (روستائی و همکاران، ۱۳۹۳: ۴۹۵) مدل سازی منطقه های تغذیه در آبخوان های کارستی موضوعی جدید است که با پیش رفت ساماندهی اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور به آن توجه شد (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴) روش کارست لوپ برای شناسایی کردن منطقه های تغذیه در زمین های کارستی در مونته نگرو ارزیابی کرده و کارآیی زیاد آن در شناخت منطقه های تغذیه ی آبخوان های کارستی نشان داده شد (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴) کارست لوپ روشی جدید با عنصر ها و بخش های ضروری برای تولید نقشه ای است که توزیع مکانی تغذیه را در منطقه های کارستی نشان می دهد. این روش به هشت عامل از مهم ترین عامل های طبیعی پرداخته است که بر تغذیه اثر دارد و باعث می شود که ارزیابی کردن تغذیه اعتماد پذیر تر و دقیق تر باشد روش کارست لوپ علاوه بر تولید کردن نقشه ی رقومی تغذیه، توزیع مکانی تغذیه را مشخص می کند و می تواند اندازه های میانگین تغذیه را نه فقط برای کل حوزه، بلکه برای مساحت های کوچک تر محاسبه کند نقشه ی تغذیه ی نهایی می تواند در بسیاری از موضوع های کاربردی مدیریت منابع آب در منطقه های کارستی، ورودی مدل سازی آب زیرزمینی باشد (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴) در مدل سازی مکانی منطقه های تغذیه در آبخوان خورین استان کرمانشاه با روش کارسلوپ به این نتیجه رسیدند که تغذیه در ۸۸٪ آبخوان بیش از ۵۰٪ است، و منطقه های با تغذیه ی بیش از ۷۰٪ بر ناحیه های توسعه یافته ی کارستی راس کوهستان منطبق است که بشدت زمین ساختی شده (تکتونیزه) است و پوشش گیاهی آن تنک و خاک آن کم ضخامت است. (سرتیپی و انتظام سلطانی، ۱۳۹۱: ۱)



میزان تغذیه را با روش کارست لوپ در بیش از ۷۰ درصد مساحت آبخوان کارستی پرآو- بیستون در کرمانشاه به میزان ۵۰ درصد بارش برآورد کردند و نشان دادند که زمین ریخت شناسی نقش اصلی را در تغذیه ی این آبخوان دارد. کارآیی روش کارست لوپ در شناخت منطقه های تغذیه ی آبخوان کارستی مناسب است (سلیمانی و بهرامی، ۱۳۹۷: ۲۳۴) میزان تغذیه در آبخوان های کارستی بیستون و دالاهو در استان کرمانشاه را با روش کارست لوپ به ترتیب ۳۶-۸۳ و ۸۱-۳۷ درصد برآورد کرد و به این نتیجه رسید که منطقه هایی با بیشترین میزان تغذیه شیب کم، خاک کم ضخامت و درشت دانه، پوشش گیاهی تنگ، زمین ریخت شناسی کارست توسعه یافته و به شدت زمین ساختی شده دارد. تفسیر کردن داده ای ایزوتوپی یکی از راههای دقیق تعیین محل (ارتفاع) نوع و زمان تغذیه در آبخوان های کارستی است. میزان ایزوتوپ پایدار اکسیژن و هیدروژن در اغلب آبهای زیرزمینی در عمق های کم با اندازه های موجود آنها در آبهای جوی یکسان است به همین دلیل، اغلب آبهای کارستی روی خط و یا نزدیک خط آب جوی و مشخصا ناشی از بارش های محلی است. ارتفاع بر ترکیب ایزوتوپی نمونه های بارش تأثیر دارد. با افزایش ارتفاع ایزوتوپ های سنگین به تدریج خارج می شود، و در نتیجه ترکیب ایزوتوپی بارانی که در ارتفاعات می بارد سبک تر است این اصل را می توان برای شناخت منطقه های تغذیه آبخوان های کارستی به کار برد (عفیفی و بهزادی، ۱۳۹۹: ۲۰) رابطه ی مشخصی بین (ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸) بارش و ارتفاع هست، که این امکان را می دهد که بتوان ارتفاع متوسط تغذیه را تقریباً برای هر چشمه تخمین زد. ترکیب ایزو توپی چشمه ها نشان دهنده ی ارتفاع متوسط منطقه ی تغذیه آنها است بنابراین متوسط ارتفاع منطقه ی تغذیه ی هر چشمه را می توان با شیب ارتفاعی ایزوتوپی محاسبه کرد (عفیفی و بهزادی، ۱۳۹۹: ۲۰) در این شرایط، برای شناخت ارتفاع تغذیه، می توان اندازه های میانگین ها را در طول نیم یا کل سال در برابر ارتفاع ترسیم کرد (عفیفی و بهزادی، ۱۳۹۹: ۲۰) در پژوهش های سامانه های کارستی، برای ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی، ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ بیشتر از دوتریوم به کار برده می شود (عفیفی و بهزادی، ۱۳۹۸: ۵۰) کاربرد این شیب ها به دلیل پیچیدگی پستی و بلندی و ساختارهای زمین شناسی و به دلیل دقت کمی که در تعیین کردن سنجه های آب پویایی هست، دشوار است بدین ترتیب ارتفاع تغذیه های تخمین زده شده به این روش حتماً باید با معیارهای زمین شناسی و پستی و بلندی نیز مهار شود (فرجی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۰) متوسط ارتفاع پهنه های تغذیه ی آب زیرزمینی را با شیب ارتفاعی ایزوتوپی در کرمانشاه تخمین زد و به این نتیجه رسید که این تخمین ها، کم و بیش با خط تقسیم پستی و بلندی طبیعی مطابقت دارد. (کردی و مرزبان، ۱۳۹۵: ۴۵) در شناخت منطقه های تغذیه ی چشمه های کارستی هندوستان با ایزوتوپ های پایدار محیطی نشان دادند که میانگین ارتفاع بارندگی که چشمه ها را تغذیه می کند در محدوده ی ۲۹۰۰-۲۵۰۰ متر است. (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۰).

منطقه تغذیه ی آبخوان های کارستی را در ایتالیا با ایزوتوپ های پایدار شناسایی کردند و به این نتیجه رسیدند که تجزیه و تحلیل اندازه های ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم و توزیع مکانی آنها، امکان شناخت منطقه ها

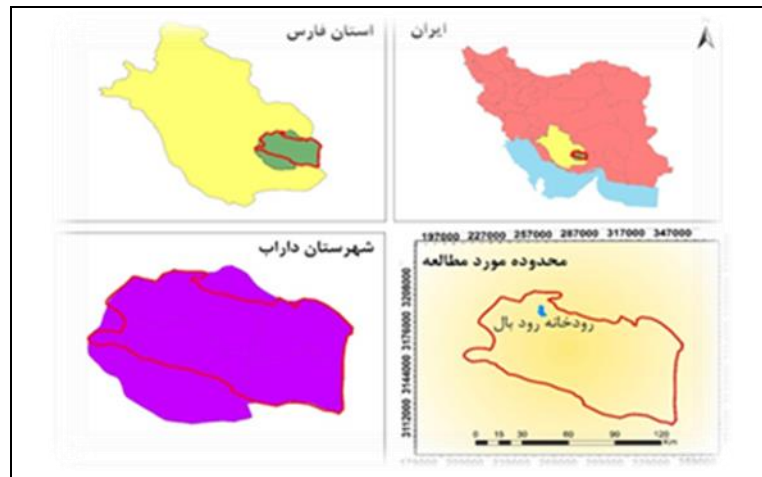


و ارتفاع تغذیه ی آب زیرزمینی را با شیب ارتفاعی ایزوتوپی فراهم می کند. پژوهش های آنان نشان داد که نتیجه روش های کارست لوپ و شیب ارتفاعی ایزوتوپی، در شناخت منطقه ای با بیش ترین مقدار تغذیه و برآورد ارتفاع متوسط منطقه ای تغذیه رضایت بخش است. بنابراین، استفاده همزمان از دو روش علاوه بر افزایش دقت در شناخت مکان های مستعد تغذیه و نفوذ آب، از جنبه های نوآورانه ی این پژوهش است. بودن استان فارس در اقلیم خشک و نیمه خشک، کاهش بارندگی ها و وقوع خشکسالی های اخیر باعث شده است که منابع آبهای سطحی و زیرزمینی استان همواره در کاهش باشد برای استان فارس که بخش بزرگی از آب آن از استان های مجاور تهیه می شود، خشکسالی اثرهای مخربی دارد، و نبود منابع پایدار آب در استان دشواری هایی را برای تأمین آب خانگی و کشاورزی ایجاد کرده است از طرف دیگر به دلیل بودن منابع غنی نفت و گاز در استان و افزایش یافتن منطقه های صنعتی و اقتصادی برای بهره برداری از آن، تقاضا و نیاز به آب مناسب و با کیفیت روز به روز افزایش می یابد. رخ نمودن سازندهای آهکی و چشمه های کارستی این سازندها نشان می دهد که آبخوان ها و آب های کارستی در استان فارس هست، به طوری که بخش مهمی از آب کشاورزی و خانگی روستاهای آبخیز رودبال داراب از چشمه های کارستی تأمین می شود. آبخوان های کارستی منابع با ارزش آب و منطقه های تغذیه تأمین کننده ی ورودی آبخوان است، که نقشی اساسی در چرخه ی آب شناختی آبخوان های کارستی دارد، بنابراین برآورد کردن میزان و شناخت منطقه های تغذیه و نفوذ آب در منطقه های کارستی نقش مهمی در مدیریت و حفاظت از منابع آب در استان فارس دارد. (اداره کل آب های زیر زمینی وزارت نیرو، ۱۳۷۰)

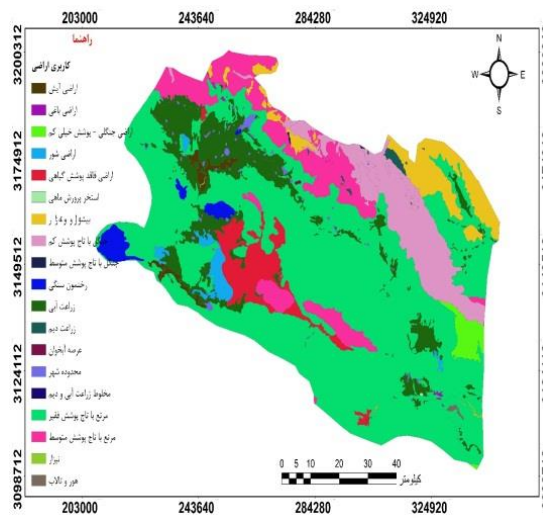
## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

مختصات جغرافیایی شهرستان داراب  $28^{\circ}52'28''$  شمالی  $54^{\circ}23'54''$  شرقی /  $28,872337^{\circ}$  شمالی  $54,398439^{\circ}$  شرقی در جنوب شرقی استان فارس واقع شده است. این رودخانه از کنار منطقه رودخانه رودبال داراب عبور می کند و شهرهای داراب و ایچ و استهبان از شهرهای مهم نزدیک به این رودخانه است و از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ و به مدت ۱۲ سال سد رودخانه رودبال داراب بر روی این رودخانه ساخته شده است. سد رودخانه رودبال داراب یکی از دو سد ساخته شده بر روی رودخانه رودبال در کیلومتر ۲۲ جاده داراب - ایچ در استان فارس واقع شده است. (سد دوم که یک سد تنظیمی کوچک می باشد، در کیلومتر ۱۲ جاده داراب - ایچ و در حوالی شهرک فتح المبین ساخته شده است و کارایی آن تنظیم آب خروجی سد رودخانه رودبال و ذخیره سازی آن با دبی خروجی کمتر می باشد) سد رودخانه رودبال از نوع خاکی، سنگریزه ای با هسته رسی است و ۸۳ متر ارتفاع دارد. حجم سد رودخانه رودبال ۸۲ میلیون متر مکعب است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: نقشه زمین شناسی و زمین ساختی حوضه رودبال داراب



## روش کارست لوپ

روش کارست لوپ مخفف حروف اول ۸ لایه فرآیند کارست زایی (K)، شرایط جوی (A)، روان آب (R)، شیب (S)، زمین ساخت (T)، سنگ شناسی (L)، لایه ی پوشاننده (O) و پوشش گیاهی (P) است. این روش در نرم افزار ArcGIS اجرا می شود و قضاوت کارشناسی پژوهشگر سنجه های تحلیلی را انتخاب و معیارهای ارزیابی و الگوریتم را تعریف می کند. (معماریان، ۱۳۹۴: ۳۵) نحوه ی محاسبه امتیاز دهی و معادله های هر عامل و زیرعامل در جدول ۲ تا ۱۰ آورده شده است. پس از امتیازدهی و تهیه نقشه ی عامل های روش کارست لوپ، نقشه ی نهایی توزیع مکانی تغذیه ی آبخوان به درصد و به قالب رستر با قدرت تفکیک ۵ متر تهیه شد (معادله ۱).

$$R_{ch} = 4 \times K + A + 4 \times R + 2 \times S + T + 4 \times L + 3 \times O + P \quad (1)$$

## ۱- کارست زایی

عامل کارست زایی یا توسعه کارست از تجزیه و تحلیل میزان کارستی شدن سطحی و زیر سطحی به دست آمد. نقشه نهایی درجه کارستی شدن با هم پوشانی دادن نقشه کارستی شدن سطحی (Ksf) و نقشه کارستی شدن زیر سطحی (Kss) محاسبه شد (معادله ۲).

$$K = (K_{sf} + K_{ss}) / 2 \quad (2)$$

## الف) درجه ی کارستی شدن سطحی (Ksf)

درجه ی کارستی شدن سطحی ( $K_{sf}$ ) براساس ارزیابی منطقه از ویژگی های کارست و شکل زمین در واحد سطح، به دو زیرعامل کارن و دولین طبقه بندی می شود. کارن عمده ترین شکل زمین سطحی کارست است که روی شیپها در منطقه های کارستی ظاهر می شود (k)، در حالی که دولین و دیگر فرورفتگی های کارستی عمدتاً در منطقه های با شیب اندک به وجود می آید ( $K_{sf}$ ) برای تهیه کردن نقشه ی درجه ی کارستی شدن سطحی، معیار تراکم در واحد سطح به کار برده شد برای محاسبه کردن این دو زیرعامل، سطح آبخیز به شبکه یی با سلول های یک کیلومتر در یک کیلومتر تقسیم و مساحت شکل های سطحی زمین کارست و فرورفتگی های کارستی در هر سلول محاسبه شد با هم پوشانی دادن این دو نقشه با معادله ی ۳، نقشه ی جدیدی به دست آمد که نشان دهنده ی درجه ی کارستی شدن سطحی ( $K_{sf}$ ) است. با تصویر هوایی استان فارس از دوربین های اولتراکم با قدرت تفکیک ۲۰ سانتی متر، مدل رقومی ارتفاع استان فارس با قدرت تفکیک ۵ متر، تصویر ماهواره یی گوگل ارت، و بازدیدهای میدانی یکساله (۱۳۹۶-۱۳۹۵) نقشه ی میزان کارستی شدن سطحی تهیه و امتیازدهی شد (جدول ۱)

$$K_{sf} = (K_{sf1} + K_{sf2}) / 2$$



جدول ۱- محاسبه و امتیازدهی به زیرعامل توسعه کارست سطحی ( $K_{sf}$ ) (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۳).

مساحت زمین های تخریب شده ی سطحی مانند منطقه های کارن (متر مربع در کیلومتر مربع)	$K_{sf_1}$	مساحت فرو رفتگی های کارستی (متر مربع در کیلومتر مربع)	$K_{sf_2}$	$K_{sf}=(k_{sf_1}+k_{sf_2})/2$
<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

### (ب) درجه ی کارستی شدن زیرسطحی ( $K_{SS}$ )

برای محاسبه کردن درجای کارستی شدن زیرسطحی ( $K_{SS}$ ) دو تراز در آبخیز مشخص شد. منطقه یی با بیش ترین درجه از کارستی شدن زیرسطحی که شامل منطقه هایی با حریم ۲۰۰ متری در اطراف محل های غارها، چاله ها و حفره های مکنده و دره های کور است به این محل ها امتیاز پنج داده شد (جدول ۳). درجه ی کارستی شدن زیرسطحی برای سطح های دیگر آبخیز براساس سه شاخص غیرمستقیم زیر محاسبه کرده شد، برای برآورد کردن  $K_{SS1}$  دامنه ی نوسان تخلیه چشمه های کارستی در دوره ی ۱۰ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۶) با داده های ماهانه ی میانگین آبدهی چشمه ها (تهیه شده از شرکت آب منطقه یی استان فارس و اندازه گیری های میدانی) تحلیل کرده شد ( $Q_{max} / Q_{min} > K_{SS1}$ ) زیرعامل  $K_{SS2}$  با اندازه گیری سرعت متوسط جریان چشمه ها به دست آمد ( $V > K_{SS2}$ ) و  $K_{SS3}$  بر اساس شاخص اشباع کلسیت (یا دولومیت) آب چشمه ها (SI) که شاخص شیمیایی آب است، و با اطلاعاتی از قبیل میزان منیزیم، کلسیم، کربنات کلسیم، دمای آب، و بی اچ با داده های کیفیت آب تهیه شده از شرکت آب منطقه ای استان فارس (۱۳۸۵-۱۳۹۵) و اندازه گیری شده در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در نرم افزار PHREEQC محاسبه شد ( $SI K_{SS3}$ ) شاخص های لازم برای محاسبه کردن درجه توسعه ی کارست زیرسطحی در جدول ۲ آورده شده است، به محل هایی در حوزه که غار و دره های کور در آن است امتیاز پنج داده شد، و برای سطح های دیگر حوزه با سه زیرعامل امتیاز داده شد (جدول ۳) و درجه ی کارستی شدن زیرسطحی ( $K_{SS}$ ) برای حوزه با معادله ۴ محاسبه شد.



$$K_{SS} = (K_{SS1} + K_{SS2} + K_{SS3})/3 \quad (4)$$

جدول ۲- سنجه های لازم برای محاسبه کارست زیر سطحی

چشمه	$Q_{max}/Q_{min}$	$Q_{men(1/s)}$	نمایه ی اشباع کلسیت	نمایه ی اشباع دولومیت	Ca/Mg
گلابی	۲/۵	۲۱/۵	-۱/۲۹	-۲/۴۶	۲/۵۶
رغز	۶	۷	-۱/۳۱	-۲/۴	۳/۷۵
رودبال	۱۲	۳/۸	-۱/۲۸	-۲/۳۴	۳/۱۷

جدول ۳- محاسبه و امتیازدهی به زیرعامل توسعه کارست زیر سطحی ( $K_{SS}$ ) (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۲).

$Q_{max}/Q_{min}$	$K_{SS1}$	سرعت (متر بر ثانیه)	$K_{SS2}$	نمایه اشباع کلسیت یا دولومیت	۱-۴ نمایه ی اشباع کلسیت یا دولومیت	<۱ نمایه ی اشباع کلسیت یا دولومیت	$K_{SS3}$	$K_{SS}=(K_{SS1}+K_{SS2} +$ $K_{SS3})/3$	
<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	-۰/۳ - ۰/۶	۲	>۱-۲	
۵۰-۱۰۰	۳	۱-۱۰	۳	-۰/۳ - ۰	-۰/۳ -۰/۶	-۰/۹ - ۰/۶	۳	>۲-۳	
>۱۰۰	۴	>۱۰	۴	<-۰/۳	<-۰/۶	<-۰/۹	۴	>۳-۴	
منطقه هایی با حریم ۲۰۰ متری در اطراف غارها ، چاله ها ، و حفره های مکنده و دره های کور								۵	>۴-۵





## ۲- شرایط جوی

شرایط جوی (A) در درجه ی اول با تبخیر و تعرق بر میزان تغذیه اثر می کند شرایط دما و بارش را می توان نامستقیم تابعی از ارتفاع (A) در نظر گرفت شدت تابش خورشید (A) و جهت دامنه نیز بر مقدار تبخیر و تعرق و تغذیه اثر می گذارد. زیرعامل A با مدل رقومی ارتفاعی استان فارس با قدرت تفکیک ۵ متر تهیه شد (جدول ۵). زیرعامل شدت تابش خورشید (A) با تصاویر ماهواره ای لندست ۸ در نرم افزار ArcGIS محاسبه شد (جدول ۵) با هم پوشانی دادن نقشه های A و A<sub>۲</sub> با معادله ۵ عامل شرایط جوی (۸) تهیه شد.

$$A = (A_1 + A_2) / 2 \quad (5)$$

## ۳- روان آب

عامل روان آب (R) در کارست بستگی به نفوذپذیری سنگهای کربناته، شیب، و میزان بارندگی دارد. رای محاسبه کردن این عامل باتوجه به وجود روان آب، سطح حوزه به سه قسمت تقسیم و امتیاز عامل روان آب سطحی محاسبه شد (جدول ۴).

جدول ۴- امتیازدهی به عامل روان آب (R) ( موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۲).

R	سطح های درون آبخیز
۱	حریم ۲۰۰متری در هر دو طرف جریان های دائمی ، که با قسمت های کربناته و سنگ آهک و دولومیت به شدت کارستی شده تشکیل و زه کشی می شود
۳	حریم ۲۰۰متری در هر دو طرف جریان های دائمی شکل گرفته در مرز فرورفتگی های کارستی مانند پلزه ، اوالا و مانند آن ها در اطراف جریان های دائمی که در منطقه های غیر کارستی تشکیل می شود
۵	دیگر قسمت های آبخیز

## ۴- عامل شیب (S)

شیب زمین (S) یکی از عامل های اصلی است که باعث ایجاد روان آب می شود و بر درصدی از آب بارندگی که در سطح جریان پیدا می کند، تأثیر دارد. عامل شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۵ متر استان فارس تهیه و امتیازدهی شد (جدول ۵)

## ۵- عناصر زمین ساختی

عامل زمین ساختی (T) شامل دو زیرعامل تراکم گسل ها (Tf) و شیب لایه های زمین شناسی (Td) است زیرعامل تراکم گسل با محاسبه کردن طول گسل در واحد سطح ، برای هر سلول تهیه و امتیازدهی شد (جدول ۵). برای



محاسبه کردن این زیرعامل که گسل ها، محور تاقدیس ها و خط واره های زمین ساختی را شامل می شود، نقشه ی زمین شناسی ( ۱:۱۰۰۰۰۰) برگه آبدان (سازمان زمین شناسی کشور) و نقشه ی خط واره های تکتونیکی با نرم افزارهای ArcGIS و PCA Geomatica به کار برده شد. زیرعامل شیب لایه های زمین شناسی با نقشه ی زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه آبدان امتیاز داده شد (جدول ۵) با هم پوشانی دادن نقشه ی زیرعامل های Td و Tf با معادله ۶ نقشه عامل زمین ساختی به دست آمد.

$$T = (Tf + Td)/2 \quad (6)$$

جدول ۵- امتیازدهی به عامل های شرایط جوی، شیب و عناصر زمین ساختی ( موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۲).

شیب لایه ها (Td)	زیرعامل	تراکم گسل ها (Tf)	زیرعامل	شیب (S)	عامل	ارتفاع (A <sub>1</sub> )	زیرعامل	شدت تابش خورشید (A <sub>2</sub> )	زیرعامل
شیب لایه های زمین شناسی (درجه)	Td	طول گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	Tf	شیب (درجه)	S	ارتفاع (متر)	A <sub>1</sub>	شدت تابش خورشید	A <sub>2</sub>
< ۳۰	۱	۰-۱	۱	۰-۵	۵	< ۳۰۰	۱	> ۰/۵	۱
		۱-۲	۲	۵-۱۵	۴	-۸۰۰ ۳۰۰	۲		
۳۰-۶۰	۳	۲-۳	۳	۱۵-۲۵	۳	-۱۳۰۰ ۸۰۰	۳		
		۳-۴	۴	۲۵-۳۵	۲	-۱۸۰۰ ۱۳۰۰	۴		
> ۶۰	۵	> ۴		> ۳۵	۱	> ۱۸۰۰	۵		

## ۶- سنگ شناسی

ترکیب سنگ شناسی مستقیمانه بر نفوذ پذیری و در نتیجه میزان تغذیه اثر می کند. این عامل از سه زیرعامل نوع سنگ کربناته (a)، لایه بندی (b) و کانی شناسی سنگهای کربناته (c) تشکیل شده است. سنگ آهک به دلیل داشتن نفوذپذیری بیش تر و استعداد بیشتر برای فرآیند کارست زایی، در زیرعامل (a) امتیاز یک، و دولومیت امتیاز ۰/۷



را گرفت (جدول ۷) زیرعامل (b) نامستقیمانه اهمیت عامل زمین ساختی و شکستگی را در نفوذ پذیری آبخوان های کارستی نشان می دهد، فشار مقاومتی چینه ها با ضخامت های مختلف متفاوت است. شکندگی و درز و شکاف لایه های نازک سنگ آهک کم تر از توده های ضخیم و عظیم سنگ آهک است و بنابراین نفوذپذیری آن کمتر است. امتیاز این زیرعامل با نقشه ی زمین شناسی برگه ی آبدان و بازدیدهای میدانی محاسبه شد (جدول ۶). سازند آهکی آسماری جهرم، به دلیل داشتن درز و شکاف بیشتر و توده یی بودن، بیشترین امتیاز زیرعامل (b) را گرفت. زیرعامل (c) باتوجه به درجات خلوص سنگ کربناته تعیین شد. سنگ آهک و دولومیت خالص به ندرت در طبیعت هست و اغلب ترکیب های مختلفی از کانی های دیگر مانند سنگ آهک یا دولومیت آهک-رسی، پلمه سنگی، ماسه یی، چرت و غیره دارد. نفوذ پذیری سنگهای کربناته ی ناخالص معمولا کمتر از سنگهای کربناته ی خالص تر است. بنابراین امتیاز زیرعامل (c) براساس ناخالصی داشتن تعیین کرده می شود، که بر کاهش نفوذپذیری و تغذیه تأثیر دارد. سازند آهکی آسماری جهرم به دلیل داشتن درجه ی خلوص بیشتر، بیشترین امتیاز این زیرعامل را گرفت، و بقیه ی سازندهای حوزه امتیاز کمتری را گرفتند (جدول ۶) عامل سنگ شناسی از حاصل ضرب سه زیرعامل تهیه شد. (معادله ی ۷).

$$L=a*b*c \quad (7)$$

جدول ۶- امتیازدهی به عامل سنگ شناسی ( موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۰).

زیرعامل	نوع سنگ کربناته (a)	زیرعامل	لایه بندی (b)	زیرعامل	ترکیب کانی شناسی سنگ کربناته (c)
a	نوع سنگ کربناته	b	لایه بندی	c	ترکیب کانی شناسی سنگ کربناته
۱	آهک	۵	ضخیم و توده ای	۵	آهکی
				۴	دولومیتی
	دولومیت	۴	لایه لایه	۳	سبلی، ماسه ای
۰/۷		۳	متورق	۲	آهک رسی، بیتومین دار

## ۷- لایه ی پوشاننده

اهمیت عامل لایه پوشاننده (O) به دلیل ایجادشدن لایه ی محدود کننده ی نفوذ در آبخوان کارستی است. لایه ی پوشاننده از دو زیرعامل خاک (O۱) و پوشش زمین شناسی (O۲) تشکیل شده است. برای محاسبه کردن زیرعامل O۱ نقشه ی عمق خاک، بررسی خاکشناسی، و توانایی زمین های آبخیز آبدان در ۱۳۸۹ به کار گرفته و امتیازدهی شد (جدول ۷). زیرعامل پوشش زمین شناسی (O۲) رسوبات نهشتهایی است که روی سازندهای کربناته است، و شامل رسوب های آبرفتی، کوه رفتی، یخچالی دریایی و مانند آن می شود. امتیاز آن با نقشه ی زمین شناسی و



بازدیدهای میدانی محاسبه کرده شد (جدول ۱). نقشه ی نهایی عامل لایه ی پوشاننده با هم پوشانی دادن نقشه ی زیرعاملهای  $O_1$  و  $O_2$  به دست آمد. (معادله ۸).

$$O = (O_1 + O_2) / 2 \quad (8)$$

جدول ۷- امتیازدهی به زیر عامل خاک ( $O_1$ ) (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۶).

$O_1$	ضخامت خاک (سانتی متر)				
	< ۱۵	۱۵ - ۳۰	۳۰ - ۶۰	۶۰ - ۱۰۰	> ۱۰۰
خاک					
Calcomelanosols, Euthric Cambisols, Rendzina	۵	۴	۳	۲	۱
Calcocambisols, Terra Rossa	۴	۳	۲	۱	۱

جدول ۸- امتیازدهی به زیرعامل پوشش زمین شناسی ( $O_2$ ) (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۲).

$O_2$	ضخامت (متر)		
	< ۳	۳ - ۶	> ۶
پوشش زمین شناسی			
رسوب‌های آب‌رفتی، رسوب‌های یخچالی - آب رفتی، رسوب‌های دریایی	۵	۳	۱
رسوب‌های کوه رفتی	۳	۲	۱
رسوب‌های یخچالی	۲	۱	۱

## ۸- پوشش گیاهی

ویژگی های اصلی عامل پوشش گیاهی شامل توسعه سامانه ی ریشه و انشعاب شاخه ها برای این عامل در نظر گرفته شد. برای محاسبه کردن امتیاز عامل پوشش گیاهی، نقشه ی کاربری زمین طرح آمایش سرزمین استان فارس که با تصاویر ماهواره های لندست ۸ Centinel و Google Earth با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شد (سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان فارس، ۱۳۹۵) به کار برده شد، پس از به دست آوردن کاربری های مختلف در حوزه، دقت نتیجه با تصویرهای هوایی استان فارس (قدرت تفکیک ۲۰ سانتی متر) تصویر ماهواره یی گوگل ارت و بازدیدهای میدانی افزایش داده شد. امتیاز عامل پوشش گیاهی با نقشه ی کاربری زمین به دست آمد (جدول ۹) هرچه پوشش گیاهی متراکم تر باشد، امتیاز این عامل کمتر است.



جدول ۹- امتیازدهی به عامل پوشش گیاهی (P) (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰).

پوشش گیاهی	P
صخره‌های لخت	۵
منطقه‌هایی با پوشش پراکنده	۴
مرتع	۳
بوته‌زار	۲
جنگل	۱

### ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی

برای به دست آوردن ارتفاع و شناختن منبع تغذیه ی چشمه های کارستی در دوره ی مرطوب (اسفند ۹۵) از آن ها نمونه برداری شد. برای ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی، ۲۳ نمونه از بارندگی های استان فارس در یک سال آبی (مهر ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶) در ارتفاع های مختلف حوزه و منطقه های اطراف (ارتفاع ۳۰ تا ۱۰۰۰ متری از تراز دریا برداشته شد. برای کم کردن اثر تبخیر در نمونه های بارش، نمونه برداری همزمان با اندکی بعد از بارندگی و در محل ایستگاه های باران سنجی و سایر جاهای مناسب انجام شد، محتوای ایزوتوپ های پایدار دوتریوم و اکسیژن ۱۸ در نمونه های آب زیرزمینی (چشمه ها و باران) در آزمایشگاه ایزوتوپ شرکت مصباح انرژی اندازه گیری کرده شد. شیب ارتفاعی ایزوتوپی منطقه با ارتفاع محل های نمونه برداری از بارش و مقدار ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ در نرم افزار Excel ۲۰۱۶ ترسیم کرده شد.

### نتایج و بحث

#### روش کارست لوپ

#### ۱ - نقشه عامل توسعه کارست

نقشه عامل توسعه کارست از هم پوشانی دادن نقشه های میزان کارستی شدن سطحی و زیرسطحی به دست آمد (شکل الف). محدوده امتیاز این عامل برای حوزه از ۱/۸ تا ۴/۸ بود. اندازه های بیشینه منطبق بر محل های توسعه یافته ی کارستی است، و بیش ترین تراکم رخساره ها و شکل های زمین کارستی در آن است. زمین ریخت شناسی سطحی کارست نقش مهمی در تغذیه کردن و تکامل دادن شبکه ی جریان زیرزمینی دارد، و براساس نقش رخساره های کارستی در تغذیه آبخوان ها رخساره های زمین ریخت شناسی به دو دسته ی رخساره های بسته و رخساره های خطی تقسیم می شود (Cruff & Rants, ۲۰۱۷: ۲۰). رخساره های بسته، رخساره هایی است که تغذیه در



امتداد آن‌ها متمرکز است، و شامل فروچاله‌ها، پونور، شافت، پولیه، اووالا، و آون می‌شود که مطمئن‌ترین شاخص برای تشخیص دادن آبخوان کارستی با شبکه‌ی مجرای فعال است. رخساره‌های خطی شامل درز و شکاف و انواع کارن است که نفوذ در امتداد آنها منتشر است. (Laa et al, ۲۰۱۵: ۹۸) نشان دادند که منطقه‌هایی با تغذیه و نفوذ بیشتر از ۷۰٪ در آبخوان کارستی پرآو-بیستون به تمامی در محدوده‌ی شکل‌های زمین کارستی مانند دولین و اووالا است. (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰). به این نتیجه رسیدند که ۹۸٪ از فروچاله‌های شناسایی شده در کوهستان خورین کرمانشاه در طبقه کارست توسعه یافته است.

## ۲- نقشه‌ی عامل شرایط جوی (A)

با هم پوشانی دادن نقشه‌ی زیر عامل‌های A یک و A دو، نقشه‌ی عامل شرایط جوی (A) محاسبه شد (شکل ۵) محدوده‌ی امتیاز این عامل در حوزه از یک تا چهار به دست آمد. منطقه‌های مرتفع و دامنه‌های رو به شمال بیشترین امتیاز را داشت. در ارتفاع‌های بیش‌تر کاهش دمای هوا به نوبه‌ی خود باعث کاهش دادن تبخیر و تعرق می‌شود. افزایش یافتن ارتفاع منجر به افزایش یافتن بارندگی و بیش‌تر شدن تغذیه‌ی آبخوان‌ها بر اثر افزایش یافتن نفوذ مؤثر و تراوش کردن آب به سامانه‌ی آبخوان می‌شود. شدت تابش خورشید و جهت‌های دامنه نیز بر مقدار تبخیر و تعرق و تغذیه اثر می‌کند (Lawgun & Toong, ۲۰۲۰: ۴۱) نشان داد که افزایش ارتفاع با کاهش دما و افزایش بارش در ارتباط است، و این در فرایند کارست زایی و توسعه‌ی کارست بسیار تاثیر گزار است. تاثیر جهت شیب محلی است و باعث تغییر کردن میزان تبخیر و تعرق، زمان ماندگاری برق و دریافت بارش می‌شود. همه‌ی اینها بر میزان آب مؤثر بر فرآیند انحلال تاثیر گزار است. در مجموع، تأثیر شیب‌های شمالی در توسعه‌ی رخساره‌های کارستی بیشتر از شیب‌های جنوبی است (mimikou & gordios, ۲۰۱۹: ۲۵) نشان دادند که تخلخل تشکیلات آبخوان و ارتفاع بیشترین تأثیر را بر تغذیه و آبدهی چشمه‌های کارستی در ارتفاعات البرز دارد.

## ۳- نقشه عامل روان آب (R)

عامل روان آب میزان تداوم جریان را در نظر می‌گیرد. به دلیل نبودن جریان دائمی در این حوزه، امتیاز این عامل برای کل حوزه ۵ در نظر گرفته شد با افزایش یافتن میزان روان آب، مقدار تغذیه و نفوذ در آبخوان کارستی کاهش می‌یابد.

## ۴- نقشه عامل شیب (S)

محدوده‌ی امتیاز عامل شیب برای حوزه از یک تا پنج محاسبه شد، امتیاز دریافت شده در این عامل نسبت عکس با میزان شیب دارد. بیشترین امتیاز به منطقه‌های هموار در رأس تاقدیس‌ها و کمترین امتیاز به دامنه‌های پرشیب در حوزه داده شد، شیب عاملی مهم در زمین ریخت‌شناسی و توسعه‌ی کارست است، زیرا میزان نفوذ پذیری و



ماندگاری آب در سطح زمین و سطح سنگهای کربناته، تابع شیب است. در شیب کم نفوذ آب، میزان انحلال، و توسعه ی کارست بیشتر است. بنابراین، در سطح های هموار کارستی در رأس ارتفاعها، گسترش رخساره های کارستی بیشتر است ( ۱۱ : ۲۰۱۷, nilson ) نشان دادند که بین سنجه های زمین ریخت سنجی و ویژگی های تشخیص دادنی کارست و ایستگی قوی هست. برای مثال، دامنه هایی با شیب کم فرآیند انحلال را تسهیل می کند. در منطقه های مسطح و کم شیب با فروچاله های فراوان و در شرایطی که به علت زیاد بودن ارتفاع، میزان تبخیر کم باشد، ممکن است بیش از ۹۰ درصد بارش به درون سیستم کارست نفوذ کند. ( عقیفی و بهزادی، ۱۳۹۸ : ۳۵ ).

#### ۵- نقشه عامل عنصر زمین ساختی T

امتیاز عامل عنصر زمین ساختی برای حوزه ۱ تا ۱/۹۹ محاسبه شد. اندازه های زیاد این عامل در حوزه به علت تراکم زیاد گسل و شیب زیاد لایه ها، منطبق بر سازند آسماری جهرم و گروه بنگستان است. مقدار تغذیه آبخوان در تأثیر بسیار زیاد درجه ی درز و شکاف دارشدن توده ی سنگ است. در نزدیک گسل اصلی و منطقه هایی با تخریب زمین ساختی، این میزان به وضوح بیش تر است، و این اصلی پذیرفته شده است. لایه های چینه شناسی افقی نقش کمتری در نفوذ آب دارند، اما به علت بودن شکاف های بین لایه ای، نقش لایه هایی با شیب زیاد در نفوذ کردن آب و تغذیه شدن آبخوان های کارستی مهم است ( ۳۰ : ۲۰۱۸, telmer & best ) نشان داده اند که بودن گسل و درز و شکاف های زمین ساختی همراه با فعالیتهای انحلالی شرایط را برای نفوذ کردن آب و تأثیر گرفتن بیشتر سنگها از عامل انحلال فراهم می کند (عقیفی و قنبری، ۱۳۹۴ : ۴۹). (عقیفی و بهزادی، ۱۳۹۹ : ۳۵) با شناختن عامل های توسعه دهنده ی کارست در جنوب شرق میسوری آمریکا به این نتیجه رسیدند که گسل ها و شکستگی های سنگ بستر شرایط مناسبی را برای فرآیندهای کارستزایی به وجود آورده است. نتیجه ی پژوهش مرادی و همکاران (۲۰۱۶) در شمال خوزستان نیز نشان داد که فعالیت های زمین ساختی و خطواره ها مهم ترین عامل توسعه ی کارست در منطقه است.

#### ۶- نقشه عامل سنگ شناسی (L)

امتیاز عامل سنگ شناسی برای حوزه ۰/۲۴ تا ۴/۸ محاسبه شد. بیشترین امتیاز به دلیل داشتن امکان انحلال، در جای خلوص بیش تر، و توده یی بودن به سازند آهکی آسماری-جهرم داده شد. نفوذپذیری سنگهای آهکی بستگی به مواد تشکیل دهنده، نحوه ی تشکیل، لایه های مختلف آنها، و میزان درز و شکاف و شکستگی ناشی از فعالیت های زمین ساختی دارد. از این رو زمین ساخت و انحلال، نقش عمده ای در تغذیه و آبدهی این آبخوانها دارد (عقیفی و بهزادی، ۱۳۹۸ : ۴۰) نشان دادند که سازند بیستون در کرمانشاه به دلیل داشتن درجه ی خلوص بیش تر، شکستگی بیش تر، و توده یی بودن بیشترین نقش را در انحلال و توسعه کارست دارد.



## ۷- نقشه عامل لایه ی پوشاننده (O)

نقشه این عامل از هم پوشانی دادن نقشه های دو زیرعامل O<sub>1</sub> و O<sub>2</sub> به دست آمد امتیاز عامل لایه ی پوشاننده برای حوزه یک تا پنج محاسبه شد. بیشترین امتیاز به خاکهای کم عمق روی سازندهای آسماری جهرم و گروه بنگستان به دلیل ایجاد کردن شرایط مناسب برای نفوذ سریع تر، و امتیاز کمتر به خاک های دامنه یی و آبرفتی به دلیل ضخیم بودن و کم تر نفوذ کردن داده شد لایه ی پوشاننده، عمدتاً به دلیل ایجاد کردن مانع در نفوذ کردن جریان سطحی به آبخوان (وجود یک لایه ی خاک در اپی کارست) نقش مهمی در کاهش دادن توان تغذیه ی آبخوان های فارسی دارد. سنگ های کربناته ممکن است با پوشش سنگی و یا خاکی پوشاننده شود (damavandi et al . ۲۰۱۱ : ۸۷). هرچه خاک ضخیم تر و خواص آب گذری آن ضعیف تر باشد، نفوذ کندتر، و در نتیجه تبخیر و تعرق بیش تر است. (رجبی و همکاران، ۱۳۹۵ : ۲۹) با بررسی کردن آستانه ی روان آب در زمین های کارستی به این نتیجه رسیدند که نفوذپذیری سنگ آهکهای خردشده و بی پوشش خاک زیاد است. بودن لایه ی خاک بر شرایط نفوذ تاثیر می گذارد. اگر نفوذپذیری خاک کم تر از سنگهای کارستی شده مدفون باشد، میزان تغذیه کم تر و ظرفیت نفوذ خاک، عامل مهار کننده ی تغذیه می شود. (ishida et al . ۲۰۱۸ : ۷۰) منطقه هایی که سنگهای کربناته ی کارستی شده ی پوشش خاک در آن است، نشان دهنده ی تغذیه شدن خود است، و تبخیر و تعرق در سنگهای کربناته کارست شده عریان در آن کم است و می توان انتظار داشت که تا ۸۰٪ از بارش نفوذ کند. بودن پوشش روی خاک و یا گیاه میزان تبخیر و تعرق را افزایش و نسبت تغذیه را کاهش می دهد. (vanrompay , ۲۰۱۸ : ۵۵)

## ۸- نقشه عامل پوشش گیاهی (P)

امتیاز این عامل برای حوزه یک تا چهار محاسبه شد به دلیل کم بودن پوشش گیاهی و افزایش یافتن نفوذ آب در مرتع های کم تراکم، بیشترین امتیاز به آنها داده شد، که منطبق بر قسمتی از سازندهای آهکی و بخشی از دشتهای آبرفتی حوزه است. گیاهان بر میزان تغذیه تأثیر دارند. پوشش گیاهی با افزایش یافتن میزان دی اکسید کربن در خاک که منجر به افزایش یافتن دی اکسید کربن محلول در آب نفوذ کرده می شود، باعث تسریع شدن فرآیند کارستزایی می شود. از طرف دیگر، پوشش گیاهی زیاد و متراکم مستقیماً متوسط تبخیر و تعرق سالانه را افزایش می دهد، و در نتیجه باعث کاهش یافتن مقدار نفوذ آب می شود. (عقیقی و بهزادی، ۱۳۹۸ : ۳۸) نشان دادند که بیرون زدگی های سنگی و مرتع های کم تراکم، به دلیل کم بودن میزان پوشش آنها و افزایش یافتن نفوذ آب نقش مهمی در تغذیه ی آبخوان کارستی خورین کرمانشاه دارد.





## بهنه بندی منطقه های مستعد تغذیه

نقشه نهایی تغذیه ی آبخوان ( معادله ۱) نشان دهنده توزیع مکانی تغذیه ی متوسط سالانه (Reh) است که میزان تغذیه در آن به درصد بیان می شود. به عامل های کارستایی، روان آب و سنگ شناسی بیشترین امتیاز داده شده است، زیرا این عامل ها نقش اصلی در تغذیه شدن آبخوان کارستی دارند. پژوهش های (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۶ : ۱۶) نشان داد که اینها از مؤثرترین عامل های توسعه ی کارست و تغذیه ی آبخوان های کارستی است، نقشه ی نهایی تغذیه نشان داد که میزان تغذیه ی سالانه ی محاسبه شده برای آبخوان کارستی حوزه ۳۶ تا ۸۶ است. به عبارت دیگر، ۳۶ تا ۸۶٪ از بارش ورودی سالانه، نفوذ می کند و تبدیل به تغذیه می شود و مانده ی آن از دسترس خارج می شود (جدول ۱۰) منطقه هایی با تغذیه ی ۳۶ تا ۵۶ با مساحت ۷۲۵۷ هکتار (حدود ۵۴٪ از مساحت حوزه) منطبق بر دشتهای آبرفتی و قسمتی از سازندهای گچساران و پایده گورپی است. با توجه به مساحت این سازندها که حدود نیمی از سطح حوزه است، این یافته دور از انتظار نیست دامنه های خردشده با درز و شکاف های زیاد و زمین های کارن ۵۶۷۱ از تغذیه را داشت. این دامنه ها با داشتن شیب نسبتا زیاد، به شدت خردشده و اغلب به صورت رخ نمونههای سنگی درز و شکاف دار است. خاک این دامنه ها کم ضخامت و پوشش گیاهی آن تنگ است، و به این علت، میزان نفوذ در این منطقه ها نسبتا زیاد است. این منطقه ها، منطبق بر قسمتی از سازندهای گروه بنگستان و پایده-گورپی است و در ۲۸٪ از مساحت حوزه است. ناحیه های با تغذیه ی ۷۱٪ تا ۸۶٪ منطبق بر منطقه های مرتفع کوهستان و ۱۸٪ از مساحت منطقه است. خاک این قسمت بسیار کم ضخامت و درشت دانه، پوشش گیاهی آن تنگ، زمین ریخت شناسی کارست آن توسعه یافته، و منطبق بر آهک آسماری جهرم و گروه بنگستان است. تراکم فروچاله ها و دره های کور (شکل ۳) و امکان تغذیه شدن متمرکز با آنها، نقش بسیار مهمی در زیاد بودن تغذیه در این قسمت دارد. این یافته ها نشان دهنده ی نقش اصلی زمین ریخت شناسی کارست در توزیع مکانی تغذیه در آبخوان حوزه است. (jacks et al. ۲۰۱۷: ۹۰).

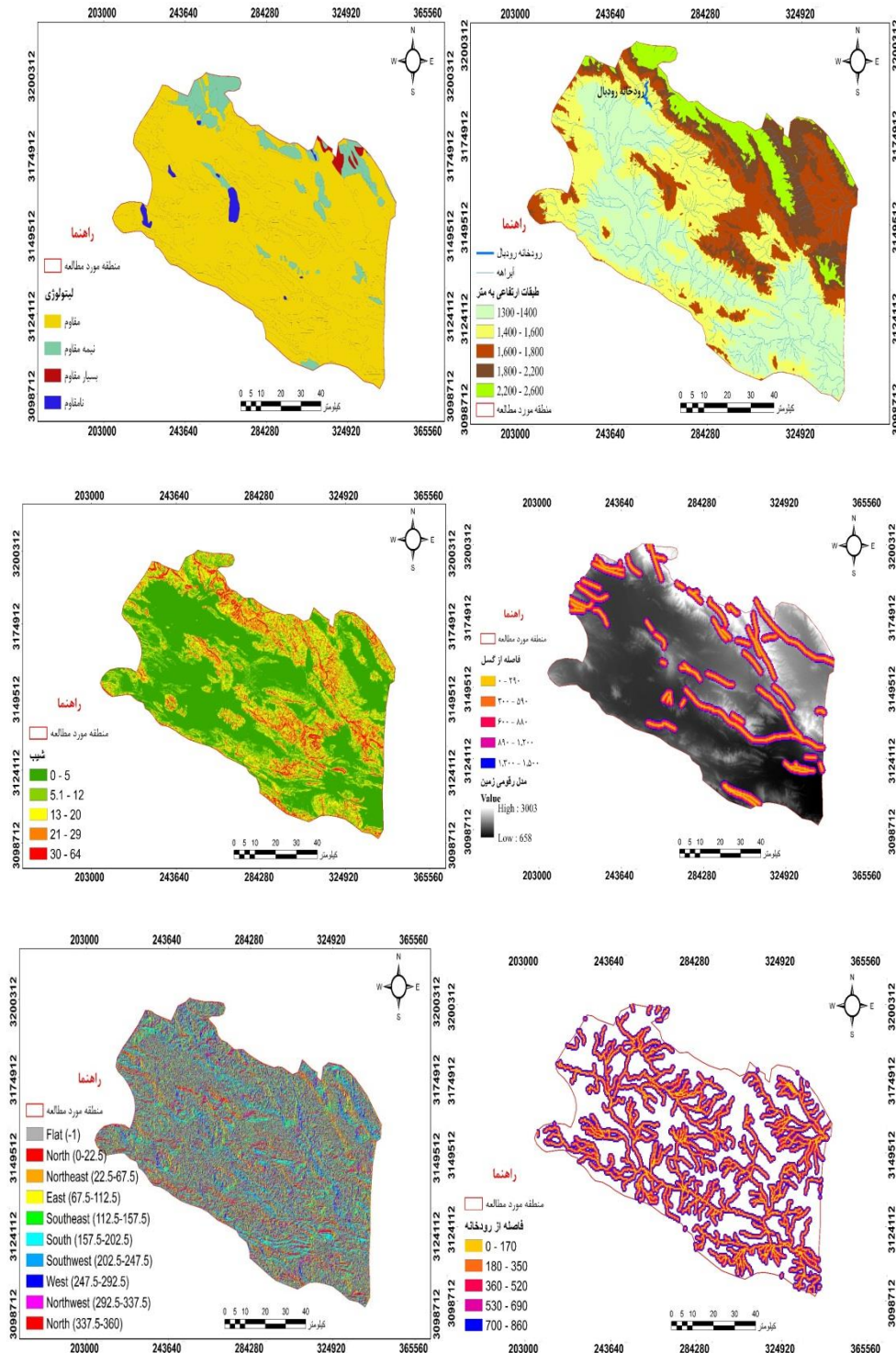


جدول ۱۰- مساحت و درصد مساحت پهنه های توزیع تغذیه سالانه با روش کارست لوپ و تعداد فروچاله های شناسایی شده در هر طبقه تغذیه

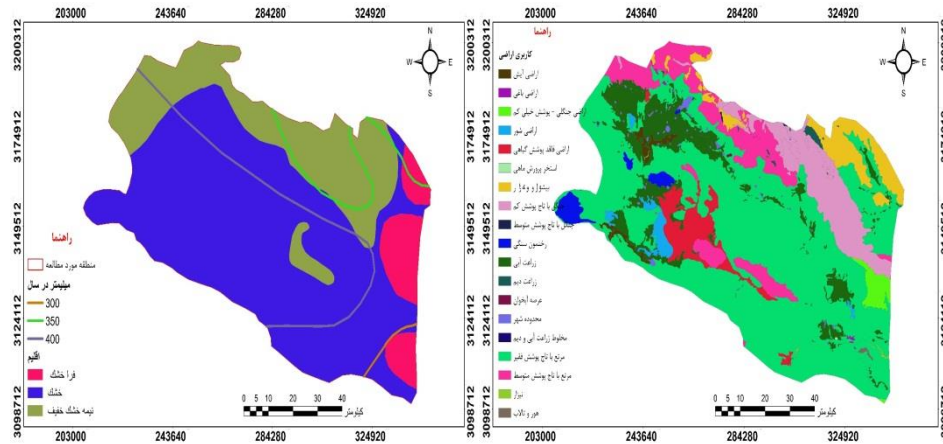
تعداد فروچاله های شناسایی شده	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	تغذیه (درصد)
۰	۰/۸	۱۳۵	۳۶ - ۴۱
۰	۳۳	۴۴۱۷	۴۱ - ۴۶
۰	۱۵	۱۹۹۷	۴۶ - ۵۱
۶	۶	۷۰۷	۵۱ - ۵۶
۲	۰/۲	۲۲	۵۶ - ۶۱
۱۰	۲	۲۷۹	۶۱ - ۶۶
۱۱۰	۲۵	۳۳۴۰	۶۶ - ۷۱
۶۱	۱۲	۱۵۶۴	۷۱ - ۷۶
۷۹	۵	۶۲۹	۷۶ - ۸۱
۱۶	۱	۱۳۹	۸۱ - ۸۶
۲۸۴	۱۰۰	۱۳۲۲۹	کل حوزه

### فاکتورهای موثر در مدل سازی توزیع مکانی تغذیه

در این تحقیق برای پهنه بندی در منطقه مورد مطالعه عوامل تاثیرگذار شامل شیب، جهت شیب، زمین شناسی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، ایزوتوپی و ... منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

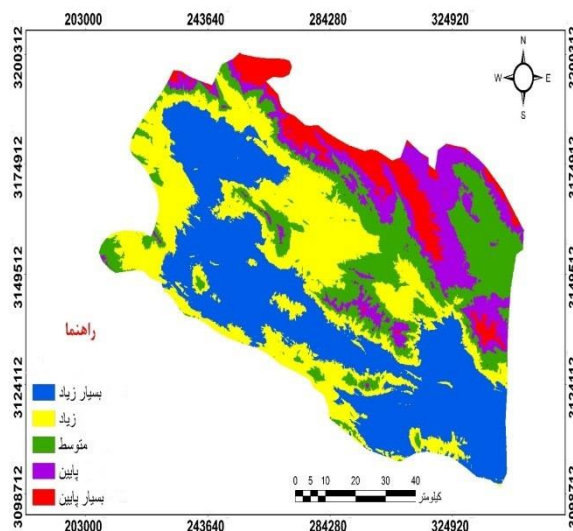


شکل ۳: لایه های استفاده شده در پهنه بندی توزیع مکانی تغذیه



شکل ۴: لایه های استفاده شده در پهنه بندی خطر زمین لغزش

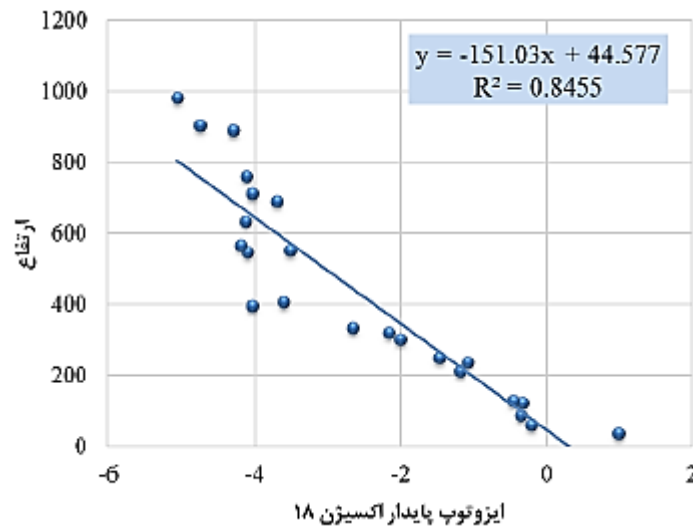
یافتن ارتفاع تغذیه ی چشمه ها با شیب ارتفاعی ایزوتوبی ارتفاع متوسط تغذیه ی چشمه ها از ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوبی ( $R^2=۸۴/۰$ ) با ارتفاع محل های نمونه برداری در برابر اندازه های دلتای ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ محاسبه شده است (جدول ۱۱، شکل ۵) ارتفاع محل های تغذیه ی چشمه ها با شیب ارتفاعی ایزوتوبی در محدوده ی طبقه ی ارتفاعی ۳۵۰ - ۵۵۰ گذاشته شد (شکل ۱) و باتوجه به نقشه ی توزیع مکانی تغذیه ی آورده شده با روش کارستی لوپ، منطق بر طبقه ی بیش ترین تغذیه است. نتیجه ی پژوهش های بسیاری (روستائی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۴) با این پژوهش همخوانی دارد و بیانگر این نکته است که با شیب ارتفاعی ایزوتوبی می توان ارتفاع محل های تغذیه ی چشمه ها را با تخمینی پذیرفتنی برآورد کرد.



شکل ۵: نقشه توزیع مکانی تغذیه درآبخوان های کارستی رودبال داراب

جدول ۱۱- ارتفاع متوسط تغذیه چشمه ها یا شیب ارتفاعی ایزوتوپی.

چشمه	ارتفاع چشمه (متر)	دلتای ایزوتوپ پایدار اکسیژن	ارتفاع تغذیه (متر)
گلابی	۶۸	-۲/۳۲	۳۹۵
رغز	۶۰	-۲/۱۹	۳۷۶
رودبال	۸۱	-۲/۵۴	۴۲۹



شکل ۶- نمودار شیب ارتفاعی ایزوتوپی

## نتیجه گیری

آبخیز رودبال داراب به دلیل داشتن سازندهای آهکی که حدود ۴۶٪ از مساحت حوزه است، و داشتن شرایط زمین ساختی و زمین ریخت شناسی، شرایط مناسبی برای ایجاد کردن و توسعه دادن رخساره های متنوع کارستی به وجود آورده است، که باعث شده است در حوزه ی آبخوان کارستی ایجاد شود که نقش مهمی در تأمین کردن آب خانگی و کشاورزی روستاهای پایین دست دارد. بررسی ویژگی های شیمیایی آب چشمه های خروجی از آبخوان نشان داد که سازند تغذیه کننده ی آن ها بر اساس نسبت  $Ca / Mg$  آهکی است (جدول ۲) روش کارست لوب برای مدل سازی کردن توزیع مکانی تغذیه در منطقه های کارستی است، و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، تأکید بیشتری بر سامانه ی کارستی، روان آب، سنگ شناسی و لایه ی پوشاننده دارد. پهنه بندی منطقه های مستعد تغذیه با مدل کارستی لوب نشان داد که تغذیه در ۴۵٪ از مساحت حوزه بیش از ۶۰ درصد است، که منطبق بر سازندهای آهکی گروه بنگستان و آسماری جهرم است. پراکنش محل های تغذیه در حوزه نشان داد که تغذیه در ۶٪ از مساحت حوزه ۷۶ تا ۸۶ بود، که دقیقاً منطبق بر سازند آهکی آسماری جهرم با مساحت ۹۴۶ هکتار (۸٪ از حوزه است. بررسی



نقشه پراکنش فروچاله های کارستی نیز نشان دهنده ی تراکم شدید رخساره های کارستی در محدوده ی تغذیه ی بیشینه در حوزه است. نوع رخساره های حوزه باعث ایجادشدن دو نوع تغذیه ی منتشر و متمرکز در آبخوان شده است، به طوری که تغذیه ی منتشر از درز و شکاف ها و زمین های کارن، و تغذیه ی متمرکز از راه فروچاله ها و دره های کور انجام می شود. متوسط ارتفاع منطقه ی تغذیه چشمه های گلابی، رگز و رودبال با شیب ارتفاعی ایزوتویی به ترتیب ۳۹۵، ۳۷۶ و ۴۲۹ متر برآورد کرده شد که در طبقه ی ارتفاعی ۳۵۰-۳۵۰ متر است و با توجه به نقشه ی توزیع مکانی تغذیه ی آورده شده با روش کارستی لوپ، با قسمت های بیشترین تغذیه در حوزه مطابقت دارد یعنی چشمه ها از ارتفاعی تغذیه می شوند که در روش کارستی لوپ در محدوده ی تغذیه ی بیشینه (۷۶٪ تا ۸۶٪) شناسایی و پهنه بندی شده است هم خوانی نتیجه ی روش کارستی لوپ در مدل سازی کردن توزیع مکانی تغذیه و شناختن محدوده ی بیش ترین تغذیه در حوزه با برآورد کردن ارتفاع محل های تغذیه چشمه ها با روش شیب ارتفاعی ایزوتویی، نشان دهنده ی کارآیی هر دو روش در شناختن محل های تغذیه ی آبخوان کارستی در آبخیز رودبال داراب است. پیشنهاد می شود که حوزه ی آبگیر هر چشمه با روش های ردیابی مشخص، و روش کارستی لوپ در آن اجرا شود. میزان نفوذ با روش ترازنامه ی آب در حوزه ی آبگیر چشمه ها محاسبه و با میزان نفوذ و تغذیه ی به دست آمده با روش کارستی لوپ مقایسه شود. نیز لازم است با نمونه برداری کردن از بارش و آب زیرزمینی در دوره های خشک و مرطوب در سال های مختلف، و تحلیل کردن ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸، دوتریوم و تریتیوم، منشأ و مکان تغذیه، مسیر حرکت آب زیرزمینی، و زمان ماندگاری آب در سامانه ی کارستی به دقت مشخص شود.

## منابع

- اداره کل آبهای زیر زمینی وزارت نیرو . ( ۱۳۷۰ ). منابع آبهای زیر زمینی حوضه آبریز رودخانه کل (شور) .
- حسنلو ، رضا .هاشمی ، سعید . (۱۳۹۸) ؛ تعیین مکان های مناسب برای سدهای آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در دشت زنجان. دومین کنفرانس ملی مهندسی سد. دانشگاه آزاد زنجان.
- دمانندی ، باقر . رضایی ،علی .پناهی،حمید (۱۳۹۶) ، یافتن منابع آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: وصله صلیون) ، دومین کنفرانس ملی علوم زمین . دانشگاه آزاد زنجان ، ۱: ۳۲۱-۳۳۰
- راکعی، بابک . خامه چیان ، ماشاله . عبدالملکی ، پرویز . گیاهیچی ، پانته آ ( ۱۳۹۶ ) ، کاربرد سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پهنه بندی خطر زمین لغزش ، مطالعه موردی : ناحیه سفیدار گله در استان سمنان ، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سیو سوم ، شماره ۱.(۶۴-۵۷).
- رجبی ، معصومه . ولی زاده ، کامران . عابدی قشلاقی ، حسن ( ۱۳۹۵ ) ، ارزیابی و پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی : حوضه آذر شهر چای )، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۱، صص ۶۰-۷۴.
- روستائی ، شهرام . خدائی قشلاق ، لایلا. خدائی قشلاق ، فاطمه . (۱۳۹۳) ، ارزیابی روش های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چند معیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سدها(مطالعه موردی: سد قلعه چای) ، پژوهش های جغرافیای طبیعی ، دوره ۴۶ ، شماره ۴ ، صص ۴۹۵-۵۰۸.
- زارع ابیانه ، حمید . بیات ورکشی ، مریم . معروفی ، صقر . ( ۱۳۹۲ ) ، مقایسه و پیش بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مطالعه موردی : دشت شهربابک- استان کرمان [مقاله کنفرانسی]
- سرتپی ، عبدالحمید . انتظام سلطانی ، ایمان . (۱۳۹۱) ، بررسی زمین لغزش های ساختگاه سد قلعه چای عجبشیر، سی امین گردهمایی علوم زمین ، بهمن ، صص ۱-۷.
- سلیمانی ، داوود . بهرامی ، سیروس . (۱۳۹۷) ، تعیین عوامل مناسب برای سدهای زیرزمینی با استفاده از GIS و RS، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران ، ۱: ۲۳۴-۲۳۹ .
- عفیفی ، محمدابراهیم . بهزادی ، بهنام . (۱۳۹۹) ، مکان یابی سدهای زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مطالعه موردی حوضه آبخیز رودخانه کل لارستان پایان نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان .
- عفیفی ، محمد ابراهیم . (۱۳۹۸) ، توسعه منابع آب در محیط زیست شهری ؛ انتشارات پیروز .
- فرجی ، حسنعلی . سبکبار ، حسین . نصیری ، محمد حمزه . (۱۳۹۰) ، تعیین عرصه های مناسب برای تغذیه مصنوعی برپایه تلفیق روش های ANP و مقایسه زوجی در محیط GIS مطالعه موردی دشت گوربایگان فسا مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی ، سال ۲۲ شماره ۴ زمستان .



- کردی، رضوان. فرامرزی، مرزبان. (۱۳۹۵)، مکان یابی سدهای زیر زمینی در مناطق خشک و نیمه خشک غرب ایران، مطالعه موردی مهران استان ایلام، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال هفتم شماره ۱۳ بهار و تابستان ۱۳۹۵
- مختاری، شهرو. جعفری نیا، رضا. نجاری، محسن. شهیدی، مهدیه. (۱۳۹۸)، بررسی ارتباط بین خصوصیات هیدروژئومورفولوژی و میزان جریان های زیر قشری با استفاده از رویکرد شبکه عصبی مصنوعی مطالعه موردی سدهای زیر زمینی استان کرمان، نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال سیزدهم شماره ۴۶ پاییز
- معماریان، حسین. (۱۳۹۴)، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.
- عقیقی، محمدابراهیم. قنبری، عبدالرسول. (۱۳۹۴)، هیدرولوژی و ژئومورفولوژی کارست، انتشارات پیروز ۱۳۹۴
- موسوی، سیدحسن. چیتسازان، محمد. میرزایی، هادی. (۱۳۹۸)، تلفیق سنجش از دور و GIS برای نقشه برداری از مناطق مناسب برای شارژ مجدد آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی، منطقه کومستان)، همایش ژئوماتیک، تهران.
- Cruff, F.W., and Rants, S.E. (۲۰۱۷). " Comparison of methods used in flood frequency studies for Communities in Semiarid Regions. TERRA, ۱: ۶۳-۶۵.
- Damavandi, A.A., F. Rezaei and M. Panahi. ۲۰۱۱. Locating Groundwater Resources by Using Remote Sensing and GIS (Case Study: Salebon Catchment). Second National Geosciences Conference. Zanjan Azad University, ۱: ۳۲۱-۳۳۰ (In Persian).
- Ishida, S., M. Kotoku, E. Abe, M.A. Fazal, T. Tsuchihara and M. Imaizumi. ۲۰۱۸. Construction of Subsurface Dams and Their Impact on the Environment. Materials and Geoenvironment, ۵۰: ۱۴۹-۱۵۲.
- Jacks, G., V.P. Sharma and G.K. Sharma. ۲۰۱۷. Hydrochemical Studies, Sida-Assisted Groundwater Project in Kerala, a Report, ۱: ۱-۵.
- Laa, A., M. Kampanart and S. Kriengsak. ۲۰۱۵. Approachability of Subsurface Dams in the Northeast - Thailand. International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO ۲۰۰۵), ۲۸-۳۰ November ۲۰۰۵, Khon Kaen, Thailand. ۱: ۱۴۹-۱۵۵.
- Lawgun, N. and Toong A.T. (۲۰۲۰). " Regional flood- frequency analysis of small catchment in
- Mimikou, M. and Gordios, J. (۲۰۱۹). "Regional analysis of the mean annual flood and of flood
- Nilsson, A. ۲۰۱۷. Groundwater Dams for Small - Scale Water Supply. Intermediate Technology Publications, ۷۶ pp. North Auckland and coromandel "Journal of hydrology. Vol. ۲۴, No. ۲
- Telmer, K. and M. Best. ۲۰۱۸. Underground Dams: a Practical Solution for the Water Needs of Small
- Vanrompay, L. ۲۰۱۸. Report on the Technical Evaluation and Impact Assessment of Subsurface Dams (SSDs). TLDP Technical Report, ۱۴ pp.





## Karst hydrological evaluation to model the spatial distribution of nutrition in karst aquifers Case study of Darab city

### Abstract

Assessing the spatial distribution of recharge in karstified terrains is very important for water management and protection, but it is a complex issue due to the complexity of natural conditions and water movement in karst areas, and the application of conventional methods has not provided satisfactory results in these terrains. The KARSTLOP method is a new technique to display the spatial distribution map of recharge and arrive at the statistical mean value of the recharge in a watershed. The purpose of this study was modelling the spatial distribution of recharge using the KARSTLOP method in the Tangekhosh Watershed of Busbehr Province. The zoning map of recharge areas was prepared using the KARSTLOP method in the ArcGIS software. The results were compared with the geomorphologic map of the surface karst and the height of recharge estimated by the altitudinal isotopic gradient in order to evaluate the model's accuracy in estimating the values of recharge. Altitudinal isotopic gradient was drawn using the isotopic content of precipitation samples and the height of the sampling points during the ۲۰۱۶-۲۰۱۷ period. Digital recharge map obtained by the KARSTLOP method was shown that ۴۵ percentage of the watershed areas had more than ۶۰ percentage of the recharge, which corresponded to the limestone formations that contained a maximum density of the karstic landforms. The height of the recharge points of the golabi, raghaz and rodbal springs was estimated at ۳۹۵, ۳۷۶ and ۴۲۹ meters, respectively, using the altitudinal isotopic gradient method, which were placed in the altitude range of ۳۵۰-۵۵۰ meter and it contains the maximum recharge zone (۷۶ to ۸۶ percentage) of the KARSTLOP method. The comparison of the KARSTLOP recharge map with that of the recharge height of the springs using the altitudinal isotopic gradient indicated that the KARSTLOP method performed acceptably in determining the maximum recharge range and the spatial distribution of recharge in the darabrodbal Watershed

Keywords: karst aquifer, Darab, loop karst, isotopic