

دوره‌ی ۳۳، شماره‌ی ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۲۶، بهار ۱۳۹۹، صفحه‌های ۱۰۴-۸۸
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2019.126518.1226

پژوهش‌های آبخیزداری

مدل‌سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخوان‌های کارستی آبخیز تنگ‌خوش (استان بوشهر) با روش کارست‌لپ

فاطمه توکلی‌راد

(نویسنده‌ی مسئول)* دانش‌آموخته دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران

علی‌اکبر نظری‌سامانی

دانشیار، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران

آرش ملکیان

دانشیار، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران

ضرغام محمدی

دانشیار، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه شیراز

* رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: F.tavakolirad@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۱ خرداد ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۱۲ شهریور ۱۳۹۸

چکیده

ارزیابی توزیع مکانی تغذیه در منطقه‌های کارستی نقش مهمی در مدیریت و حفاظت از منابع آبی دارد. به دلیل پیچیدگی شرایط طبیعی و حرکت آب در منطقه‌های کارستی، چگونگی تغذیه در آبخوان‌های کارستی پیچیده است و به کار بردن روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تغذیه در ناحیه‌های کارستی نتیجه‌ی رضایت‌بخشی نداشته است. کارست‌لپ روشی جدید برای تهیه‌کردن نقشه‌ی توزیع مکانی تغذیه و محاسبه‌کردن میانگین تغذیه در حوزه است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی کردن توزیع مکانی تغذیه با روش کارست‌لپ در آبخیز تنگ‌خوش استان بوشهر است. نقشه‌ی پهنه‌بندی منطقه‌های تغذیه با روش کارست‌لپ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه و برای ارزیابی کردن دقت آن در یافتن محل‌های تغذیه، نتیجه با نقشه‌ی زمین‌ریخت‌شناسی کارست سطحی، و ارتفاع محل‌های تغذیه‌ی برآورد شده با شیب ارتفاعی ایزوتوپی مقایسه کرده شد. شیب ارتفاعی ایزوتوپی با محتوای ایزوتوپی نمونه‌های بارش و ارتفاع محل‌های نمونه‌برداری در دوره‌ی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ ترسیم کرده شد. بررسی نقشه‌ی رقومی تغذیه با روش کارست‌لپ نشان داد که تغذیه در ۴۵٪ از مساحت حوزه بیش از ۶۰٪ است، و این محل‌ها بر سازندهای آهکی منطبق است و بیش‌ترین تراکم رخساره‌های کارستی در آن است. ارتفاع محل‌های تغذیه‌ی چشمه‌های دوین سرمستان، گنوی و تنگ‌خوش با شیب ارتفاعی ایزوتوپی به ترتیب ۳۹۵، ۳۷۶ و ۴۲۹ متر برآورد کرده شد (در طبقه‌ی ۵۵۰-۳۵۰)، و نقشه‌ی توزیع مکانی تغذیه‌ی به‌دست‌آمده با روش کارست‌لپ نشان داد که بر طبقه‌ی بیش‌ترین تغذیه (۷۶ تا ۸۶٪) منطبق است. مقایسه‌ی نقشه‌ی تغذیه‌ی روش کارست‌لپ با ارتفاع محل‌های تغذیه‌ی چشمه‌ها با شیب ارتفاعی ایزوتوپی نشان داد که کارایی روش کارست‌لپ در شناختن محدوده‌ی بیش‌ترین تغذیه، و مدل‌سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخیز تنگ‌خوش پذیرفتنی است.

واژگان کلیدی: آبخوان کارستی، تغذیه، آبخیز تنگ‌خوش، روش کارست‌لپ، شیب ارتفاعی ایزوتوپی

مقدمه

رادولووویچ و استیوانووویچ (۲۰۱۲). انتظار می‌رود همکاری‌ها (۲۰۱۵) در مدل‌سازی مکانی منطقه‌های تغذیه در آبخوان خورین استان کرمانشاه با روش کارست‌لپ به این نتیجه رسیدند که تغذیه در ۸۸٪ آبخوان بیش از ۵۰٪ است، و منطقه‌های با تغذیه‌ی بیش از ۷۰٪ بر ناحیه‌های توسعه‌یافته‌ی کارستی رأس کوهستان منطبق است که به‌شدت زمین‌ساختی شده (تکتونیزه) است و پوشش گیاهی آن تنک و خاک آن کم‌ضخامت است. بهرامی و همکاران (۲۰۱۶) میزان تغذیه را با روش کارست‌لپ در بیش از ۷۰٪ مساحت آبخوان کارستی پرآو-بیستون در کرمانشاه به میزان ۵۰٪ بارش برآورد کردند، و نشان دادند که زمین‌ریخت‌شناسی نقش اصلی را در تغذیه‌ی این آبخوان دارد.

کارایی روش کارست‌لپ در شناخت منطقه‌های تغذیه‌ی آبخوان کارستی مناسب است. دسترنج (۲۰۱۸) میزان تغذیه در آبخوان‌های کارستی بیستون و دالاهو در استان کرمانشاه را با روش کارست‌لپ به ترتیب ۸۳-۳۶ و ۸۱-۳۷٪ برآورد کرد و به این نتیجه رسید که منطقه‌هایی با بیش‌ترین میزان تغذیه شیب کم، خاک کم‌ضخامت و درشت‌دانه، پوشش گیاهی تنک، زمین‌ریخت‌شناسی کارست توسعه‌یافته و به‌شدت زمین‌ساختی شده دارد. تفسیر کردن داده‌های ایزوتوپی یکی از راه‌های دقیق تعیین محل (ارتفاع)، نوع و زمان تغذیه در آبخوان‌های کارستی است. میزان ایزوتوپ پایدار اکسیژن و هیدروژن در اغلب آب‌های زیرزمینی در عمق‌های کم با اندازه‌های موجود آن‌ها در آب‌های جوی یکسان است. به‌همین دلیل، اغلب آب‌های کارستی روی خط و یا نزدیک خط آب جوی^۱ و مشخصاً ناشی از بارش‌های محلی است. ارتفاع بر ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های بارش تأثیر دارد. با افزایش ارتفاع، ایزوتوپ‌های سنگین به‌تدریج خارج می‌شود، و در نتیجه ترکیب ایزوتوپی بارانی که در ارتفاعات می‌بارد سبک‌تر است. این اصل را می‌توان برای شناخت منطقه‌های تغذیه آبخوان‌های کارستی به کار برد (کریمی وردنجانی (۲۰۱۱). رابطه‌ی مشخصی بین $\delta^{18}O$ (ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸) بارش و ارتفاع هست، که این امکان را می‌دهد که بتوان ارتفاع متوسط تغذیه را به‌تقریب برای هر چشمه تخمین زد. ترکیب ایزوتوپی چشمه‌ها نشان‌دهنده‌ی ارتفاع متوسط منطقه تغذیه آن‌ها است، بنابراین متوسط ارتفاع منطقه‌ی تغذیه‌ی هر چشمه را می‌توان با شیب ارتفاعی ایزوتوپی^۲ محاسبه کرد (کوهفل و همکاران ۲۰۰۸). در این شرایط، برای شناخت ارتفاع تغذیه، می‌توان اندازه‌های میانگین $\delta^{18}O$ را در طول نیم یا کل سال در برابر ارتفاع ترسیم کرد (یاشیمورا و همکاران ۲۰۰۱). در پژوهش‌های سامانه‌های کارستی، برای ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی، ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ بیش‌تر از دوتریوم به کار برده می‌شود (آزاز و همکاران ۲۰۰۸). کاربرد این شیب‌ها

آبخوان کارستی سنگ‌های کربناته‌یی با آب زیرزمینی است که می‌توان از آن بهره‌برداری کرد (بکوایز ۲۰۰۵). یکی از دلایل اهمیت‌داشتن بررسی منطقه‌های کارستی منابع مهم آبی آن است. به‌طور کلی سه منطقه‌ی تغذیه، انتقال و تخلیه در این آبخوان‌ها است. منطقه‌های تغذیه تأمین‌کننده‌ی ورودی آبخوان اند که نقشی اساسی در چرخه‌ی آب‌شناختی آبخوان‌های کارستی دارند. بررسی تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی از میانه‌ی دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد (هیلسی ۲۰۱۰). بخش بزرگی از پژوهش‌های تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی مدل‌سازی پویایی کارست است (جونز و همکاران ۲۰۰۰، هاگس و همکاران ۲۰۰۸، جانزا ۲۰۱۰). به‌علت پیچیدگی ارزیابی کردن توزیع مکانی تغذیه و نفوذ آب در منطقه‌های کارستی، روش‌های برآورد کردن تغذیه در این آبخوان‌ها غالباً نامستقیم است (چولز ۲۰۱۶). به‌کاربردن روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تغذیه مانند اندازه‌گیری مستقیم در سایت‌های آزمایشی، برآورد تبخیر و تعرق با معادله‌های تجربی و روش‌های مبتنی بر قانون دارسی در ناحیه‌های کارستی نتیجه‌ی رضایت‌بخشی نداشته است. هم‌اکنون واقع‌بینانه‌ترین روش برآورد تغذیه و نفوذ آب، روش جعبه‌ی سیاه بیلان آب است که در مقیاس آبخیز به‌کار می‌رود، و بارش و آب‌دهی اصلی‌ترین اجزای ورودی و خروجی آن است، هرچند به‌کاربردن این روش برای ارزیابی کردن توزیع مکانی و تغییر فصلی تغذیه امکان‌پذیر نیست (رادولووویچ و استیوانووویچ ۲۰۱۲). مدل‌سازی منطقه‌های تغذیه در آبخوان‌های کارستی موضوعی جدید است که با پیش‌رفت سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور به آن توجه شد (شبابان و همکاران ۲۰۰۵، آندرو و همکاران ۲۰۰۸، رادولووویچ و استیوانووویچ ۲۰۱۲). روش کارست‌لپ برای شناسایی کردن منطقه‌های تغذیه در زمین‌های کارستی در مونتنگرو ارزیابی کرده، و کارایی زیاد آن در شناخت منطقه‌های تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی نشان داده شد (رادولووویچ و استیوانووویچ ۲۰۱۲). کارست-لپ روشی جدید با عناصرها و بخش‌های ضروری برای تولید نقشه‌یی است که توزیع مکانی تغذیه را در منطقه‌های کارستی نشان می‌دهد. این روش به‌هشت عامل از مهم‌ترین عامل‌های طبیعی پرداخته است که بر تغذیه اثر دارد و باعث می‌شود که ارزیابی کردن تغذیه اعتمادپذیرتر و دقیق‌تر باشد. روش کارست‌لپ علاوه بر تولید کردن نقشه‌ی رقومی تغذیه، توزیع مکانی تغذیه را مشخص می‌کند، و می‌تواند اندازه‌های میانگین تغذیه را نه‌فقط برای کل حوزه، بل که برای مساحت‌های کوچک‌تر محاسبه کند. نقشه‌ی تغذیه‌ی نهایی می‌تواند در بسیاری از موضوع‌های کاربردی مدیریت منابع آب در منطقه‌های کارستی، ورودی مدل‌سازی آب زیرزمینی باشد

1 - Meteoric Water Line (MWL)

2 - Altitudinal Isotopic Gradient

خانگی روستاهای آبخیز تنگ خوش 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 بوشهر دارد.

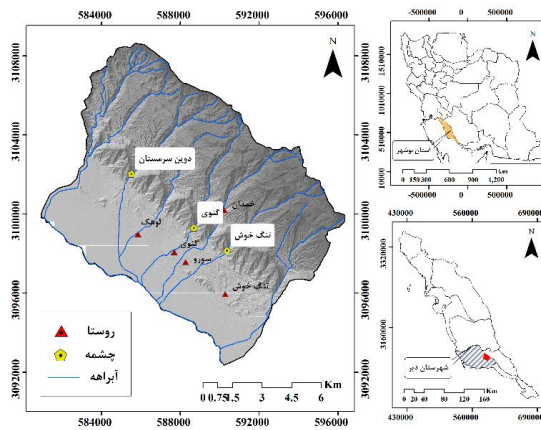
مواد و روش ها

منطقه ی بررسی شده

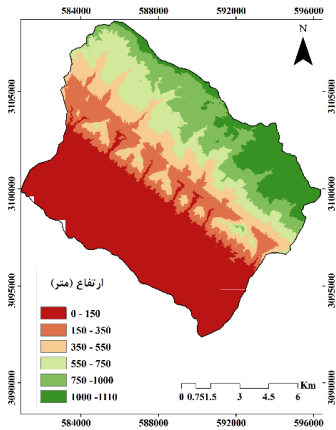
آبخیز تنگ خوش یکی از زیرحوزه های آبخیز آبدان است، که بین مختصات جغرافیایی ۵۸۰۹۳۸ تا ۵۹۶۳۵۴ طول شرقی و ۳۰۹۲۳۵۸ تا ۳۱۰۸۶۳۱ عرض شمالی در شرق شهر آبدان در شهرستان دیر استان بوشهر است. وسعت آبخیز ۱۳۲۲۹ هکتار، کمترین ارتفاع آن صفر، و بیشترین ارتفاع آن ۱۱۱۰ متر است (شکل ۱). میانگین سالانه ی بارندگی و دمای حوزه با داده های ۳۰ ساله ی (۱۳۶۶-۱۳۹۶) ایستگاه هواشناسی دیر به ترتیب ۲۸۲/۵ میلی متر و ۲۵/۱ درجه ی سانتی گراد است. چشمه های دوین سرمستان، گنوی و تنگ خوش از آبخوان این حوزه تغذیه می شود. منطقه های مسکونی حوزه روستاهای تنگ خوش، خمدان، سور، گنوی و لوهک است که از چشمه ها برای آب خانگی و کشاورزی آب می گیرند (شکل ۲). در نقشه ی زمین شناسی آبخیز تنگ خوش (شکل ۳) دیده می شود که حدود ۴۶٪ از مساحت حوزه سازندهای آسماری چهارم و گروه بنگستان، و سازندهای کربناته است (جدول ۱). از نظر زمین ساخت، حوزه در واحد ساختمانی زاگرس چین خورده است. روند عمومی منطقه تقریباً شمال غرب به جنوب شرق است، و محور تاقدیس کوه نمک، گسل های بهنجار و درز و شکاف و شکستگی های فراوانی در حوزه شکل گرفته است (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری بوشهر، ۲۰۱۱). سازندهای کربناته در ترکیب با عامل های زمین ساختی و زمین ریخت شناسی شرایط مناسبی را برای ایجاد کردن و توسعه دادن شکل های متنوع زمین های کارستی (فروچاله ها، دره های کور، تافونی ها، زمین های کارن و غیره) در حوزه به وجود آورده است (شکل ۴).

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 (کلانتری و محمدی بهزاد ۲۰۱۶). کریمی (۲۰۱۳) 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. جلانی و همکاران (۲۰۱۷) 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. ساپا و همکاران (۲۰۱۸) منطقه ی 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 آن ها، 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 ی روش های کارست لوپ و شیب ارتفاعی ایزوتوپی، در شناخت منطقه های با بیشترین مقدار تغذیه و برآورد ارتفاع متوسط منطقه ی تغذیه رضایت بخش است. بنابراین، استفاده ی 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 بوشهر در اقلیم خشک و نیمه خشک، کاهش بارندگی ها و وقوع خشک سالی های اخیر باعث شده است که منابع آب های سطحی و زیرزمینی استان همواره در کاهش باشد. برای استان بوشهر که بخش بزرگی از آب آن از استان های مجاور تهیه می شود، خشک سالی 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 باکیفیت روز به روز افزایش می یابد. رخ نمون سازندهای آهکی و چشمه های کارستی این سازندها نشان می دهد که آبخوان ها و آب های کارستی در استان بوشهر هست، به طوری که بخش مهمی از آب کشاورزی و



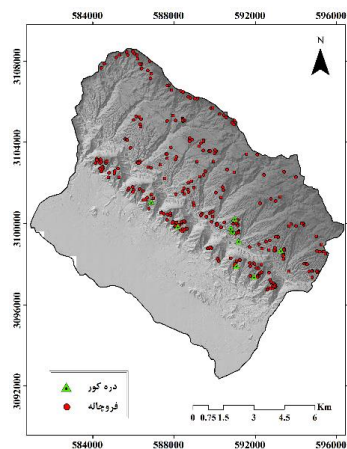
شکل ۲- نقشه‌ی موقعیت آبخیز تنگ‌خوش و چشمه‌های تغذیه‌کننده از آبخوان حوزه.



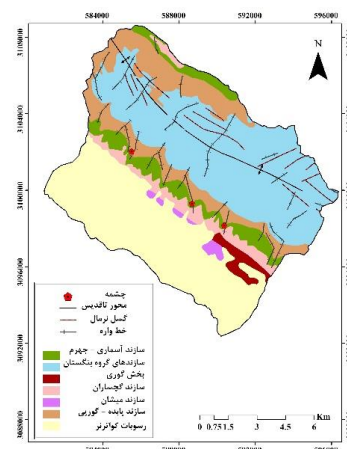
شکل ۱- نقشه‌ی طبقه‌های ارتفاعی آبخیز تنگ‌خوش.

جدول ۱- مساحت سازندهای آبخیز تنگ‌خوش (نقشه‌ی زمین‌شناسی برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ آبدان).

سازند	نماد	دوران	دوره	جنس سنگ	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
گروه بنگستان	Bgp	مزوزویک	کرتاسه‌ی زیرین تا کرتاسه بالایی	آهک‌های رسی تیره‌رنگ با میان‌لایه‌هایی از پلمه‌سنگ	۵۰۹۱	۳۸
پابده-گوربی	Pd - Gu	مزوزویک-سنوزویک	کرتاسه‌ی بالایی تا پالیوسن-ائوسن	پلمه‌سنگ و آهک‌رس در تناوب با آهک رسی	۲۰۲۶	۱۵
آسماری-چهرم	As - Ja	سنوزویک	پالیوسن-ائوسن تا میوسن	آهک دولومیتی و آهک‌های کرم‌رنگ تا قهوه‌یی ضخیم لایه تا توده‌یی آهک‌رس‌های خاکستری تا قرمز و گچ-	۹۶۴	۸
گچساران	Gs	سنوزویک	میوسن زیرین	سنگ توده‌یی، آهک‌رس و لایه‌های نازک آهک گچ‌سنگ‌دار قرمز تا خاکستری	۶۱۷	۵
گوری	Grm	سنوزویک	میوسن میانی	آهک به رنگ کرم تا قهوه‌یی در تناوب با لایه‌هایی از آهک‌رس	۲۲۹	۲
میشان	Mn	سنوزویک	میوسن میانی	آهک همراه با لایه‌های مارنی کرم رنگ و آهک ریفی	۱۲۳	۱
رسوب دوران چهارم	Q	چهارم	کواترنری	پادگانه‌های آب‌رفتی و رسوب بستر آب-راه‌ها	۴۱۷۹	۳۱
کل حوزه					۱۳۲۲۹	۱۰۰



شکل ۴- نقشه‌ی پراکنش رخساره‌های کارستی آبخیز تنگ‌خوش.



شکل ۳- نقشه‌ی زمین‌شناسی و زمین‌ساختی آبخیز تنگ‌خوش.

روش کارستلپ

روش کارستلپ مخفف حروف اول ۸ لایه‌ی فرآیند کارست‌زایی (K)، شرایط جوی (A)، روان‌آب (R)، شیب (S)، زمین‌ساخت (T)، سنگ‌شناسی (L)، لایه‌ی پوشاننده (O) و پوشش گیاهی (P) است. این روش در نرم‌افزار ArcGIS اجرا می‌شود و قضاوت کارشناسی پژوهشگر سنج‌های تحلیلی را انتخاب و معیارهای ارزیابی و الگوریتم را تعریف می‌کند (رادولویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲). نحوه‌ی محاسبه، امتیازدهی و معادله‌های هر عامل و زیرعامل در جدول ۲ تا ۱۰ آورده شده است. پس از امتیازدهی و تهیه‌کردن نقشه‌ی عامل‌های روش کارستلپ، نقشه‌ی نهایی توزیع مکانی تغذیه‌ی آبخوان به درصد و به قالب رستر با قدرت تفکیک ۵ متر تهیه کرده‌شد (معادله‌ی ۱).

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

۱- کارست‌زایی

عامل کارست‌زایی یا توسعه‌ی کارست از تجزیه و تحلیل میزان کارستی‌شدن سطحی و زیرسطحی به دست آمد. نقشه‌ی نهایی درجه‌ی کارستی‌شدن با هم‌پوشانی دادن نقشه‌ی کارستی‌شدن سطحی (Ksf) و نقشه‌ی کارستی‌شدن زیرسطحی (Kss) محاسبه شد (معادله‌ی ۲).

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

الف) درجه‌ی کارستی‌شدن سطحی (Ksf)

درجه‌ی کارستی‌شدن سطحی (Ksf) براساس ارزیابی منطقه از ویژگی‌های کارست و شکل زمین در واحد سطح، به دو زیرعامل کارن و دولین طبقه‌بندی می‌شود. کارن عمده‌ترین شکل زمین سطحی کارست است که روی شیب‌ها در منطقه‌های کارستی ظاهر می‌شود (Ksf1)، درحالی‌که دولین و دیگر فرورفتگی‌های کارستی عمدتاً در منطقه‌هایی با شیب اندک به وجود می‌آید (Ksf2). برای تهیه‌کردن نقشه‌ی درجه‌ی کارستی‌شدن سطحی، معیار تراکم در واحد سطح به کار برده شد. برای محاسبه‌کردن این دو زیرعامل، سطح آبخیز به شبکه‌ی با سلول‌های یک کیلومتر در یک کیلومتر تقسیم و مساحت شکل‌های سطحی زمین کارست و فرورفتگی‌های کارستی در هر سلول محاسبه شد. با هم‌پوشانی دادن این دو نقشه با معادله‌ی ۳، نقشه‌ی جدیدی به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی کارستی‌شدن سطحی (Ksf) است. با تصویر هوایی استان بوشهر از دوربین‌های اولتراکم با قدرت تفکیک ۲۰ سانتی‌متر، مدل رقومی ارتفاع استان بوشهر با قدرت تفکیک ۵ متر، تصویر ماهواره‌ی گوگل ارت، و بازدیدهای میدانی یک‌ساله (۱۳۹۵-۱۳۹۶)، نقشه‌ی میزان کارستی‌شدن سطحی تهیه و امتیازدهی شد (جدول ۲).

(۳)

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

جدول ۲- محاسبه و امتیازدهی به زیرعامل توسعه‌ی کارست سطحی (Ksf) (رادولویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

مساحت زمین‌های تخریب‌شده‌ی سطحی مانند منطقه‌های کارن (مترمربع در کیلومترمربع)	Ksf1	مساحت فرورفتگی‌های کارستی (مترمربع در کیلومتر مربع)	Ksf2	Ksf = (Ksf1 + Ksf2) / 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) درجه‌ی کارستی‌شدن زیرسطحی (Kss)

برای محاسبه‌کردن درجه‌ی کارستی‌شدن زیرسطحی (Kss)، دو تراز در آبخیز مشخص شد. منطقه‌ی با بیش‌ترین درجه از کارستی‌شدن زیرسطحی که شامل منطقه‌هایی با حریم ۲۰۰ متری در اطراف محل‌های غارها، چاله‌ها و حفره‌های مکنده و دره‌های کور است. به این محل‌ها امتیاز پنج داده شد (جدول ۴). درجه‌ی کارستی‌شدن زیرسطحی برای سطح‌های دیگر آبخیز براساس سه شاخص غیرمستقیم زیر محاسبه کرده‌شد. برای برآورد کردن Kss1 دامنه‌ی نوسان تخلیه‌ی چشمه‌های کارستی در دوره‌ی ۱۰ ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۶) با

داده‌های ماهانه‌ی میانگین آب‌دهی چشمه‌ها (تهیه‌شده از شرکت آب منطقه‌ی استان بوشهر و اندازه‌گیری‌های میدانی)، تحلیل کرده‌شد (Qmax/Qmin → Kss1). زیرعامل Kss2 با اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان چشمه‌ها به دست آمد (V → Kss2) بر اساس شاخص اشباع کلسیت (یا دولومیت) آب چشمه‌ها (SI) که شاخص شیمیایی آب است، و با اطلاعاتی از قبیل میزان منیزیم، کلسیم، کربنات کلسیم، دمای آب، و پی‌اچ با داده‌های کیفیت آب تهیه‌شده از شرکت آب منطقه‌ی استان بوشهر (۱۳۸۵-۱۳۹۵) و اندازه‌گیری‌شده در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در نرم‌افزار PHREEQC محاسبه

امتیاز داده شد (جدول ۴)، و درجه‌ی کارستی شدن زیرسطحی (K_{SS}) برای حوزه با معادله‌ی ۴ محاسبه کرده شد.

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

کرده شد $(SI \rightarrow K_{SS3})$. شاخص‌های لازم برای محاسبه کردن درجه‌ی توسعه‌ی کارستی زیرسطحی در جدول ۳ آورده شده است. به محل‌هایی در حوزه که غار و دره‌های کور در آن است امتیاز پنج داده شد، و برای سطح‌های دیگر حوزه با سه زیرعامل

جدول ۳- سنجه‌های لازم برای محاسبه‌ی کارستی زیرسطحی.

چشمه	Qmax/Qmin	Qmen (l/s)	نمایه‌ی اشباع کلسیت	نمایه‌ی اشباع دولومیت	Ca/Mg
دوین سرمستان	۲/۵	۲۱/۵	-۱/۲۹	-۲/۴۶	۲/۵۶
گنوی	۶	۷	-۱/۳۱	-۲/۴	۳/۷۵
تنگ‌خوش	۱۲	۳/۸	-۱/۲۸	-۲/۳۴	۳/۱۷

جدول ۴- محاسبه و امتیازدهی به زیرعامل توسعه‌ی کارستی زیرسطحی (K_{SS}) (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

Qmax/Qmin	Kss ₁	سرعت (متر بر ثانیه)	Kss ₂	طول متوسط مسیر آب زیرزمینی به کیلومتر			Kss ₃	Kss = (Kss ₁ + Kss ₂ + Kss ₃) / 3
				> ۴	۱-۴	< ۱		
				نمایه‌ی اشباع کلسیت یا دولومیت	نمایه‌ی اشباع کلسیت یا دولومیت	نمایه‌ی اشباع کلسیت یا دولومیت		
< 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	-۰/۶-۰/۳	-۰/۹-۰/۶	۳	> ۲-۳
> ۱۰۰	۴	> ۱۰	۴	< -۰/۳	< -۰/۶	< -۰/۹	۴	> ۳-۴
منطقه‌هایی با حریم ۲۰۰ متری در اطراف غارها، چاله‌ها و حفره‌های مکنده و دره‌های کور							۵	> ۴-۵

معادله‌ی ۵، عامل شرایط جوی (A) تهیه کرده شد.

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

۳- روان آب

عامل روان آب (R) در کارستی بستگی به نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، شیب، و میزان بارندگی دارد. برای محاسبه کردن این عامل با توجه به وجود روان آب، سطح حوزه به سه قسمت تقسیم و امتیاز عامل روان آب سطحی محاسبه کرده شد (جدول ۵).

جدول ۵- امتیازدهی به عامل روان آب (R) (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

R	سطح‌های درون آبخیز
۱	حریم ۲۰۰ متری در هر دو طرف جریان‌های دائمی، که با قسمت‌های کربناته و سنگ آهک و دولومیت به شدت کارستی شده تشکیل و زه‌کشی می‌شود.
۳	حریم ۲۰۰ متری در هر دو طرف جریان‌های دائمی شکل گرفته در مرز فرورفتگی‌های کارستی مانند پلزه، اولا و مانند آن‌ها در اطراف جریان‌های دائمی که در منطقه‌های غیر کارستی تشکیل می‌شود.
۵	دیگر قسمت‌های آبخیز

شیب لایه‌های زمین‌شناسی (Td) است. زیرعامل تراکم گسل با محاسبه کردن طول گسل در واحد سطح، برای هر سلول تهیه و امتیازدهی کرده شد (جدول ۶). برای محاسبه کردن این زیرعامل که گسل‌ها، محور تاقدیس‌ها و خطواره‌های زمین‌ساختی را شامل می‌شود، نقشه‌ی زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰) برگه‌ی آبدان (سازمان زمین‌شناسی کشور) و نقشه‌ی خطواره‌های تکتونیکی با نرم‌افزارهای ArcGIS و PCA Geomatica به کار برده شد.

۴- عامل شیب (S)

شیب زمین (S) یکی از عامل‌های اصلی است که باعث ایجاد روان آب می‌شود و بر درصدی از آب بارندگی که در سطح جریان پیدا می‌کند، تأثیر دارد. عامل شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۵ متر استان بوشهر تهیه و امتیازدهی شد (جدول ۶).

۵- عناصر زمین‌ساختی

عامل زمین‌ساختی (T) شامل دو زیرعامل تراکم گسل‌ها (Tf) و

مدل سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخوان های کارستی...

زیرعامل شیب لایه های زمین شناسی با نقشه ی زمین شناسی
 ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه ی آبدان امتیاز داده شد (جدول ۶). با
 هم پوشانی دادن نقشه ی زیرعامل های Td و Tf با معادله ی ۶

نقشه ی عامل زمین ساختی به دست آمد.

$$T = (Tf + Td) / 2$$

(۶)

جدول ۶- امتیازدهی به عامل های شرایط جوی، شیب و عناصر زمین ساختی (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

زیرعامل شیب تابش خورشید (A2)		زیرعامل ارتفاع (A1)		عامل شیب (S)		زیرعامل تراکم گسل ها (Tf)		زیرعامل شیب لایه ها (Td)	
A2	شدت تابش خورشید	A1	ارتفاع (متر)	S	شیب (درجه)	Tf	طول گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	Td	شیب لایه های زمین-شناسی (درجه)
۱	> ۰/۵	۱	< ۳۰۰	۵	۰-۵	۱	۰-۱	۱	< ۳۰
		۲	۳۰۰-۸۰۰	۴	۵-۱۵	۲	۱-۲	۳	۳۰-۶۰
		۳	۸۰۰-۱۳۰۰	۳	۱۵-۲۵	۳	۲-۳	۴	> ۶۰
۵	< ۰/۵	۴	۱۳۰۰-۱۸۰۰	۲	۲۵-۳۵	۴	۳-۴	۵	
		۵	> ۱۸۰۰	۱	> ۳۵	۵	> ۴		

۶- سنگ شناسی

بیش تر و توده یی بودن، بیش ترین امتیاز زیرعامل (b) را گرفت. زیرعامل (c) باتوجه به درجه ی 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. نفوذپذیری سنگ های کربناته ی ناخالص معمولاً کم تر از سنگ های 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-چهرم به دلیل داشتن درجه ی خلوص بیش تر، بیش ترین امتیاز این زیرعامل را گرفت، و بقیه ی سازندهای حوزه امتیاز کمتری را گرفتند (جدول ۷). عامل سنگ شناسی از حاصل ضرب سه زیرعامل تهیه شد (معادله ی ۷).

$$L = a * b * c$$

(۷)

ترکیب سنگ شناسی مستقیمانه بر نفوذپذیری و در نتیجه میزان تغذیه اثر می کند. این عامل از سه زیرعامل نوع سنگ کربناته (a)، لایه بندی (b) و کانی شناسی سنگ های کربناته (c) تشکیل شده است. سنگ آهک به دلیل داشتن نفوذپذیری بیش تر و استعداد بیش تر 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 نفوذپذیری آبخوان های کارستی نشان می دهد. فشار مقاومتی چینه ها با ضخامت های مختلف متفاوت است. شکنندگی و درز و شکاف لایه های نازک سنگ آهک کم تر از توده های ضخیم و عظیم سنگ آهک است و بنابراین نفوذپذیری آن کم تر است. امتیاز این زیرعامل با نقشه ی زمین شناسی برگه ی آبدان و بازدیدهای میدانی محاسبه کرده شد (جدول ۷). سازند آهکی آسماری-چهرم، به دلیل داشتن درز و شکاف

جدول ۷- امتیازدهی به عامل سنگ شناسی (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

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

۷- لایه ی پوشاننده

۱۳۸۹ به کار گرفته و امتیازدهی شد (جدول ۸). زیرعامل پوشش زمین شناسی (O₂) رسوبات نهشته یی است که روی سازندهای کربناته است، و شامل رسوب های آب رفتی، کوه رفتی، یخچالی، دریایی و مانند آن می شود. امتیاز آن با نقشه ی زمین شناسی و بازدیدهای میدانی محاسبه کرده شد (جدول ۹). نقشه ی نهایی عامل لایه ی پوشاننده با هم پوشانی دادن نقشه ی زیرعامل های

اهمیت عامل لایه ی پوشاننده (O) به دلیل ایجاد شدن لایه ی محدودکننده نفوذ در آبخوان کارستی است. لایه ی پوشاننده از دو زیرعامل خاک (O₁) و پوشش زمین شناسی (O₂) تشکیل شده است. برای محاسبه کردن زیرعامل O₁ نقشه ی عمق خاک، بررسی خاک شناسی، و توانایی زمین های آبخیز آبدان در

$$O = (O_1 + O_2) / 2 \quad (8) \quad O_1 \text{ و } O_2, \text{ به دست آمد (معادله ۸).}$$

جدول ۸- امتیازدهی به زیرعامل خاک (O_1) (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

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

جدول ۹- امتیازدهی به زیرعامل پوشش زمین‌شناسی (O_2) (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

O_2 پوشش زمین‌شناسی	ضخامت (متر)		
	< ۳	۳-۶	> ۶
رسوب‌های آب‌رقتی، رسوب‌های یخچالی-آب‌رقتی، رسوب-های دریایی	۵	۳	۱
رسوب‌های کوه‌رقتی	۳	۲	۱
رسوب‌های یخچالی	۲	۱	۱

به کار برده شد. پس از به دست آوردن کاربری‌های مختلف در حوزه، دقت نتیجه با تصویرهای هوایی استان بوشهر (قدرت تفکیک ۲۰ سانتی‌متر)، تصویر ماهواره‌ی گوگل‌ارت و بازبندی میدانی افزایش داده شد. امتیاز عامل پوشش گیاهی با نقشه‌ی کاربری زمین به دست آمد (جدول ۱۰). هرچه پوشش گیاهی متمرکزتر باشد، امتیاز این عامل کم‌تر است.

۸- پوشش گیاهی

ویژگی‌های اصلی عامل پوشش گیاهی شامل توسعه‌ی سامانه‌ی ریشه و انشعاب شاخه‌ها برای این عامل در نظر گرفته شد. برای محاسبه‌کردن امتیاز عامل پوشش گیاهی، نقشه‌ی کاربری زمین طرح آمایش سرزمین استان بوشهر که با تصاویر ماهواره‌های لندست ۸، Centinel و Google Earth با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بدست شد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان بوشهر، ۱۳۹۵)

جدول ۱۰- امتیازدهی به عامل پوشش گیاهی (P) (رادولوویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲).

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

بعد از بارندگی و در محل ایستگاه‌های باران‌سنجی و سایر جاهای مناسب انجام شد. محتوای ایزوتوپ‌های پایدار دوتریوم و اکسیژن ۱۸ در نمونه‌های آب زیرزمینی (چشمه‌ها) و باران در آزمایشگاه ایزوتوپ شرکت مصباح‌انرژی اندازه‌گیری کرده شد. شیب ارتفاعی ایزوتوپی منطقه با ارتفاع محل‌های نمونه‌برداری از بارش و مقدار ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ در نرم‌افزار Excel ۲۰۱۶ ترسیم کرده شد.

ترسیم‌کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی

برای به دست آوردن ارتفاع و شناختن منبع تغذیه‌ی چشمه‌های کارستی در دوره‌ی مرطوب (اسفند ۹۵) از آن‌ها نمونه‌برداری شد. برای ترسیم‌کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی، ۲۳ نمونه از بارندگی‌های استان بوشهر در یک سال آبی (مهر ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶) در ارتفاع‌های مختلف حوزه و منطقه‌های اطراف (ارتفاع ۳۰ تا ۱۰۰۰ متری از تراز دریا) برداشته شد. برای کم‌کردن اثر تبخیر در نمونه‌های بارش، نمونه برداری هم‌زمان یا اندکی

نتایج و بحث

روش کارست لوپ

۱- نقشه‌ی عامل توسعه‌ی کارست

نقشه‌ی عامل توسعه‌ی کارست از هم‌پوشانی دادن نقشه‌های میزان کارستی شدن سطحی و زیرسطحی به دست آمد (شکل ۵-الف). محدوده‌ی امتیاز این عامل برای حوزه از ۱/۸ تا ۴/۸ بود. اندازه‌های بیشینه منطبق بر محل‌های توسعه یافته‌ی کارستی است، و بیشترین تراکم رخساره‌ها و شکل‌های زمین کارستی در آن است. زمین‌ریخت‌شناسی سطحی کارست نقش مهمی در تغذیه کردن و تکامل دادن شبکه‌ی جریان زیرزمینی دارد، و براساس نقش رخساره‌های کارستی در تغذیه‌ی آبخوان‌ها، رخساره‌های زمین‌ریخت‌شناسی به دو دسته‌ی رخساره‌های بسته و رخساره‌های خطی تقسیم کرده می‌شود (فورد و ویلیامز ۲۰۰۷). رخساره‌های بسته، رخساره‌هایی است که تغذیه در امتداد آن‌ها متمرکز است، و شامل فروچاله‌ها، پونور، شافت، پولیه، اووالا، و آن 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. بهرامی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که منطقه‌هایی با تغذیه و نفوذ بیش‌تر از ۷۰٪ در آبخوان کارستی پراو-بیستون به‌تمامی در محدوده‌ی شکل‌های زمین کارستی مانند دولین و اووالا است. صفاری و همکاران (۲۰۱۸) به این نتیجه رسیدند که ۹۸٪ از فروچاله‌های شناسایی شده در کوهستان خورین کرمانشاه در طبقه‌ی کارست توسعه یافته است.

۲- نقشه‌ی عامل شرایط جوی (A)

با هم‌پوشانی دادن نقشه‌ی زیرعامل‌های A_1 و A_2 ، نقشه‌ی عامل شرایط جوی (A) محاسبه شد (شکل ۵-ب). 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 (رادولویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲). دسترنج (۲۰۱۸) نشان داد که افزایش ارتفاع با کاهش دما و افزایش بارش در ارتباط است، و این در فرآیند کارست‌زایی و توسعه‌ی کارست بسیار تاثیرگذار است. تاثیر جهت شیب محلی است و باعث تغییر کردن میزان تبخیر و تعرق، زمان ماندگاری برف، و دریافت بارش می‌شود. همه‌ی این‌ها بر میزان آب مؤثر بر فرآیند انحلال تاثیرگذار است. در مجموع، تاثیر شیب‌های شمالی در توسعه‌ی رخساره‌های کارستی بیش‌تر از شیب‌های جنوبی است. درواری و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند

که تخلخل تشکیلات آبخوان و ارتفاع بیش‌ترین تاثیر را بر تغذیه و آبدهی چشمه‌های کارستی در ارتفاعات البرز دارد.

۳- نقشه‌ی 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 (شکل ۵-پ). با افزایش یافتن میزان روان آب، مقدار تغذیه و نفوذ در آبخوان کارستی کاهش می‌یابد.

۴- نقشه‌ی عامل شیب (S)

محدوده‌ی امتیاز عامل شیب برای حوزه از یک تا پنج محاسبه شد (شکل ۵-ت). 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 زمین‌ریخت‌شناسی و توسعه‌ی کارست است، زیرا میزان نفوذپذیری و ماندگاری آب در سطح زمین و سطح سنگ‌های کربناته، تابع شیب است. در شیب کم نفوذ آب، میزان انحلال، و توسعه‌ی کارست بیش‌تر است. بنابراین، در سطح‌های هموار کارستی در رأس ارتفاع‌ها، گسترش رخساره‌های کارستی بیش‌تر است (صفاری و همکاران ۲۰۱۸). آرتوجیان و یوردآ (۲۰۱۶) نشان دادند که بین سنجه‌های زمین‌ریخت‌سنجی و ویژگی‌های تشخیص‌دانی کارست وابستگی قوی هست. برای مثال، دامنه‌هایی با شیب کم فرآیند انحلال را تسهیل می‌کند. در منطقه‌های مسطح و کم‌شیب با فروچاله‌های فراوان و در شرایطی که به علت زیاد بودن ارتفاع، میزان تبخیر کم باشد، ممکن است بیش از ۹۰٪ بارش به درون سیستم کارست نفوذ کند (کریمی و وردنجانی ۲۰۱۱).

۵- نقشه‌ی عامل عنصر زمین‌ساختی (T)

امتیاز عامل عنصر زمین‌ساختی برای حوزه ۱ تا ۱/۹۹ محاسبه شد. اندازه‌های زیاد این عامل در حوزه به علت تراکم زیاد گسل و شیب زیاد لایه‌ها، منطبق بر سازند آسماری-چهرم و گروه بنگستان است (شکل ۵-ث). مقدار تغذیه‌ی آبخوان در تاثیر بسیار زیاد درجه‌ی درز و شکاف دارشدن توده‌ی سنگ است. در نزدیک گسل اصلی و منطقه‌هایی با تخریب زمین‌ساختی، این میزان به وضوح بیش‌تر است، و این اصلی پذیرفته شده است. لایه‌های چینه‌شناسی افقی نقش کم‌تری در نفوذ آب دارند، اما به علت بودن شکاف‌های بین لایه‌ی، نقش لایه‌هایی با شیب زیاد در نفوذ کردن آب و تغذیه شدن آبخوان‌های کارستی مهم است (رادولویچ و استیوانویچ ۲۰۱۲). ویل و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده‌اند که بودن گسل و درز و شکاف‌های زمین‌ساختی همراه با فعالیت‌های انحلالی شرایط را برای نفوذ کردن آب و تاثیر گرفتن بیش‌تر سنگ‌ها از عامل انحلال فراهم می‌کند.

تغذیه شدن خودزا است، و تبخیر و تعرق در سنگ‌های کربناته‌ی کارست‌شده‌ی عریان در آن کم است و می‌توان 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 می‌دهد (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷).

۸- نقشه‌ی عامل پوشش گیاهی (P)

امتیاز این عامل برای حوزه یک تا چهار محاسبه شد (شکل ۵-ح). به دلیل کم بودن پوشش گیاهی و افزایش یافتن نفوذ آب در مرتع‌های کم تراکم، بیش‌ترین امتیاز به آن‌ها داده شد، که منطق بر قسمتی از سازندهای آهکی و بخشی از دشت‌های آب‌رفتی حوزه است. گیاهان بر میزان تغذیه تأثیر دارند. پوشش گیاهی با افزایش یافتن میزان دی‌اکسیدکربن در خاک که منجر به افزایش یافتن دی‌اکسیدکربن محلول در آب نفوذ کرده می‌شود، باعث تسریع شدن فرآیند کارست‌زایی می‌شود. از طرف دیگر، پوشش گیاهی زیاد و متراکم مستقیماً متوسط تبخیر و تعرق سالانه را افزایش می‌دهد، و در نتیجه باعث کاهش یافتن مقدار نفوذ آب می‌شود. انتظاری و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که بیرون زدگی‌های سنگی و مرتع‌های کم‌تراکم، به دلیل کم‌بودن میزان پوشش آن‌ها و افزایش یافتن نفوذ آب نقش مهمی در تغذیه‌ی آبخوان کارستی خورین کرمانشاه دارد.

پهنه‌بندی منطقه‌های مستعد تغذیه

نقشه‌ی نهایی تغذیه‌ی آبخوان (معادله‌ی ۱) نشان‌دهنده‌ی توزیع مکانی تغذیه‌ی متوسط سالانه (Rch) است که میزان تغذیه در آن به درصد بیان می‌شود (شکل ۵-خ). به عامل‌های کارست‌زایی، روان‌آب و سنگ‌شناسی بیش‌ترین امتیاز داده شده است، زیرا این عامل‌ها نقش اصلی در تغذیه‌شدن آبخوان کارستی دارند. پژوهش‌های بهرامی و همکاران (۲۰۱۶)، صفاری و همکاران (۲۰۱۸) و دسترنج (۲۰۱۸) نشان داد که این‌ها از مؤثرترین عامل‌های توسعه‌ی کارست و تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی است. نقشه‌ی نهایی تغذیه نشان داد که میزان تغذیه‌ی سالانه‌ی محاسبه‌شده برای آبخوان کارستی حوزه ۳۶٪ تا ۸۶٪ است. به عبارت دیگر، ۳۶٪ تا ۸۶٪ از بارش ورودی سالانه، نفوذ می‌کند و تبدیل به تغذیه می‌شود و مانده‌ی آن از دست‌رس خارج می‌شود (جدول ۱۱). منطقه‌هایی با تغذیه‌ی ۳۶٪ تا ۵۶٪ با مساحت ۷۲۵۷ هکتار (حدود ۵۴٪ از مساحت حوزه) منطق بر دشت‌های آب‌رفتی و قسمتی از سازندهای گچساران و پابده گورپی است. باتوجه به مساحت این سازندها که حدود نیمی از سطح حوزه است، این یافته دور از انتظار نیست. دامنه‌های خردشده با درز و شکاف‌های زیاد و زمین‌های کارن، نسبتاً زیاد، به شدت خردشده و اغلب به صورت رخنمون‌های

بانساز و آندرسون (۲۰۱۷) با شناختن عامل‌های توسعه‌دهنده‌ی کارست در جنوب شرق میسوری آمریکا به این نتیجه رسیدند که گسل‌ها و شکستگی‌های سنگ بستر شرایط مناسبی را برای فرآیندهای کارست‌زایی به وجود آورده است. نتیجه‌ی پژوهش مرادی و همکاران (۲۰۱۶) در شمال خوزستان نیز نشان داد که فعالیت‌های زمین‌ساختی و خطواره‌ها مهم‌ترین عامل توسعه‌ی کارست در منطقه است.

۶- نقشه‌ی عامل سنگ‌شناسی (L)

امتیاز عامل سنگ‌شناسی (شکل ۵-ج) برای حوزه ۰/۲۴ تا ۴/۸ محاسبه کرده شد. بیش‌ترین امتیاز به دلیل داشتن امکان انحلال، درجه‌ی خلوص بیش‌تر، و توده‌ی بودن به سازند آهکی آسماری-چهرم داده شد. نفوذپذیری سنگ‌های آهکی بستگی به مواد تشکیل‌دهنده، نحوه‌ی تشکیل، لایه‌های مختلف آن‌ها، و میزان درز و شکاف و شکستگی ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی دارد. از این رو زمین‌ساخت و انحلال، نقش عمده‌ی در تغذیه و آب‌دهی این آبخوان‌ها دارد (اوسطی ۲۰۱۳). بهرامی و همکاران (۲۰۱۶) و دسترنج (۲۰۱۸) نشان دادند که سازند بیستون در کرمانشاه به دلیل داشتن درجه‌ی خلوص بیش‌تر، شکستگی بیش‌تر، و توده‌ی بودن بیش‌ترین نقش را در انحلال و توسعه‌ی کارست دارد.

۷- نقشه‌ی عامل لایه‌ی پوشاننده (O)

نقشه‌ی این عامل از هم‌پوشانی دادن نقشه‌های دو زیرعامل O_1 و O_2 به دست آمد (شکل ۵-ج). امتیاز عامل لایه‌ی پوشاننده برای حوزه یک تا پنج محاسبه کرده شد. بیش‌ترین امتیاز به خاک‌های کم‌عمق روی سازندهای آسماری-چهرم و گروه بنگستان به دلیل ایجاد کردن شرایط مناسب برای نفوذ سریع‌تر، و امتیاز کم‌تر به خاک‌های دامنه‌ی و آب‌رفتی به دلیل ضخیم‌بودن و کم‌تر نفوذ کردن داده شد. لایه‌ی پوشاننده، عمدتاً به دلیل ایجاد کردن مانع در نفوذ کردن جریان سطحی به آبخوان (وجود یک لایه‌ی خاک در آبی کارست) نقش مهمی در کاهش دادن تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی دارد. سنگ‌های کربناته ممکن است با پوشش سنگی و یا خاکی پوشاننده شود. هرچه خاک ضخیم‌تر و خواص آب‌گذری آن ضعیف‌تر باشد، نفوذ کندتر، و در نتیجه تبخیر و تعرق بیش‌تر است. پرهت و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی کردن آستانه‌ی روان‌آب در زمین‌های کارستی به این نتیجه رسیدند که نفوذپذیری سنگ‌آهک‌های خردشده و بی پوشش خاک زیاد است. بودن لایه‌ی خاک بر شرایط نفوذ تأثیر می‌گذارد. اگر نفوذپذیری خاک کم‌تر از سنگ‌های کارستی‌شده‌ی مدفون باشد، میزان تغذیه کم‌تر و ظرفیت نفوذ خاک، عامل مهارکننده‌ی تغذیه می‌شود. منطقه‌هایی که سنگ‌های کربناته‌ی کارستی‌شده‌ی بی پوشش خاک در آن است، نشان‌دهنده‌ی

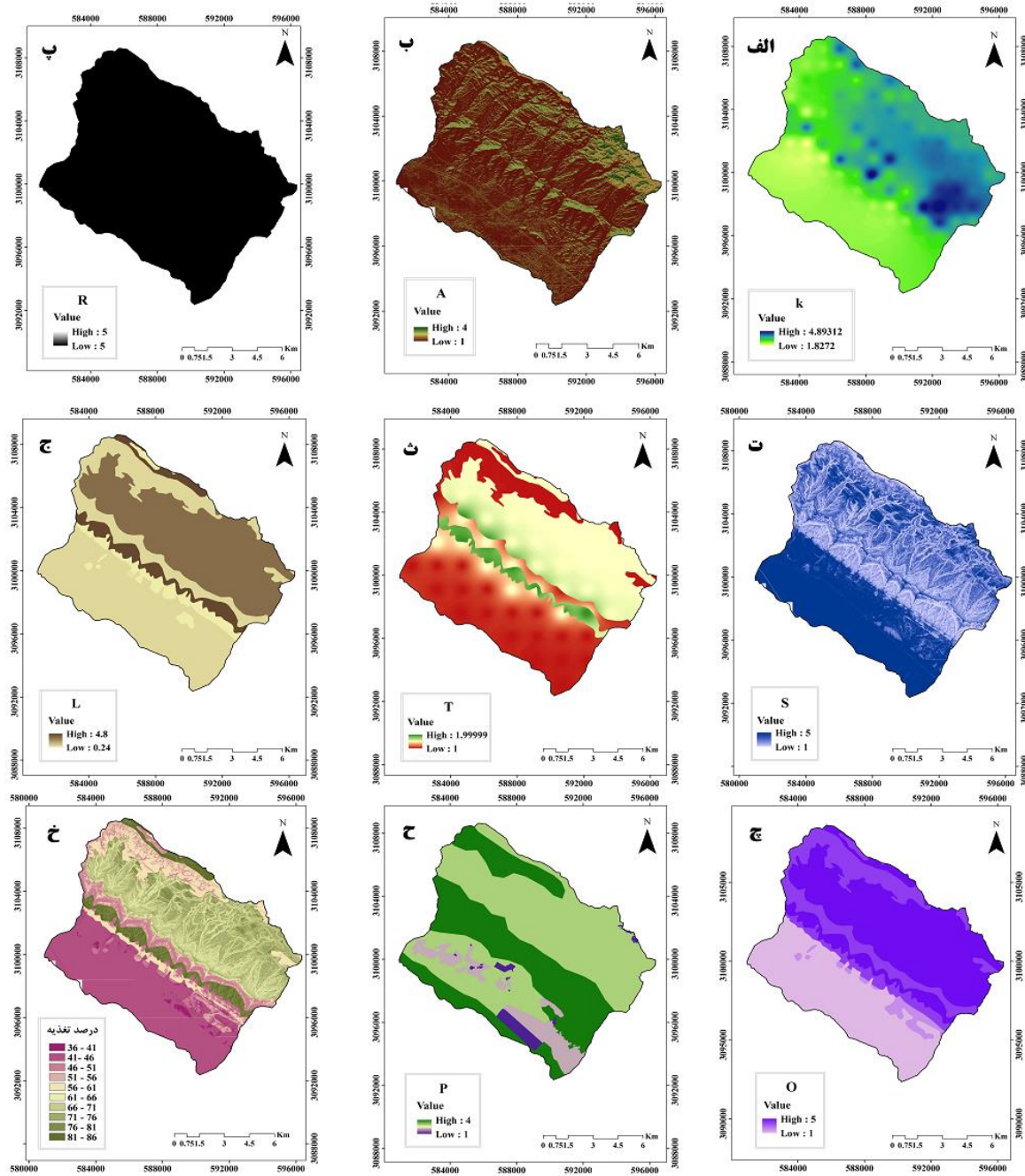
مدل سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخوان های کارستی...

آن تنک، زمین ریخت شناسی کارست آن توسعه یافته، و منطبق بر آهک آسماری-چهرم و گروه بنگستان است. تراکم فروچاله ها و دره های کور (شکل ۴) و امکان تغذیه شدن متمرکز با آن ها، نقش بسیار مهمی در زیادبودن 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.

سنگی درز و شکاف دار است. خاک این دامنه ها کم ضخامت و پوشش گیاهی آن تنک است، و به این علت، میزان نفوذ در این منطقه ها نسبتاً زیاد است. این منطقه ها، منطبق بر قسمتی از سازندهای گروه بنگستان و پابده-گورپی است و در ۰.۲۸٪ از مساحت حوزه است. ناحیه های با تغذیه ی ۰.۷۱٪ تا ۰.۸۶٪ منطبق بر منطقه های مرتفع کوهستان و ۰.۱۸٪ از مساحت منطقه است. خاک این قسمت بسیار کم ضخامت و درشت دانه، پوشش گیاهی

جدول ۱۱- مساحت و درصد مساحت پهنه های توزیع تغذیه ی سالانه با روش کارست لوپ و تعداد فروچاله های شناسایی شده در هر طبقه ی تغذیه.

تغذیه (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	تعداد فروچاله های شناسایی شده
۴۱-۳۶	۱۳۵	۰.۸	۰
۴۶-۴۱	۴۴۱۷	۳۳	۰
۵۱-۴۶	۱۹۹۷	۱۵	۰
۵۶-۵۱	۷۰۷	۶	۶
۶۱-۵۶	۲۲	۰.۲	۲
۶۶-۶۱	۲۷۹	۲	۱۰
۷۱-۶۶	۳۳۴۰	۲۵	۱۱۰
۷۶-۷۱	۱۵۶۴	۱۲	۶۱
۸۱-۷۶	۶۲۹	۵	۷۹
۸۶-۸۱	۱۳۹	۱	۱۶
کل حوزه	۱۳۲۲۹	۱۰۰	۲۸۴



شکل ۵- نقشه‌های روش کارست لوب: توسعه کارست (الف)، شرایط جوی (ب)، روان آب (پ)، شیب (ت)، شرایط زمین‌ساختی (ث)، سنگ‌شناسی (ج)، لایه‌ی پوشاننده (چ)، پوشش گیاهی (ح)، توزیع مکانی تغذیه (خ).

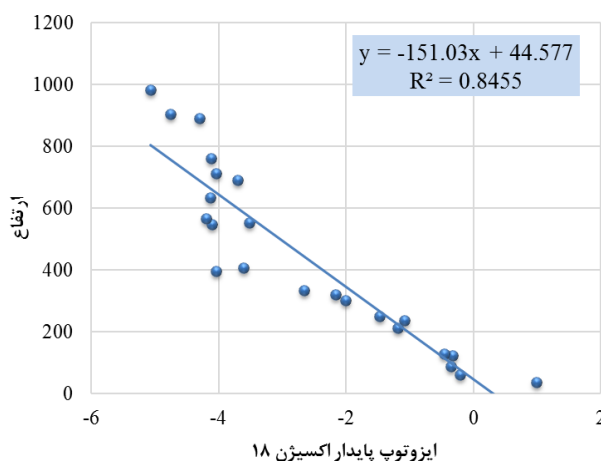
مدل سازی توزیع مکانی تغذیه در آبخوان های کارستی...

مکانی تغذیه‌ی آورده شده با روش کارستولوپ (شکل ۵-خ)، منطق بر طبقه‌ی بیشترین تغذیه است. نتیجه‌ی پژوهش‌های بسیاری (کوهفل و همکاران، ۲۰۰۸؛ کریمی، ۲۰۱۳؛ جلانی و همکاران، ۲۰۱۷ و ساپا و همکاران، ۲۰۱۸) با این پژوهش همخوانی دارد و بیانگر این نکته است که با شیب ارتفاعی ایزوتوپی می‌توان ارتفاع محل‌های تغذیه‌ی چشمه‌ها را با تخمینی پذیرفتنی برآورد کرد.

یافتن ارتفاع تغذیه‌ی چشمه‌ها با شیب ارتفاعی ایزوتوپی ارتفاع متوسط تغذیه‌ی چشمه‌ها از ترسیم کردن شیب ارتفاعی ایزوتوپی ($R^2 = 0/84$) با ارتفاع محل‌های نمونه برداری در برابر اندازه‌های دلتای ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ محاسبه شده است (جدول ۱۲، شکل ۶). ارتفاع محل‌های تغذیه‌ی چشمه‌ها با شیب ارتفاعی ایزوتوپی در محدوده‌ی طبقه‌ی ارتفاعی ۳۵۰-۵۵۰ گذاشته شد (شکل ۱) و باتوجه به نقشه‌ی توزیع

جدول ۱۲- ارتفاع متوسط تغذیه‌ی چشمه‌ها با شیب ارتفاعی ایزوتوپی.

چشمه	ارتفاع چشمه (متر)	دلتای ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸	ارتفاع تغذیه (متر)
دوین سرمستان	۶۸	-۲/۳۲	۳۹۵
گنوی	۶۰	-۲/۱۹	۳۷۶
تنگ خوش	۸۱	-۲/۵۴	۴۲۹



شکل ۶- نمودار شیب ارتفاعی ایزوتوپی.

که منطبق بر سازندهای آهکی گروه بنگستان و آسماری جهرم است. پراکنش محل‌های 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 نقشه‌ی پراکنش فروچاله‌های کارستی نیز نشان دهنده‌ی تراکم شدید رخساره‌های کارستی در محدوده‌ی تغذیه‌ی بیشینه در حوزه است. نوع رخساره‌های حوزه باعث ایجاد شدن دو نوع تغذیه‌ی منتشر و متمرکز در آبخوان شده است، به طوری که تغذیه‌ی منتشر از درز و شکاف‌ها و زمین‌های کارن، و تغذیه‌ی متمرکز از راه فروچاله‌ها و دره‌های کور انجام می‌شود. متوسط ارتفاع منطقه‌ی تغذیه‌ی چشمه‌های دوین سرمستان، گنوی و تنگ خوش با شیب ارتفاعی ایزوتوپی به ترتیب ۳۹۵، ۳۷۶ و ۴۲۹ متر برآورد کرده شد که در طبقه‌ی ارتفاعی ۳۵۰-۵۵۰ متر است و با توجه به نقشه‌ی توزیع مکانی تغذیه‌ی آورده شده با روش کارستولوپ، با قسمت‌های بیشترین تغذیه در حوزه مطابقت

نتیجه‌گیری

آبخیز تنگ خوش به دلیل داشتن سازندهای آهکی که حدود ۴۶٪ از مساحت حوزه است، و داشتن شرایط زمین‌ساختی و زمین‌ریخت‌شناسی، شرایط مناسبی برای ایجاد کردن و توسعه دادن رخساره‌های متنوع کارستی به وجود آورده است، که باعث شده است در حوزه‌ی آبخوان کارستی ایجاد شود که نقش مهمی در تأمین کردن آب خانگی و کشاورزی روستاهای پایین دست دارد. بررسی ویژگی‌های شیمیایی آب چشمه‌های خروجی از آبخوان نشان داد که سازند تغذیه‌کننده‌ی آن‌ها بر اساس نسبت Ca/Mg آهکی است (جدول ۳). روش کارستولوپ برای مدل سازی کردن توزیع مکانی تغذیه در منطقه‌های کارستی است، و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، تأکید بیشتری بر سامانه‌ی کارستی، روان آب، سنگ‌شناسی و لایه‌ی پوشاننده دارد. پهنه‌بندی منطقه‌های مستعد تغذیه با مدل کارستولوپ نشان داد که تغذیه در ۴۵٪ از مساحت حوزه بیش از ۶۰٪ است،

ردیابی مشخص، و روش کارست‌لپ در آن اجرا شود. میزان نفوذ با روش ترازنامه‌ی آب در حوزه‌ی آبرگیر چشمه‌ها محاسبه و با میزان نفوذ و تغذیه‌ی به‌دست‌آمده با روش کارست‌لپ مقایسه شود. نیز لازم است با نمونه‌برداری کردن از بارش و آب زیرزمینی در دوره‌های خشک و مرطوب در سال‌های مختلف، و تحلیل‌کردن ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸، دوتریوم و تریتیوم، منشأ و مکان تغذیه، مسیر حرکت آب زیرزمینی، و زمان ماندگاری آب در سامانه‌ی کارستی به‌دقت مشخص کرده شود.

دارد؛ یعنی چشمه‌ها از ارتفاعی تغذیه می‌شوند که در روش کارست‌لپ در محدوده‌ی تغذیه‌ی بیشینه (۷۶٪ تا ۸۶٪) شناسایی و پهنه‌بندی شده است. هم‌خوانی نتیجه‌ی روش کارست‌لپ در مدل‌سازی کردن توزیع مکانی تغذیه و شناختن محدوده‌ی بیش‌ترین تغذیه در حوزه با برآورد کردن ارتفاع محل‌های تغذیه چشمه‌ها با روش شیب ارتفاعی ایزوتوپی، نشان‌دهنده‌ی کارایی هر دو روش در شناختن محل‌های تغذیه‌ی آبخوان کارستی در آبخیز تنگ‌خوش است. پیشنهاد می‌شود که حوزه‌ی آبرگیر هر چشمه با روش‌های

- Andreo B, Vi'as J, Dura'n J, Jime'nez P, Lo'pez-Geta JA, Carrasco F. 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology*. 16: 911–925.
- Artugyan L, Urdea P. 2016. Using Digital Elevation Model (DEM) in Karst Terrain Analysis, Case Study: Anina Mining Area (Banat Mountains, Romania). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 11(1): 55–64.
- Azzaz H, Cherchali M, Meddi M, Houha B, Puig JM, Achachi A. 2008. The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, Northwest Algeria. *Hydrogeology*. 16: 531–546.
- Bahrami SH, Zangane Asadi MA, Jahanfar A. 2016. Efficiency of KARSTLOP Model for Modelling the Spatial Distribution of Recharge in Bi'stoon Karst Aquifer. 4th National Conference on Geomorphology and Land Use Planning, Tehran University. 2016: 233–236. (In Persian).
- Bakalowicz M. 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology*. 13:148–160.
- Bansah KJ, Anderson NL. 2017. FACTORS CONTRIBUTING TO KARST DEVELOPMENT IN SOUTHWESTERN MISSOURI, USA. *SAGEEP*. 2017: 219–223.
- Da'stranj A. 2018. Assessment and prioritization the factors affecting the charge of groundwater in karst areas and estimate groundwater recharge (Case study: Agevan-Bi'stoon and Dalahoo limestone masses- Kermanshah Province). Ph.D thesis, University of Hormozgan. 222 p. (In Persian).
- Davari Z, Gholami V, Jookar Sarhangi E. 2012. Simulation of Karstic Springs Discharge Using Artificial Neural Network (Case Study: Central Alborz Highlands). *Journal of Geographical Research*. 77: 57–68. (In Persian).
- Entezari m, Yamani M, Jafari Aghdam M. 2015. Modeling the Spatial Distribution of Karst Aquifers Recharge area using KARSTLOP model (Case study: Khoren Karst Aquifer). *Quantitative Geomorphological Research*. 4 (2): 121–137. (In Persian).
- Ford D, Williams P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, England, 562 p.
- Healy RW. 2010. *Estimating groundwater recharge*, Cambridge University Press. 256 p.
- Hughes AG, Mansour MM, Robins NS. 2008. Evaluation of distributed recharge in an upland semi-arid karst system: the West Bank Mountain Aquifer, Middle East. *Hydrogeology*. 16: 845–854.
- Janza M. 2010. Hydrological modeling in the karst area, Rizana spring catchment, Slovenia. *Environmental Earth Sciences*. 61: 909–920.
- Jeelani GH, Bhat NA, Shivanna A. 2017. Use of d18O tracer to identify stream and spring origins of a mountainous catchment: A case study from Liddar watershed, Western Himalaya, India. *Hydrology*. 393: 257–264.
- Jones IC, Banner JL, Humphrey JD. 2000. Estimating recharge in a tropical karst aquifer. *Water Resources*. 36: 1289–1299.
- Kalantari N, Mohamadi Behzad HR. 2016. Stable Isotope of Oxygen-18 and Deuterium as an Important Tool to Determine the Recharge Height and Recognize the Origin of a Karst Spring (Case Study: Karst Springs of the Northeast of Khuzestan Province). *Proceedings of the 2st National Conference on Application of Stable Isotopes*, Mashhad, Iran. 20–29. (In Persian).
- Karimi H. 2013. Differentiation of spring catchment area using isotope data, Case study: Beshiveh Plain springs, Kermanshah. *Proceedings of the 1st National Conference on Appli-*

- cation of Stable Isotopes, Mashhad, Iran. 104–109. (In Persian).
- Karimi Vardanjani H. 2011. Karst Hydrology «Concepts and Methods». Eram Shiraz Press. 419 p. (In Persian).
- Kohfahl C, Sprenger CB, Herrera J, Meyerc H, Fernandez Chacon dF, Pekdeger A. 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: A field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Applied Geochemistry Journal*. 23: 846–862.
- Management and Planning Organization of Bushehr Province. 2017. Land Management Plan of Bushehr. (In Persian)
- 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.
- Osati Kh. 2013. The Role of Karst Discharges on Stream Flow Hydrograph (Case Study: Upper Karkheh River Basin). Ph.D thesis, University of Tehran. 200 p. (In Persian).
- Porhemat R, Porhemat J, Naseri HR. 2013. Investigation the Runoff Thresholds in Karstic Lands (Case Study: Karstic Basin of Delibijac Sepidar). *Journal of Watershed Management Engineering and Sciences*. 6(19): 49–58. (In Persian).
- Radulovic M, Stevanovic Z. 2012. A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies. *Environmental Earth Sciences*. 65: 2221–2230.
- Saffari A, Kiani T, Zangenehtabar S. 2018. Investigation the Effective Factors in Karst Development and Zoning of Khoorin Mountain Using Fuzzy Logic Method. *Journal of Applied Geosciences Research*. 19(55): 23–36. (In Persian)
- Sappa G, Vitale S, Ferranti F. 2018. Identifying Karst Aquifer Recharge Areas using Environmental Isotopes: A Case Study in Central Italy. *Geosciences*. 8(351): 2-15.
- Schulz SH, De Rooij G, Schüth Ch, Michelsen N, Al-Saud M, Rausch R, Merz R. 2016. Estimating groundwater recharge for an arid karst system using a combined approach of time-lapse camera monitoring and water balance modeling. *Hydrology*. 30: 771–782.
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C. 2005. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology*. 14: 433–443.
- Waele J, Plan L, Audra P. 2009. Recent Developments in Surface and Subsurface Karst Geomorphology: An Introduction. *Geomorphology*. 106(1-2): 1–8.
- Watershed Management and Natural Resources Office of Bushehr Province. 2011. Detailed – Executived Watershed Management Studies in Abdan Watershed. 1100 p. (In Persian)
- Yoshimura K, Nakao S, Noto M, Inokura Y, Urata K, Chen M, Lin PW. 2001. Geochemical and stable isotope studies on natural water in the Taroko Gorge karst area, Taiwan- chemical weathering of carbonate rocks by deep source CO₂ and sulfuric acid. *Chemical Geology*. 177: 415–430.



Watershed Management Research

VOL. 33, No. 1, Ser. No: 126, Spring 2020, pp. 88 -104
DOI: 10.22092/wmej.2019.126518.1226

Modeling of Recharge Spatial Distribution in Karst Aquifers of Tangekhosh Watershed (Bushehr Province) Using the KARSTLOP Method

Fatemeh Tavakolirad

(Corresponding Author)* Ph.D. Graduated of Watershed Science and Engineering, Natural Resources Faculty, Tehran University

Ali Akbar Nazari Samani

Associate Professor, Natural Resources Faculty, Tehran University

Arash Malekian

Associate Professor, Natural Resources Faculty, Tehran University

Zargham Mohammadi

Associate Professor, Sciences Faculty, Shiraz University

*Corresponding Author Email: F.tavakolirad@ut.ac.ir

Received: 01 June 2019

Accepted: 03 September 2019

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 Bushehr 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 2016–2017 period. Digital recharge map obtained by the KARSTLOP method was shown that 45 percentage of the watershed areas had more than 60 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 Dovin Sarmaştan, Ganavi and Tangekhosh springs was estimated at 395, 376 and 429 meters, respectively, using the altitudinal isotopic gradient method, which were placed in the altitude range of 350-550 meter and it contains the maximum recharge zone (76 to 86 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 Tangkhosh Watershed.

Keywords: Altitudinal isotopic gradient, karst aquifer, KARSTLOP method, recharge, Tangekhosh Watershed