

مقایسه برداشت ایران و ترکمنستان از آبخوان کارستی هزارمسجد و مخاطرات آن

سارا کیانی*

استادیار، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

امیر صفاری

دانشیار دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

مسعود مرسلی

استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان

مجید خانمحمدی

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱/۲۰ - تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۶/۸)

چکیده

کاهش منابع آب در دسترس تحت تأثیر عوامل انسانی و طبیعی و توسعه کشورها و افزایش نیاز به آب، تخصیص عادلانه منابع آب را به مسئله‌ای پراهمیت تبدیل کرده است. این مسئله در حوضه‌های آبریز مرزی مشترک بین دو یا چند کشور ممکن است مناقشات سیاسی را نیز در پی داشته باشد. منابع آب کارستی مشترک با ترکمنستان در شمال شرق کشور در سازند هزارمسجد از جمله مسائل مدیریت هیدروپلیتیک بین این دو کشور است. در دهه‌های اخیر نیاز روزافزون به آب و کاهش ذخایر آبرفتی موجب توجه بیشتر کارشناسان به بهره‌برداری از منابع آب موجود در سازندهای آهکی شده است. شناسایی منابع آب کارستی در حوضه تحت بررسی و ارزیابی بیلان منابع آب زیرزمینی موضوع این پژوهش بوده است. بدین منظور داده‌های بارندگی، دما و تبخیر که در مجموع مقدار آب ورودی منطقه است و نیز داده‌های برداشت منابع آب به صورت رودخانه‌های جاری، چشمه، چاه و قنات با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و نرم‌افزارهای اقلیمی و افزونه کریستال‌بال در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ کدنویسی و با روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از آن است که مقدار تغذیه از بارندگی در کل سازندهای کارستی محدوده مطالعاتی کلات ۱۰۱۵ میلیون متر مکعب است. حجم کلی آب تخلیه‌شده در محدوده مطالعاتی هزارمسجد از طریق تخلیه به آبرفت و رودخانه، چشمه، چاه و قنات به ترتیب ۱۱۳، ۱۵۲/۹۱، ۱۴/۹۶ و ۲۶/۰۸ میلیون متر مکعب و در مجموع ۳۰۶/۹۵ میلیون متر مکعب است. شاخص برداشت آب در ترکمنستان نیز در پنجاه سال گذشته از ۱۴/۴ به ۶۰ میلیون متر مکعب رسیده است. نبود مدیریت و بی‌توجهی به پایداری آبخوان در آینده چالش‌های محیطی را در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آبخوان کارستی، ترکمنستان، ژئومورفولوژی، مخاطرات، هزارمسجد.

مقدمه

یکی از پژوهش‌های کاربردی در مناطق آب کارستی، ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب است. در سال‌های اخیر گرم شدن کره زمین و کاهش بارندگی در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران، سبب افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده است. از طرفی کمبود منابع آب و نزولات جوی تحت تأثیر تغییر اقلیم در تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی این مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۸، ۱۹]. آب فراوان در دره‌ها در دوره یخچالی و ذوب یخ‌ها و فراوانی بیشتر آب در دوره پسایخچالی، پتانسیل تشکیل شرایط کارست‌زا را در سازندهای آهکی شکستگی‌دار فراهم کرده است [۸]. محیط‌های کارستی، ساختار فضایی یا زیرزمینی، نحوه عملکرد این ساختارها، تخمین ظرفیت آبخوان، تخمین مناسب‌ترین محل استخراج آب و آسیب‌پذیری کارستی از نکات مهم در تحقیقات مربوط به مناطق کارستی است [۱۲، ۱۴]. آبخوان‌های کارستی شمال استان خراسان شمالی و رضوی در زون هزارمسجد (کپه‌داغ) واقع شده است. این منطقه براساس دو سیستم آمبروزه و دومارتن جزء اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. اثر اقلیم در ایجاد اشکال سطحی به عوامل سنگ‌شناسی و زمین‌ساختی بستگی دارد [۳، ۹، ۱۱]. سازندهای کربناتی در طی دوران‌های زمین‌شناسی سیستم گسترده‌ای از جریان آب زیرزمینی نهفته و نایافته کارستی را در خود دارد. چشمه‌های کارستی در سرانی، ارناره و رزقانه از مهم‌ترین چشمه‌های این منطقه به‌شمار می‌آید که حجم تخلیه سالانه آنها کمتر از حجم تغذیه سالانه است. اهمیت اصلی این پهنه‌ها بررسی نشانه‌های ژئومورفولوژی و حجم زیاد آب‌های زیرزمینی موجود در سازندهای کارستی است [۲۱، ۲۷، ۱۹]. در سال ۲۰۱۳ حدود ۲۸ درصد از جمعیت جهان از منابع آب کارستی بهره می‌برند. براساس آخرین تحقیقات، ۱۲ درصد مساحت کل ایران را سازندهای کربناته و حدود ۸ درصد از منابع آب ایران را منابع آب کارستی تشکیل داده است که در تأمین آب شرب کشور اهمیت بسیار زیادی دارند؛ از طرف دیگر کیفیت این منابع امروزه مورد توجه جدی قرار گرفته است. [۱، ۲، ۲۲-۲۴-۱۵]. عوامل یکسان مانند کمبود آب و توسعه اقتصادی ممکن است گستره متنوعی از منازعات یا همکاری‌ها را ایجاد کنند که این موضوع یکی از مشکلات تجزیه و تحلیل مناسبات هیدروپلیتیک در سیستم رودخانه‌ها و حوضه‌های آبی مشترک بین‌المللی است [۱۰]. برداشت بی‌رویه آب توسط ترکمنستان از حوضه آب کارستی هزارمسجد در پنجاه سال گذشته و نداشتن رژیم حقوقی مناسب، زمینه چالش و منازعه در روابط دو کشور را فراهم کرده است [۱۰]. این پژوهش به بررسی مقدار برداشت آب از سفره کارستی هزارمسجد بین ایران و ترکمنستان

پرداخته است. به این منظور ابتدا داده‌های آب‌وهوایی منطقه با هدف شناخت تغییرات صورت‌گرفته به لحاظ بارش، دما و تبخیر در پنجاه سال گذشته و دستیابی به مقدار آب ورودی به منطقه بررسی و ارزیابی شد. برای بررسی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی بجنورد، اسفراین، جاجرم، مانه و سملقان و نیشابور تحلیل شد. برای بررسی مقدار مصرف آب ایران و ترکمنستان، داده‌های برداشت آب که به صورت چاه، قنات و چشمه است از وزارت نیرو دریافت شد. با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و اقلیمی و با توجه به آمارهای موجود با روش شبیه‌سازی داده‌های لازم با افزونه کریستال بال در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ کدنویسی و با روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد.

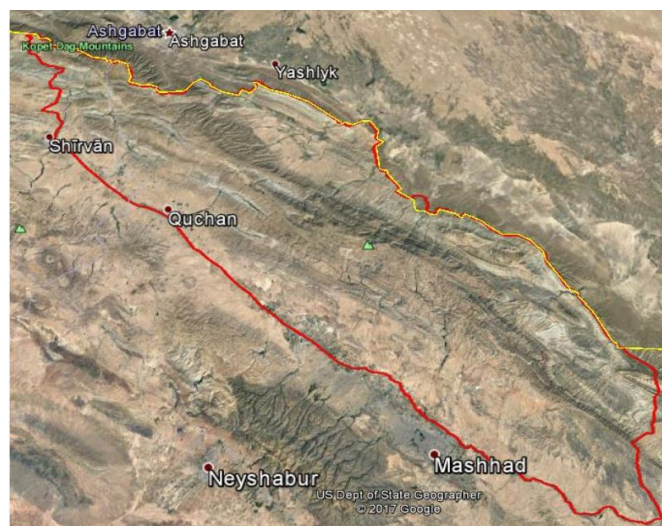
محدوده پژوهش

حوضه هزارمسجد در شمال خاوری ایران واقع شده است. این حوضه از خاور دریای کاسپین آغاز می‌شود و پس از عبور از ترکمنستان و ایران، در راستای باختری-شمال باختری تا خاوری-جنوب خاوری وارد خاک افغانستان می‌شود و از نظر مختصات جغرافیایی بین عرض ۵۸ درجه تا ۶۴ درجه و طول ۳۶ درجه تا ۳۷ درجه قرار دارد (شکل ۱) [۳]. در ارتفاعات هزارمسجد کپه‌داغ، مناطق کارستی متعددی وجود دارد. هر گونه پژوهش درباره ژئومورفولوژی کارست به لحاظ شناخت اشکال کارستی، آبخوان‌ها، ارتباط فرم‌های کارستی با سیستم هیدرولیکی آن و کاربری و مدیریت آن حائز اهمیت است [۱۴]. محدوده مطالعاتی رشته‌کوه هزارمسجد در پهنه کپه‌داغ با طول ۴۹۷ کیلومتر و وسعت ۲۵۸۰۰ کیلومتر مربع در شمال استان خراسان واقع شده است. رشته‌کوه هزارمسجد در میان گسل کشف‌رود در جنوب باختر و گسل مزدوران در شمال خاوری جای گرفته است. آب‌وهوای منطقه سرد کوهستانی، معتدل کوهستانی و نیمه‌صحرائی سرد در شمال و شمال غرب است. میانگین بارندگی سالانه ۱۸۰ میلی‌متر است. در ارتفاعات هزارمسجد کپه‌داغ، مناطق کارستی زیادی وجود دارد که ساکنان با حفر حلقه چاه‌هایی در آبخوان کارست ۸۰ درصد آب آشامیدنی خود را از آن تأمین می‌کنند.

روش تحقیق و داده‌ها

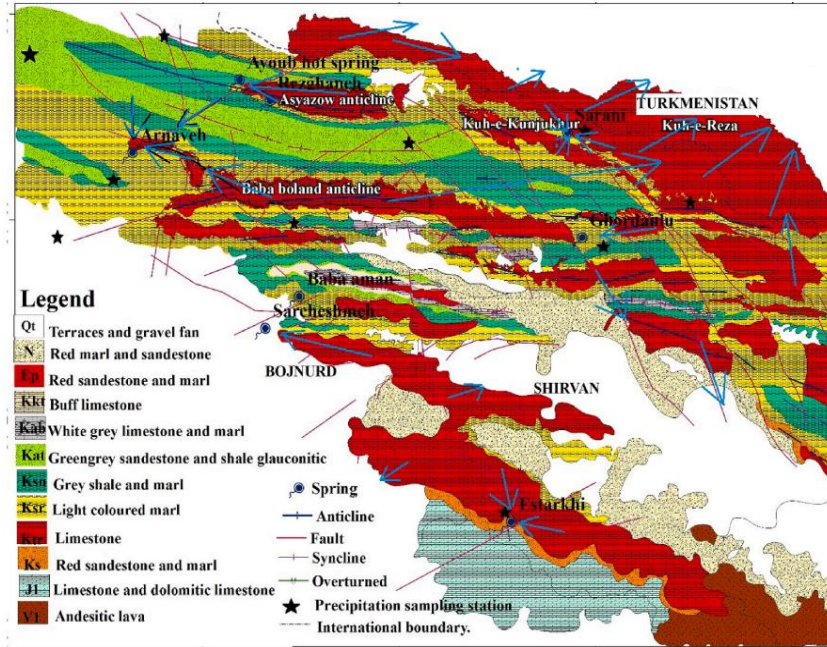
روش مونت کارلو نوعی الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. روش‌های مونت کارلو به‌طور معمول برای شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شوند. از سوی دیگر روش مونت کارلو یک طبقه از الگوریتم‌های محاسبه‌گر است که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرارشونده

تصادفی اتکا می‌کند. روش‌های مونت کارلو اغلب در شبیه‌سازی سامانه‌های ریاضیاتی یا فیزیکی استفاده می‌شوند. به دلیل اتکا بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی یا تصادفی کاذب، روش‌های مونت کارلو اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش‌های مونت کارلو زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد. روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو به ویژه در مطالعه سیستم‌هایی مفید است که در آنها تعداد زیادی متغیر با درجه آزادی‌های دوبه‌دو مرتبط وجود دارد که از جمله این سیستم‌ها می‌توان به سیالات اشاره کرد. روش‌های مونت کارلو برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی‌های آنها وجود دارد نیز مفیدند. [۲۴]

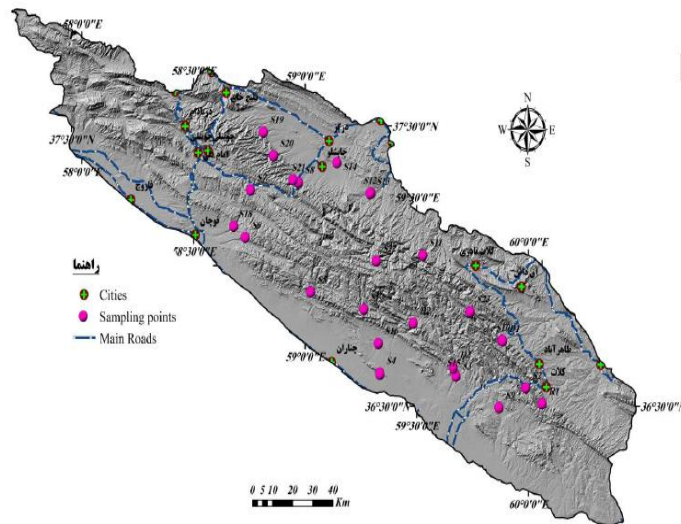


شکل ۱. منطقه پژوهش در رشته کوه هزارمسجد

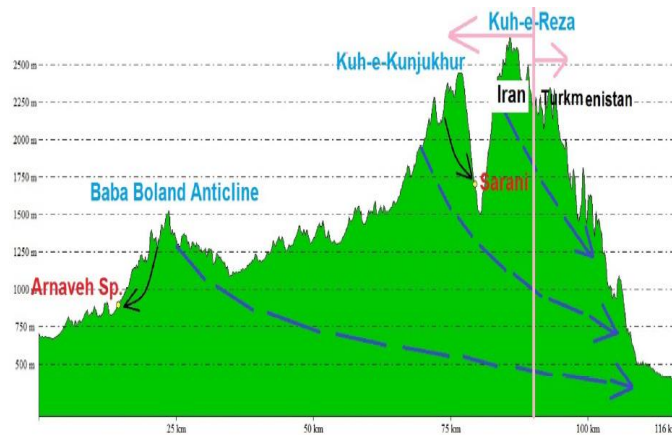
براساس نقشه‌های زمین‌شناسی ایران و ترکمنستان (شکل ۲) و همچنین داده‌های برداشت شده هیدروشیمیایی و ایزوتوپی سازمان زمین‌شناسی کشور، حوضه آب کارستی هزارمسجد بین ایران و ترکمنستان مشترک است (شکل ۳، جدول ۱). براساس داده‌ها و پارامترهای فیزیکوشیمیایی عمومی و ترکیبات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه، مسیر حرکت آب‌های کارستی براساس شیب لایه‌های زمین‌شناسی و شیب هیدرولوژیکی منطقه مطابق شکل ۴ است.



شکل ۲. منطقه پژوهش در رشته کوه هزارمسجد بین ایران و ترکمنستان



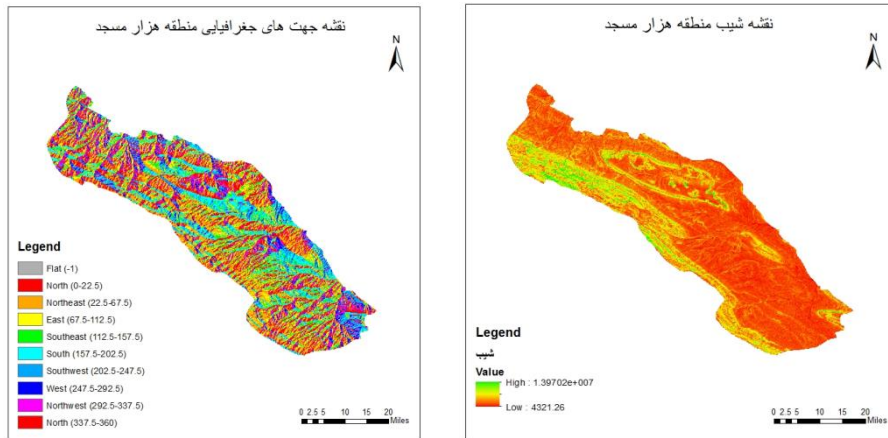
شکل ۳. موقعیت و نقاط برداشت نمونه های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی: [۱۹]



شکل ۴. مقطع هیدروژئولوژیک از آرناوه تا چشمه سارانی و جهت احتمالی محلی (فلش‌های سیاه) و منطقه‌ای (فلش‌های آبی خط تیره) [۱۹]

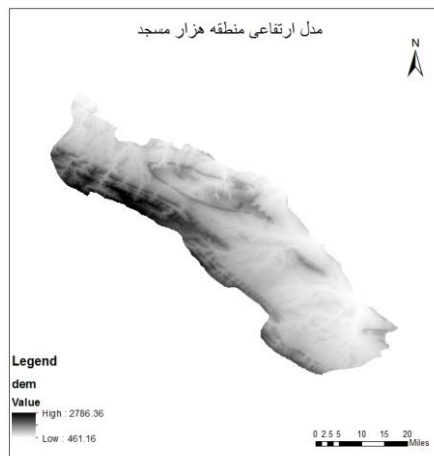
جدول ۱. مقدار متوسط پارامترهای فیزیکوشیمیایی عمومی و ترکیبات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه (غلظت یون بر حسب meq/l) [۱۶]

	آرناوه	سارانی	رزقانه	ایوب	قوردانلو	استرخی
EC (µS/cm)	۸۳۰	۳۷۰	۶۷۰	۱۰۵۰	۴۰۰	۶۷۰
T (°C)	۲۱	۱۵	۱۹	۴۰	۱۷	۱۹
pH	۷/۹	۸	۸	۷/۵	۷/۸	۷/۸
Discharge (L/s)	۵۰۰	۳۵	۲۵۰	۱۱	۱۳	۱۸۰
Ca ²⁺	۲/۸	۱/۲	۲/۵	۴	۱/۸	۴/۵
Mg ²⁺	۲/۳	۲	۳/۳	۳	۲/۳	۲/۵
SO ₄ ²⁻	۲/۵	۰/۶	۱/۸	۵/۵	۰/۷	۱/۶
HCO ₃ ⁻	۴/۶	۳/۵	۴/۷	۴/۲	۳/۳	۵
Na ⁺	۲/۸	۰/۲۵	۱/۸	۳/۷	۰/۳	۱/۲
Cl ⁻	۱/۲	۰/۳	۱/۳	۱/۵	۰/۵	۱
K ⁺	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۴
δ ¹⁸ O (‰)	-۱۰/۲۲	-۱۱/۵۳	-۱۱/۲۸	-۱۱/۰۱	-۱۱/۰۹	-۱۰/۲۶
δD (‰)	-۶۶/۹۲	-۷۳/۲	-۷۲/۵۹	-۷۲/۸۸	-۷۰/۲۲	-۶۱/۵۴
δ ¹³ C (‰)	-۳/۷۲	۳/۰۲	-۲/۹	-۱/۹۳	-۵/۲	-۱/۸۶
δ ³⁷ Cl (‰)	۰/۱۹	-۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۲	-	۰/۰۶



شکل ۶. شیب منطقه هزارمسجد

شکل ۵. مدل ارتفاعی منطقه هزارمسجد



شکل ۷. جهت شیب منطقه هزارمسجد

منبع: نگارنده

براساس نقشه‌ها و مدل ارتفاعی منطقه (شکل‌های ۵ تا ۷) و همچنین مطابق داده‌های فیزیکوشیمیایی عمومی و ترکیبات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه (جدول ۱)، بیشترین مقدار تغذیه منابع آب کارستی در ارتفاع ۲۲۰۰ تا ۲۷۰۰ متر واقع شده است. براساس ارتفاعات تغذیه، بودجه آب زیرزمینی و تجزیه و تحلیل موقعیت تکتونیکی، جریان‌های محلی و منطقه‌ای

تنظیمات هیدروژئولوژیکی منطقه را کنترل می‌کنند. مقدار زیادی آب به سمت کشور همسایه جریان پیدا می‌کند (شکل ۴). پهنه‌های چین‌خوردگی و گسلی می‌توانند متغیرهای مهمی در جریان آب زیرزمینی در سفره کارستی باشند. از نظر توسعه کارستی، در اطراف منطقه سارانی در آبخوان کارستی فرامرزی، کارست توسعه‌یافته‌تر است و جریان مجرای رژیم جریان غالب در این منطقه نسبت به مناطق دیگر است.

تعیین پارامترهای ورودی

ورودی‌های بیلان در محدوده مطالعاتی شامل مقدار بارش، ضریب نفوذ و وسعت سازندهای کارستی است. با توجه به گستردگی محیط و تغییرات زیاد اقلیمی آن، برای تهیه لایه بارندگی، محدوده مطالعاتی با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود به چند زیرمحدوده تقسیم شد. در جدول ۲ معادلات خطی ارتفاع بارش آورده شده است. سپس با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی DEM بارش متناظر به ارتفاع در هر زیرمحدوده به دست آمد. در شکل ۸ نقشه زیرمحدوده‌های بارش نشان داده شده است. با توجه به اینکه هر سازند کارستی در چند زیرمحدوده مطالعاتی قرار دارد، برای تعیین مقدار بارش اختصاص یافته به آن سازند، میانگین هندسی بارش از این زیرمحدوده‌های مطالعاتی گرفته شد. سپس ضریب نفوذ برای هر زیرمحدوده بارش با توجه به نبود آب‌فروچاله‌ها و همچنین براساس تغییرات ارتفاعی و تراکم عناصر ساختاری سازندهای کارستی بین ۶۰-۴۰ درصد تعیین شد. در نهایت مقادیر تغذیه سازندهای کارستی به تفکیک زیرمحدوده‌های بارش، مجموع سازندی و مجموع محدوده مطالعاتی کلات برحسب میلیون متر مکعب محاسبه شد (جدول ۳).

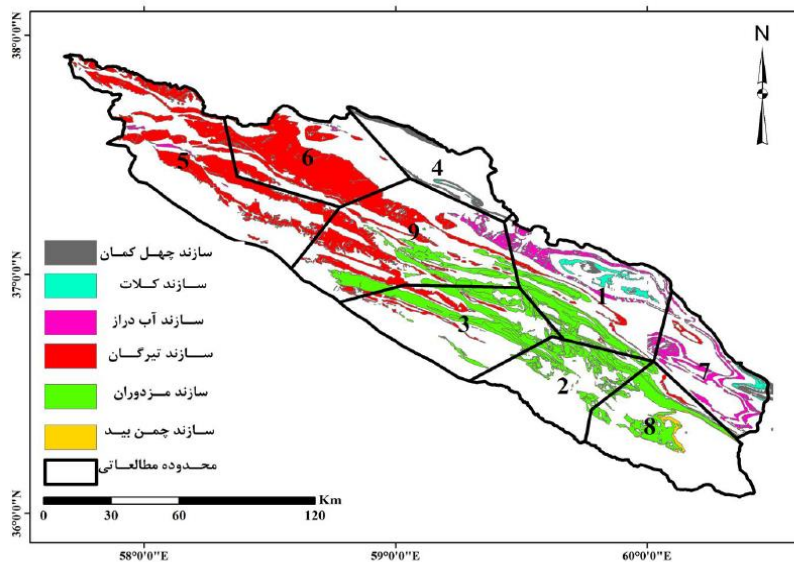
تعیین پارامترهای خروجی (تخلیه)

در این تشکیلات کارستی در بیشتر موارد حجم آب تخلیه‌شده توسط قنات‌ها و چاه‌ها در مقایسه با چشمه‌ها بسیار اندک است. با این حال در محدوده مطالعاتی کلات اطلاعات مناسبی از مقدار تخلیه آب سازندی از طریق چاه و قنات موجود است [۲۳] و مقادیر آنها نیز نسبت به دیگر مؤلفه‌های بیلان قابل چشم‌پوشی نیست؛ از این رو در محاسبات مربوط به بیلان از آنها نیز استفاده شده است. حجم کلی آب تخلیه‌شده در محدوده مطالعاتی از طریق تخلیه به آبرفت و رودخانه، چشمه، چاه و قنات به ترتیب ۱۱۳، ۱۵۲/۹۱، ۱۴/۹۶، ۲۶/۸ میلیون متر مکعب است (جدول ۴).

در جدول ۵ پارامترهای ورودی و خروجی بیلان آب زیرزمینی کارست به تفکیک سازندها ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود سازند تیرگان دارای بیلان مثبت ۳۰۹/۷۳ میلیون متر مکعب است و پس از آن، سازندهای مزدوران و آب دراز به ترتیب با بیلانهای مثبت ۲۶۸/۱۱ و ۷۵/۲۴ میلیون متر مکعب در مراتب بعدی اهمیت قرار می گیرند.

جدول ۲. ارتفاع - بارش در زیر محدوده های مطالعاتی [۱۳]

همبستگی R^2	معادله ارتفاع بارش	زیرمحدوده
$R^2=0.87$	$P=0.1184A+207.96$	1
$R^2=0.74$	$P=0.2266A-14.977$	2
$R^2=0.98$	$P=0.1822A-13866$	3
$R^2=1$	$P=0.6907A+1.1307$	4
$R^2=0.9$	$P=0.0632A+191.45$	5
$R^2=1$	$P=0.4321A-243.03$	6
$R^2=1$	$P=0.1428A+144.2$	7
$R^2=1$	$P=0.0891A+199.56$	8
$R^2=0.97$	$P=0.4852A-19307$	9



شکل ۸. سازندهای کارستی در زیرمحدوده های مطالعاتی تعیین شده براساس ایستگاه های باران سنجی [۱۲]

جدول ۳. مقدار تغذیه سازندهای کارستی به تفکیک زیرمحدوده‌های بارش، مجموع سازندی و مجموع محدوده مطالعاتی کلات برحسب میلیون متر مکعب (MCM)

زیر محدوده بارش	مقدار تغذیه سازندهای کارستی در هر محدوده مطالعاتی (MCM)						مساحت سازندهای کارستی در هر محدوده مطالعاتی (Km ²)					
	چمن بید	تیرگان	مردوزان	کلات	چهل کمان	آب دراز	چمن بید	تیرگان	مردوزان	کلات	چهل کمان	آب دراز
۱	۰/۰۰	۱۵۳۱	۹۴/۸۴	۱۸۳۶	۳/۶۶	۴۴/۸۵	۰	۷۷/۳۶	۴۷۸۴۴	۹۳/۹۴	۱۸۴۵	۲۳۶۳۳
۲	۰/۰۰	۰/۳۵	۶۵/۵۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۲۱۱۴	۴۰۳/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۳	۰/۰۰	۳۴/۸۸	۹۳/۷۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۱۷۲/۱۹	۶۴۱/۷۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۱۶	۲۳/۵۶	۰/۰۴	۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۴/۸۷	۱۰۶/۰۳	۷/۱۸
۵	۰/۰۰	۱۸۹/۶۵	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۷۸	۰	۳۱ ۱۰۵۷	۰/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۱۰/۳
۶	۰/۰۰	۸۲/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۶۵	۰	۹۵/۱۵	۰/۰۰	۰/۵۵	۰/۰۰	۷/۷۹
۷	۰/۰۰	۰/۸۲	۰/۶۲	۵/۱۷	۳/۶۴	۳/۳۴	۰	۳۳/۳۷	۵/۱۷	۴۲/۹۳	۳/۳۳	۲۵۰/۸۸
۸	۷/۵۳	۳/۹۹	۶۳/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۷/۹۶	۲۴/۴۳	۳۸/۷۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹	۰/۰۰	۱۷۸/۳۸	۸۲/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۳/۸۱	۰	۷۳/۳۳	۴۳۹/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۷۳/۶۹
	۷/۸۳	۴۵۷/۷۲	۳۹۹/۵۶	۲۷/۰۴	۴۹/۸۶	۹۳/۳۷		مجموع سازندی				
		۱۰۱۵MCM						مجموع کل محدوده مطالعاتی				

منبع: ن [۱۴]

جدول ۴. حجم تخلیه از آب‌های زیرزمینی به تفکیک سازندهای کارستی [۱۴]

سازند پارامتر خروجی	مزدوران	تیرگان	آب دراز	چهل کمان	کلات	چمن بید	مجموع (MCM)
مقدار تخلیه از چشمه‌ها	۵۸/۶۶	۷۷/۲	۱۴/۲۷	۰/۰۲	۱/۶۶	۱/۱	۱۵۲/۹۱
مقدار تخلیه از چاه‌ها	۸/۱	۵/۶	۰/۹۱	۰	۰/۳۵	۰	۱۴/۹۶
مقدار تخلیه از قنات‌ها	۱۴/۱	۸/۳	۰/۲۴	۳/۳	۰/۱۶	۰	۲۶/۸
مقدار تخلیه به آبرفت و رودخانه	۵۰/۵۹	۵۶/۸۹	۲/۷۱	۰/۷	۰/۶۱	۱/۵	۱۱۳
					مجموع		۳۰۶/۹۵

جدول ۵. نتایج محاسبه بیلان آب زیرزمینی به تفکیک سازندهای کارستی [۱۴]

سازند	مزدوران	تیرگان	آب دراز	چهل کمان	کلات	چمن بید
بارامتر خروجی	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی
تغذیه از بارندگی	۳۹۹/۵۶	۴۵۷۷۲	۹۳۳۳۷	۲۹/۸۴	۲۷/۰۴	۷/۸۳
مقدار تخلیه از چشمه‌ها	۵۸/۶۶	۷۷/۲	۱۴/۲۷	۰/۰۲	۱/۶۶	۱/۱
مقدار تخلیه از چاه‌ها	۸/۱	۵/۶	۰/۹۱	۰	۰/۳۵	۰
مقدار تخلیه از قنات‌ها	۱۴/۱	۸/۳	۰/۲۴	۳/۳	۰/۱۶	۰
مقدار تخلیه به آبرفت و رودخانه	۵۰/۵۹	۵۶/۸۹	۲/۷۱	۰/۷	۰/۶۱	۱/۵
تغییر در ذخیره (MCM)	۲۶۸/۱۱	۳۰۹/۷۳	۷۵/۲۴	۲۴/۰۳	۲۴/۵۲	۶/۳۴
			مجموع			۷۰۸MCM

به‌طور کل، مقدار تغذیه از بارندگی در کل سازندهای کارستی محدوده مطالعاتی کلات 1015 میلیون متر مکعب است. تخلیه از طریق چشمه، چاه، قنات، آبرفت و رودخانه نیز در این سازندها ۳۰۶/۹۵ میلیون متر مکعب است. در نتیجه، تغییر در ذخیره منابع آب کارستی محدوده در حدود ۷۰۸ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود.

داده‌ها و آمار و اطلاعات موجود بیلان آب‌های کارستی را در منطقه مشخص می‌کند، اما از آنجا که برداشت داده‌ها همواره با خطا و نقص همراه است، برای رفع این مشکل از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد.

تحلیل حساسیت و اجرای شبیه‌سازی

داده‌های آب منطقه‌ای، داده‌های سازمان زمین‌شناسی کشور و همچنین داده‌های سازمان هواشناسی که در جدول بالا استفاده شده بودند، داده‌های ورودی این روش در نظر گرفته شدند. داده‌ها با افزونه کریستال بال در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ کدنویسی و با روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد. شاخص مقدار برداشت کشور همسایه به صورت کامل بازسازی و شبیه‌سازی شد (جدول ۶).

جدول ۶. شاخص‌های بررسی شده در پژوهش (۲۰۲۰-۱۹۷۰) [۴، ۱۴]

سال	دما	میانگین بارش سالیانه	مقدار تبخیر	تخلیه آب از چاه و قنات (میلیون متر مکعب)	تخلیه آب از چشمه‌ها (میلیون متر مکعب)	تخلیه آب از رودخانه و آبرفت‌ها (میلیون متر مکعب)	حجم آب نفوذ یافته (میلیون متر مکعب)	مقدار برداشت کشور همسایه (میلیون متر مکعب)	حجم کل منابع آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)
۱۹۷۰-۷۹	۱۴/۴	۲۸۶/۷	۷۳۶/۳	۱۴/۲	۱۶۲/۳	۱۳۷/۸	۱۰۸۶/۵	۱۴/۵	۷۷۲/۲
۱۹۸۰-۸۹	۱۴/۸۳	۲۷۹/۳۵	۷۳۸/۴۱	۱۵/۳۳	۱۶۳/۷۶	۱۳۶/۶۳	۱۰۷۹/۷۵	۱۶/۷۵	۷۶۴/۰۴
۱۹۹۰-۹۹	۱۷/۱۵	۲۵۸/۷۶	۷۴۲/۱۵	۳۱/۶۷	۱۵۳/۹۷	۱۲۰/۸۶	۹۸۸/۹۱	۴۷/۰۳	۶۸۲/۴۱
۲۰۰۰-۰۹	۱۸/۰۰	۲۵۲/۰۰	۷۴۴/۰۳	۴۱/۰۰	۱۵۰/۲۰	۱۱۳/۰۰	۹۵۰/۰۰	۵۵/۰۰	۶۴۵/۸۰
۲۰۱۰-۲۰	۱۸/۰۰	۲۵۲/۰۰	۷۴۴/۰۳	۴۱/۰۰	۱۵۰/۲۰	۱۱۳/۰۰	۹۵۰/۰۰	۶۰/۰۰	۶۴۵/۸۰

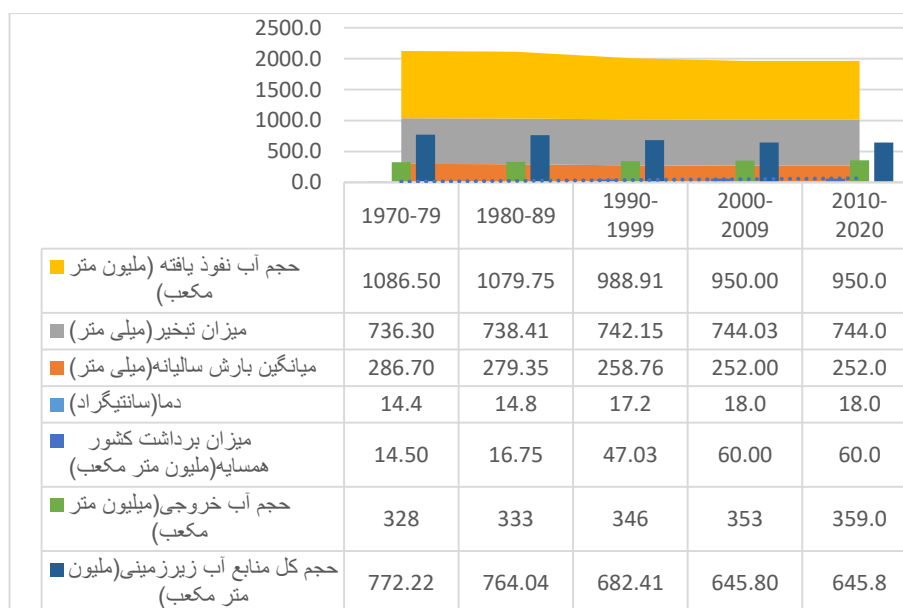
جدول ۶ سه شاخص اقلیمی (دما، میانگین بارندگی سالانه و مقدار تبخیر) و دیگر شاخص‌ها را در پنجاه سال گذشته نشان می‌دهد. شاخص دما بیشترین تغییر را داشته و دما ۳ درجه بیشتر شده است. شاخص تخلیه آب از چاه و قنات که به شدت وابسته به عامل انسانی است در حال رشد بوده است. براساس شواهد و اطلاعات آب منطقه‌ای و همچنین شبیه‌سازی‌های انجام گرفته شاخص برداشت آب در کشور همسایه (ترکمنستان) نیز در پنجاه سال گذشته از ۱۵ به ۶۰ میلیون متر مکعب رشد داشته است. در جدول ۷، شاخص حجم خروجی آب در پنج دهه گذشته در کنار متغیرهای دما، میانگین بارش سالیانه و حجم آب نفوذ یافته و مقدار برداشت کشور همسایه آورده شده است. خروجی آب در پنج دهه گذشته از ۳۲۸ میلیون متر

مکعب به ۳۵۹ میلیون متر مکعب رسیده و حجم آب نفوذیافته از ۱۰۸۶ میلیون متر مکعب به ۹۵۰ میلیون متر مکعب کاهش داشته است.

در جدول ۸ و شکل ۹ شاخص حجم کل منابع آب زیرزمینی در کنار دیگر متغیرهای پژوهش بررسی شده است. این شاخص در طی پنج دهه گذشته از ۷۷۲ میلیون متر مکعب به ۶۴۵ میلیون متر مکعب رسیده است.

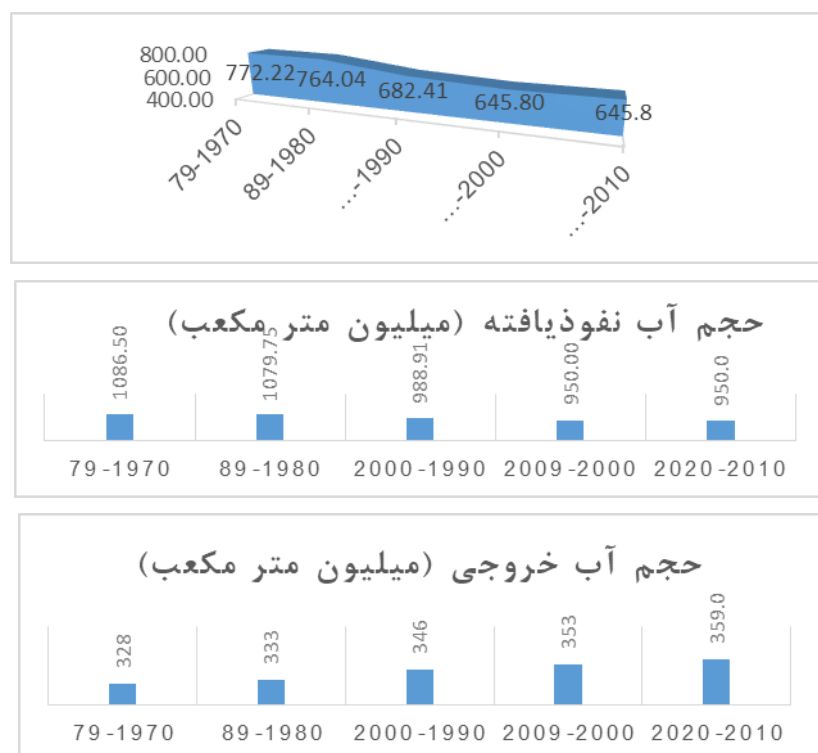
جدول ۷. شاخص حجم خروجی آب در پنج دهه گذشته [۴]

سال	دما (c)	میانگین بارش سالیانه (mm)	مقدار تبخیر (mm)	حجم آب نفوذیافته (mm ³)	مقدار برداشت کشور همسایه (mm ³)	حجم خروجی آب (mm ³)
۱۹۷۰-۷۹	۱۴/۴	۲۸۶/۷۰	۷۳۶/۳۰	۱۰۸۶/۵۰	۱۴/۵۰	۳۲۸
۱۹۸۰-۸۹	۱۴/۸	۲۷۹/۳۵	۷۳۸/۴۱	۱۰۷۹/۷۵	۱۶/۷۵	۳۳۳
۱۹۹۰-۹۹	۱۷/۲	۲۵۸/۷۶	۷۴۲/۱۵	۹۸۸/۹۱	۴۷/۰۳	۳۴۶
۲۰۰۰-۰۹	۱۸/۰	۲۵۲/۰۰	۷۴۴/۰۳	۹۵۰/۰۰	۶۰/۰۰	۳۵۳
۲۰۱۰-۲۰	۱۸/۰	۲۵۲/۰	۷۴۴/۰	۹۵۰/۰	۶۰/۰۰	۳۵۹



جدول ۸ و شکل ۹. شاخص حجم کل منابع آب زیرزمینی [۴]

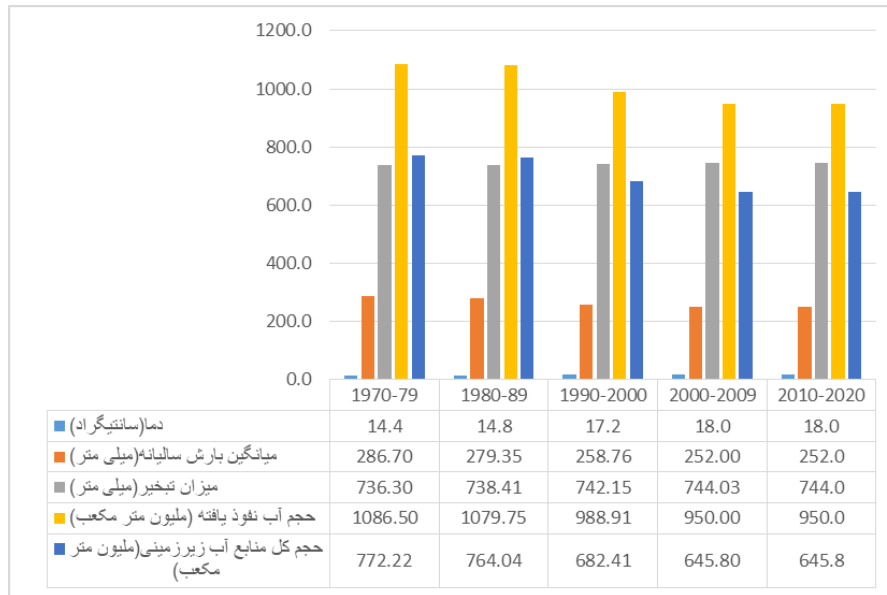
در شکل ۹ و جدول ۸ روند صعودی و نزولی شاخص‌ها در پنجاه سال گذشته نشان داده شده است. بر اساس داده های بدست آمده از شبیه‌سازی شده شاخص حجم آب نفوذیافته، میانگین بارش و حجم کل منابع آب زیرزمینی روند نزولی و شاخص مقدار تبخیر، دما، مقدار برداشت کشور همسایه و حجم آب خروجی روند صعودی داشته‌اند. در شکل‌های بعد نیز حجم کل منابع آب زیرزمینی و حجم آب نفوذیافته نشان داده شده که بیانگر روند نزولی است. نمودار حجم آب خروجی روند صعودی را نمایش می‌دهد (شکل ۱۰).



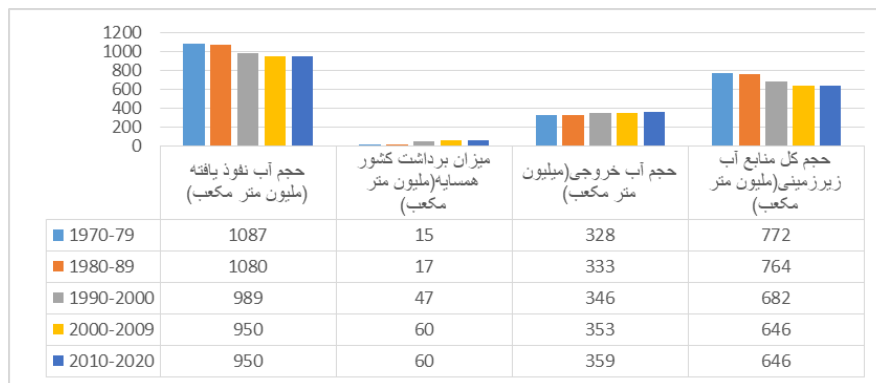
شکل ۱۰. حجم کل منابع آب زیرزمینی (mm^3) [۴]

شکل ۱۱ ریزمؤلفه‌های مقدار آب خروجی را نشان می‌دهد. تخلیه آب از چشمه و رودخانه در چند دهه گذشته تأثیرات اصلی را داشته است. اما متغیر مقدار برداشت کشور همسایه (ترکمنستان) و مقدار برداشت آب از قنات و چاه روند صعودی چشمگیری داشته است. این دو عامل به شدت به عامل انسانی وابسته‌اند و تأثیرات چشمگیری بر حجم کل ذخایر کارستی داشته‌اند.

شکل ۱۲ خط مسیر حجم کل منابع آب زیرزمینی را در پنج دهه گذشته نشان می‌دهد. روند صعودی دما و مقدار تبخیر در کنار روند نزولی حجم کل منابع آب زیرزمینی بیانگر همبستگی معکوس این متغیرهاست.



شکل ۱۱. نمودار میانگین بارش، دما و مقدار تبخیر از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰ [۴]



شکل ۱۲. مقدار تغییرات در مؤلفه‌های اصلی (حجم آب نفوذ یافته، مقدار برداشت کشور همسایه، حجم آب خروجی و حجم کل منابع آب زیرزمینی) [۴]

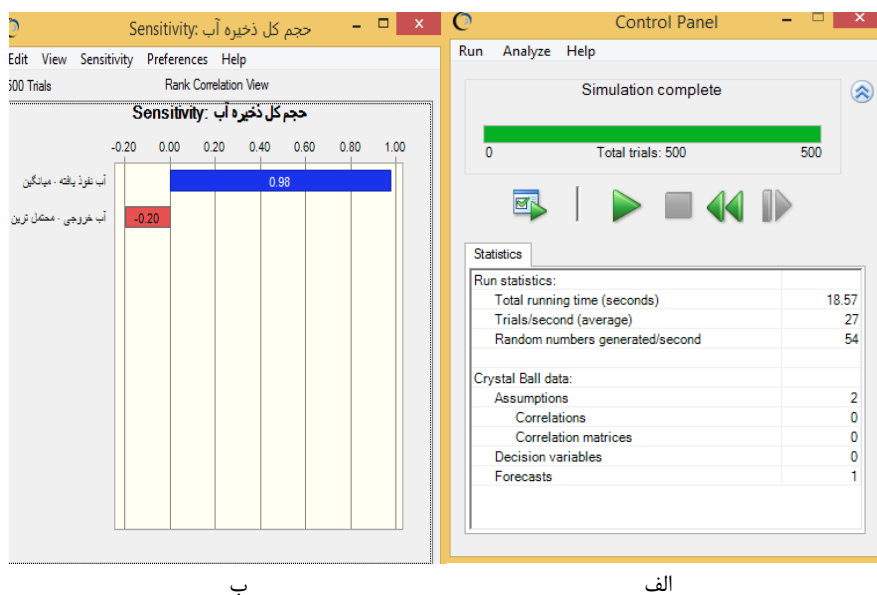
شبیه‌سازی با ۵۰۰ آزمایش و ۱۰۰۰ آزمایش

با توجه به میانگین و انحراف معیار و حداکثر و حداقل و محتمل‌ترین موارد متغیرهای اصلی و نوع توزیع شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفته است. حجم کل آب ذخیره برابر است با اختلاف آب نفوذیافته با آب خروجی. در ابتدای شبیه‌سازی این مقدار ۷۲۶ میلیون متر مکعب است (جدول ۹).

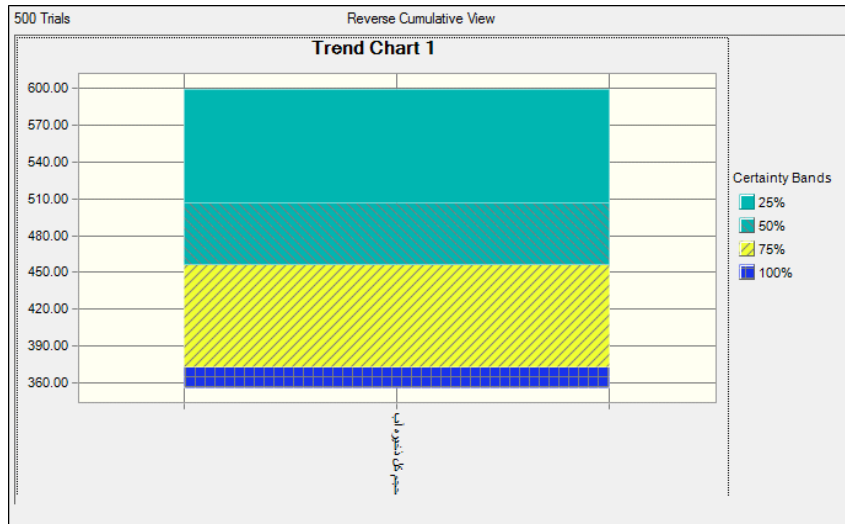
شکل ۱۳. الف) مقدار همبستگی میان آب نفوذیافته و آب خروجی با حجم کل ذخیره آب. بین آب نفوذیافته و حجم کل ذخیره آب همبستگی قوی برقرار است. این رقم حدود ۰/۹۸ است. بین آب خروجی و حجم کل ذخیره آب همبستگی معکوس وجود دارد. مقدار همبستگی معکوس ۰/۲ است؛ ب) ۵۰۰ آزمایش شبیه‌سازی.

جدول ۹. حجم کل آب ذخیره

حداکثر	محتمل‌ترین	حداقل	انحراف معیار	میانگین
۳۵۹	۹۴۴	۳۲۸	۶۸	۱۰۷۳
۷۲۶		آب خروجی	آب نفوذیافته	
حجم کل ذخیره آب				

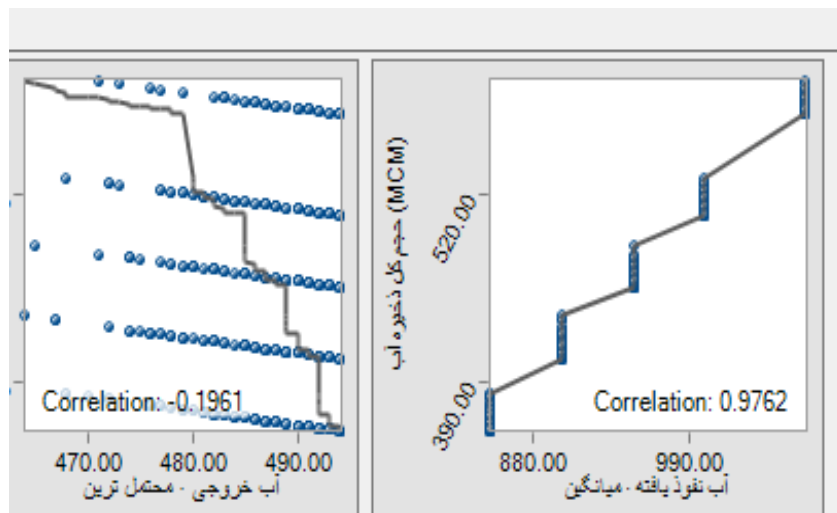


شکل ۱۳. مقدار همبستگی میان آب نفوذیافته و آب خروجی با حجم کل ذخیره آب



شکل ۱۴. احتمال دستیابی به ۳۶۰ میلیون متر مکعب آب

شکل ۱۴ احتمال دستیابی به مقدار ۳۶۰ میلیون متر مکعب آب را با احتمال ۱۰۰ درصد، دستیابی به مقدار ۳۴۰ تا ۴۶۰ میلیون متر مکعب را با احتمال ۷۵ درصد و دستیابی به ۴۶۰ تا ۵۰۰ میلیون متر مکعب را با احتمال ۵۰ درصد نشان می‌دهد (شکل ۱۵).



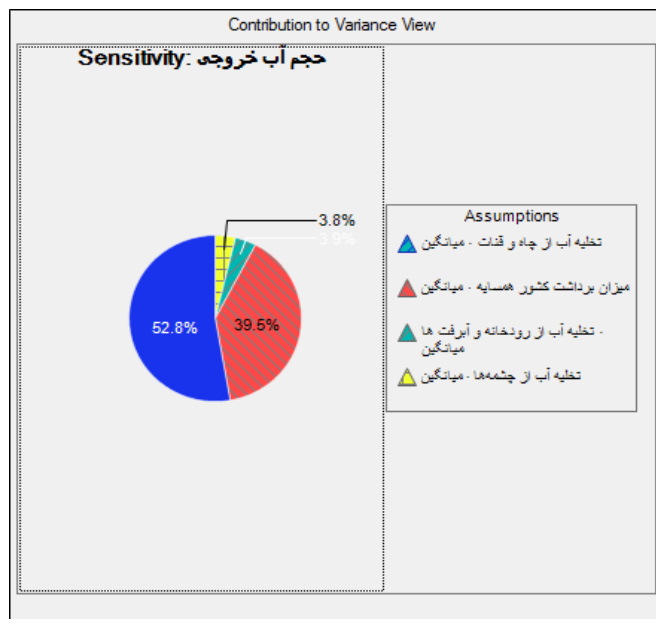
شکل ۱۵. پراکندگی زیاد همبستگی میان متغیرهای آب نفوذ یافته و آب خروجی با حجم کل ذخیره آب

شبیه‌سازی حجم آب خروجی با ۵۰۰ آزمایش

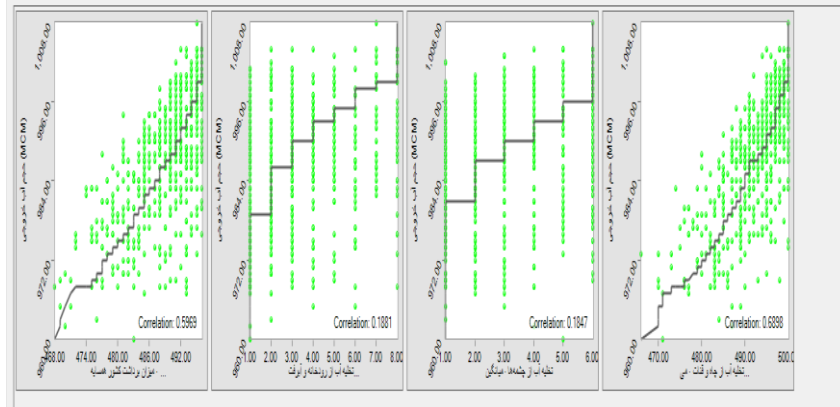
متغیر حجم آب خروجی خود شامل چهار ریزمؤلفه (تخلیه آب از چاه و قنات، مقدار برداشت کشور همسایه، تخلیه آب از رودخانه و آبرفت‌ها و تخلیه آب از چشمه‌ها) است. در شبیه‌سازی ۵۰۰ آزمایش مقدار ریزمؤلفه‌ها نسبت به وضعیت جاری تغییر چشمگیری خواهد داشت. دو مؤلفه تخلیه آب از چاه و قنات و مقدار برداشت کشور همسایه به ترتیب ۵۲/۸ و ۳۹/۵ درصد از کل حجم خروجی آب را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۶).

شکل نقطه‌ای ریزمؤلفه‌های آب خروجی مقدار همبستگی ریزمؤلفه‌های حجم آب خروجی را نمایش می‌دهد. دو ریزمؤلفه تخلیه آب از چاه و قنات و برداشت آب از کشور همسایه به ترتیب به مقدار ۰/۶۸ و ۰/۵۸ درصد همبستگی مثبت با حجم آب خروجی را نشان داده‌اند (شکل ۱۷).

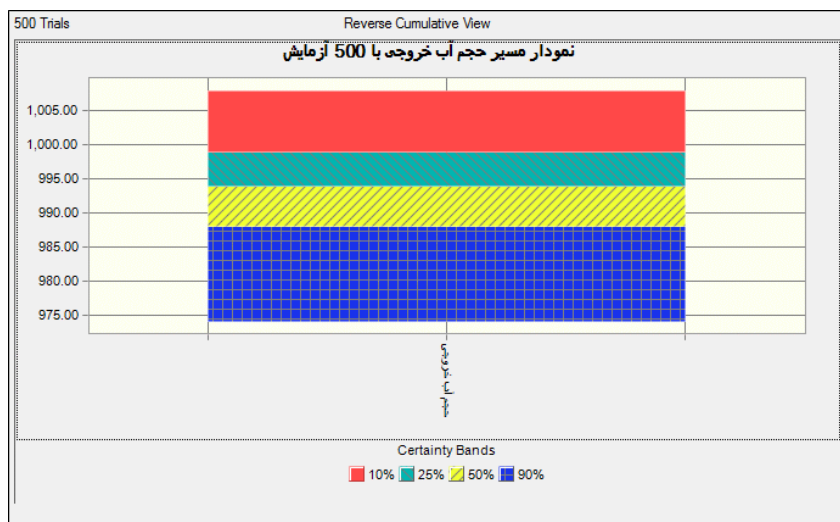
شکل ۱۷ ترند حجم آب خروجی را نشان می‌دهد. با توجه شکل ۱۸ ترند یا مسیر مقدار حجم خروجی مقدار ۹۷۵ تا ۹۸۷ روی باند اطمینان ۹۰ درصد قرار دارد. مقدار خروجی ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۸ روی باند اطمینان ۱۰ درصد جای دارد.



شکل ۱۶. تحلیل حساسیت حجم آب خروجی و ریزمؤلفه‌های آن



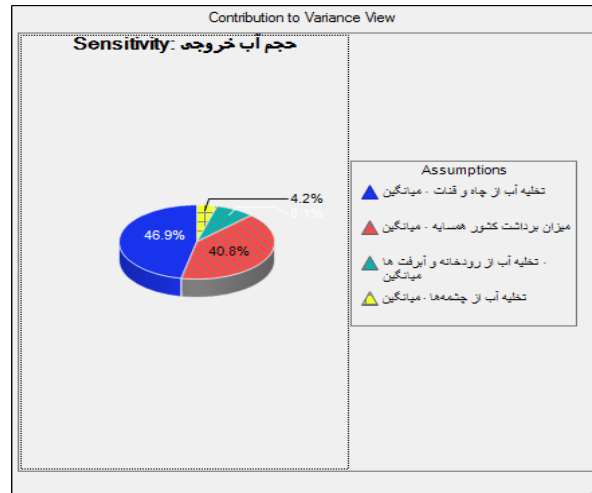
شکل ۱۷. پراکندگی ریزمؤلفه‌های آب خروجی



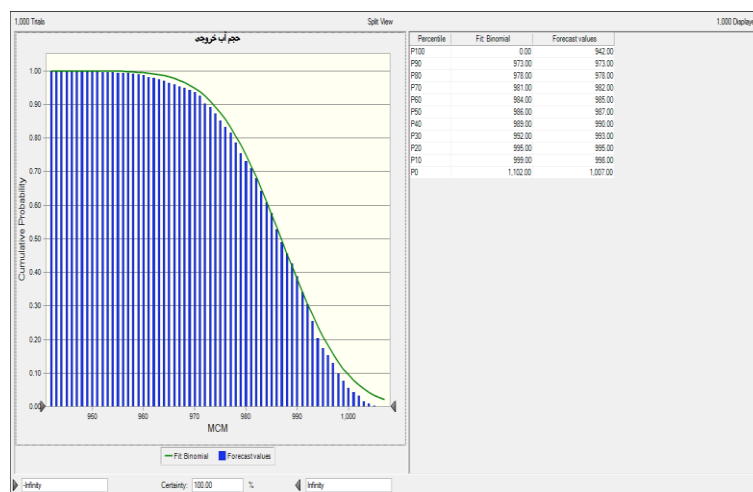
شکل ۱۸. ترند حجم آب خروجی

شبیه‌سازی حجم آب خروجی با ۱۰۰۰ آزمایش

در آزمایش با ۱۰۰۰ شبیه‌سازی تغییرات در مؤلفه‌های آب خروجی به دست آمده متفاوت با ۵۰۰ شبیه‌سازی شد. تخلیه آب از چشمه و رودخانه و آبرفت‌ها افزایش داشت (شکل ۱۹). همچنین مؤلفه مقدار برداشت کشور همسایه نیز افزایش یافت، اما ریزمؤلفه تخلیه آب از چاه و قنات حدود ۴۷ درصد از کل حجم آب خروجی را به خود اختصاص داد.



شکل ۱۹. تحلیل حساسیت ریزمؤلفه‌ها



شکل ۲۰. احتمال تجمعی حجم خروجی آب با ۱۰۰۰ آزمایش شبیه‌سازی

شکل بالا احتمال دستیابی به مقدار آب خروجی را نشان می‌دهد. احتمال دستیابی به مقدار حجم خروجی ۱۱۰۲ میلیون مترمکعب برابر با صفر و احتمال دستیابی به ۹۹۹ میلیون متر مکعب حدود ۱۰ درصد است. احتمال دستیابی به ۹۷۳ و ۹۴۲ میلیون متر مکعب به ترتیب ۹۰ و ۱۰۰ درصد است.

نتایج

محاسبات ارائه شده حاکی از حجم به نسبت زیاد ذخیره آب در سازندهای کارستی محدوده مطالعاتی کلات است. شواهد نشان می دهد که این محدوده که در دو حوضه آبگیر درجه دوم قره قوم و اترک قرار می گیرد، پتانسیل بسیار زیادی برای استحصال و استخراج آب کارست دارد. بنابراین می توان از منابع آب کارستی تجدیدپذیر در این محدوده بهره برد.

براساس محاسبات و آمارهای به دست آمده از سازمان های زمین شناسی و هواشناسی کشور و همچنین برداشت های آب منطقه ای مقدار تغذیه از بارندگی در کل سازندهای کارستی محدوده مطالعاتی کلات ۱۰۱۵ میلیون متر مکعب است. تخلیه از طریق چشمه، چاه، قنات، آبرفت و رودخانه نیز در این سازندها ۳۰۶/۹۵ میلیون متر مکعب است. براساس اطلاعات شبیه سازی شده شاخص برداشت آب در کشور ترکمنستان، در پنجاه سال گذشته رشد روزافزونی داشته است، با توجه به قانون ممنوعیت برداشت آب از آبخوان ها در داخل کشور، این نگرانی وجود دارد که منابع مشترک آبی توسط کشور همسایه استفاده شود. برای اصلاح قانون و نیز برداشت منطقی دو کشور از آبخوان مشترک، تدوین قانون مشترک و تعیین حبابه در سطح بین المللی ضرورت دارد.

منابع

- [۱]. بهنیافر، ابوالفضل؛ و قنبرزاده، هادی (۱۳۹۵). ژئومورفولوژی کارست، مشهد: نگاران سبز.
- [۲]. بهنیافر، ابوالفضل؛ سپهر، عادل؛ و منصوری، محمدرضا (۱۳۹۱). «ژئومورفوتوریسم کوهستان کلات: بررسی همبستگی میان چشمه‌ها و سازندهای زمین شناسی»، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، شماره ۴، ص ۹۰-۷۹.
- [۳]. جعفرزاده، احمد؛ خاشعی سیوکی، عباس؛ و شهیدی، علی (۱۳۹۸). «بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل مفهومی بیلان (مطالعه موردی: دشت بیرجند)»، *مهندسی منابع آب*، سال ۱۱، ص ۱۶-۱.
- [۴]. داده‌های مصرف آب منطقه‌ای خراسان شمالی، وزارت نیرو، ۱۳۹۹.
- [۵]. داده‌های سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۹۵) نقشه زمین شناسی کلات..
- [۶]. داده‌های سازمان هواشناسی کشور (۱۴۰۰-۱۳۴۰) داده‌های اقلیمی خراسان و خراسان شمالی.
- [۷]. رضائی عارفی، محسن؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ بهنیافر، ابوالفضل؛ و جوانبخت، محمد (۱۳۹۸). «محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با استفاده از تکنیک‌های تجربی و آزمایشگاهی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران»، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، شماره ۳، ص ۷۹-۶۴.
- [۸]. صفاری، امیر؛ کیانی، طیبه؛ و زنگنه‌تبار، ساسان (۱۳۹۸). «بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی»، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، سال ۱۹، شماره ۵۵، ص ۳۶-۲۳.
- [۹]. طاهری، کمال (۱۳۸۴). گزارش عملکرد سالیانه دفتر مطالعه و تحقیقات کارست غرب کشور، شرکت آب منطقه کرمانشاه، معاونت مطالعه پایه منابع آب، ص ۴۵-۳۰.
- [۱۰]. کاویانی‌راد، مراد؛ متقی، افشین؛ زرقانی، سیده‌ادی؛ و صدرانیا، حسن (۱۳۹۸). «شناسایی و تحلیل متغیرها و شاخص‌های مؤثر در اهمیت راهبردی هرپود برای ایران با رویکرد تحلیل تأثیرات متقابل». *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، سال ۱۹، شماره ۵۵، ص ۲۲-۱.
- [۱۱]. کیانی، طیبه؛ و فتح‌الله‌زاده، محمد (۱۳۹۷). «پهنه‌بندی و شناسایی آبخوان‌های کارستی در منطقه اشتران‌کوه»، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، شماره ۱۹، شماره ۵۲، ص ۵۵-۲۲.

- [۱۲]. کیانی، طیبه؛ احمدآبادی، علی؛ و غفورپور عنبران، پرستو (۱۳۹۵). «تحلیل اثرات عملیات آبخیزداری بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز عنبران چای با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT»، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۱، شماره ۲، ص ۳۵-۵۵.
- [۱۳]. کیانی، واحد، اسماعیلی، عباس، علیجانی، فرشاد؛ و کیانی، سارا (۱۴۰۰). هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی چشمه‌های ملوسان و باروداب (شهرستان نهاوند) خروجی از آهک‌های کربونیفر-پرمین (معرف قدیمی‌ترین مخازن کارسنی ناحیه سنندج-سیرجان در ایران)، تحقیقات منابع آب در ایران، سال ۱۷، شماره ۲، ص ۸۲-۹۹.
- [۱۴]. گزارش زمین‌شناسی مهندسی مکان‌یابی مناطق مستعد کارستی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۹۷).
- [۱۵]. گزارش هیدروژئولوژی مناطق مستعد کارستی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۷).
- [۱۶]. گزارش ایزوتوپی مناطق مستعد کارستی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۷).

- [17]. De Waele, J.; Plan, L.; & Audra, P. (2009). "Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: an introduction", *Geomorphology*, 106.
- [18]. Documentation - Version (2009). "Multi-variable sensitivity and identifiability analysis for a complex environmental model in view of integrated water quantity and water quality modeling", *Water Sci. Technol.*, 65(3), pp: 539-549.
- [19]. Elfghih. O. B.; & Elgheriani. M. Y. (2013). "Dissolution Cavities of Karren type in the Algal Limestone Member of Al Bayda Formation, Sector (3), Wadi Az Zad, Al Jabal Al Akhdar, NE Libya". *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, p: 45- 52.
- [20]. Fatemeh, B.; Gholam Hossein, K.; Rahim, B.; Jasper, G.; Hans, E.; & Hadi, J. (2021). "Geochemical and multi-isotopes ($\delta^{18}O$, δ^2H , $\delta^{13}C$, $3H$ and $\delta^{37}Cl$) evidences to karst development and flow directions in transboundary aquifer", Northeast of Iran, 56, 72074, Tübingen, Germany.
- [21]. Ford, D.; & Williams, P.D. (2013). Karst hydrogeology and geomorphology 348: 452-463.
- [22]. John Wiley & Sons, (2007). Douglas Hubbard "How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business", p 46.
- [23]. Hartmann, A.; & Baker, A. (2017). "Modelling karst vadose zone hydrology and its relevance for paleoclimate reconstruction", *Earth-Sciences Rev.*, 172, 178-192, doi:10.1016/j.earscirev.2017.08.001, 2017.
- [24]. Milanovic, P.T. (2002). "The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions", *Episodes*, 25(1).
- [25]. Perrin, J. (2003). A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers, PhD thesis presented

to the Faculty of Sciences of the University of Neuchâtel to satisfy the requirements of the Degree of Doctor of Philosophy in Science.

- [26]. Waele, J. D.; Plan, L.; & Audra, P. (2009) Recent Developments in Surface and Subsurface Karst Geomorphology: An Introduction, *Geomorphology*, 106 (1-2), pp. 1-8.
- [27]. Williams, P. W. (2008). "The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review", *Int. J. Speleol.*,37, pp: 1-10, doi:10.5038/1827-806X.37.1.1.,