

ارزیابی شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب آبی و سبز در سه حوضه سد کرج، لتیان و ماملو توسط مدل SWAT

سمانه پارسا^۱ و مصطفی نادری^{۲*}

چکیده

در این پژوهش، شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب آبی و سبز در حوضه سدهای کرج، لتیان و ماملو (استان‌های تهران و البرز) بر اساس نسبت آب مصرفی (ردپای آب) به آب موجود در هر حوضه تعیین شده است. منابع آب آبی و سبز با مدل SWAT که برای هر سه حوضه، طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۳ و اسنچی و صحت‌سنجی شده است، تعیین شد. نتایج دوره اسنچی (۲۰۰۷-۱۹۹۵) و صحت‌سنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۸) نشان داد که مدل SWAT به خوبی می‌تواند دبی‌های روزانه را در هر هشت ایستگاه انتخابی شبیه‌سازی کند. نتایج هم‌چنان نشان داد که شاخص متوسط سالانه کمبود و آسیب‌پذیری آب سبز در کل منطقه برابر ۰/۳۸۸ و ۰/۶۶ بوده؛ در حالی که شاخص متوسط سالانه کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی برابر ۰/۶۵ و ۱/۰۴ می‌باشد. حوضه سد کرج دارای کمترین شاخص کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی و حوضه سد ماملو دارای بیشترین کمبود و آسیب‌پذیری است؛ ولی حوضه سد کرج از لحاظ کمبود و آسیب‌پذیری آب سبز بالاترین درصد و حوضه سد ماملو کمترین مقادیر در منطقه مورد مطالعه را داشت. تعیین شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب (آب آبی و سبز) در هر حوضه می‌تواند پهنه بحرانی (مناطق دارای تنش آب) را مشخص کند و از آن برای مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب استفاده شود. برای مثال، تخصیص و تبادل آب آبی بین زیرحوضه‌ها می‌تواند موجب کاهش تنش آب در پهنه بحرانی شود.

واژه‌های کلیدی: استان البرز و تهران، سد کرج، لتیان و ماملو، شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری، منابع آب آبی و سبز، مدل SWAT.

ارجاع: پارسا س. و نادری م. ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب آبی و سبز در سه حوضه سد کرج، لتیان و ماملو توسط مدل SWAT. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۶۵-۷۴.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان.
۲- استادیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان.

* نویسنده مسئول: m.naderi@iasbs.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵

مقدمه

بررسی کمبود و آسیب‌پذیری آب شیرین (آبی و سبز) برای مدیریت پایدار منابع آب بسیار حیاتی است (لی و همکاران، ۲۰۱۷). آب آبی، آب شیرینی است که در آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا سایر آب‌های سطحی جاری است و مستقیماً برای مصرف انسان استفاده می‌شود (هوکسترا و همکاران، ۲۰۱۱). آب سبز بخشی از آب شیرین است که در لایه‌های خاک غیراشباع و پوشش گیاهی ذخیره می‌شود (ویتیل و میشر، ۲۰۱۶). ششمین هدف توسعه پایدار (SDG6) در سال ۲۰۳۰ که سران کشورها اتخاذ کردند، مربوط به کمبود آب (هدف ۶:۴) است که با شاخص استرس آب ۶:۴:۲ پایش می‌شود (وانهام و همکاران، ۲۰۱۸). شاخص ۶:۴:۲ نسبت آب شیرین مصرفی به آب شیرین در دسترس (کل منابع آب‌های تجدیدپذیر منهای آب مورد نیاز برای اکولوژی) است که توسط کلیه بخش‌ها در منطقه معین مصرف می‌شود. بسیاری از شاخص‌ها از دهه ۱۹۸۰ برای ارزیابی میزان تنش آب در سراسر جهان پیشنهاد شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص فالکنمارک تنها حجم آب آبی موجود در واحد جمعیت را برای یک ناحیه مشخص و بدون در نظر گرفتن نیاز آبی محیط محاسبه می‌کند. نسبت بحرانی که بر اساس نسبت مصرف به آب قابل دسترس تعریف می‌شود، مقدار آب مصرف شده را (مصرف یا برداشت) در ارتباط با منابع آب تجدیدپذیر موجود تعیین می‌کند (فالکنمارک و همکاران، ۲۰۰۶). شاخص مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI) شاخص کمبودهای فیزیکی و اقتصادی آب را با یکدیگر در نظر و بر اساس قسمتی از منابع آب شیرین موجود که مورد استفاده انسان و صنعت قرار می‌گیرد، تعیین می‌کند (سکلر و همکاران، ۱۹۹۸). شاخص فقر آب، مقدار آب موجود را در ارتباط با میزان دسترسی افراد برای برداشت و همچنین سطح رفاه جامعه تعیین می‌کند (سالیوان، ۲۰۰۱). تمام شاخص‌های یاد شده، کمبود آب سبز را ارزیابی نمی‌کنند. راک استروم و همکاران (۲۰۰۹) اولین شاخص برای ارزیابی کمبود آب سبز و آبی در سطح جهان را پیشنهاد کردند. بعد، گرتن و همکاران (۲۰۱۱) به‌طور محلی از این شاخص برای نشان دادن تغییرات مکانی استفاده کردند. شاخص‌هایی که کمبود و آسیب‌پذیری آب را بررسی می‌کند، بر اساس نسبت آب مصرفی به آب

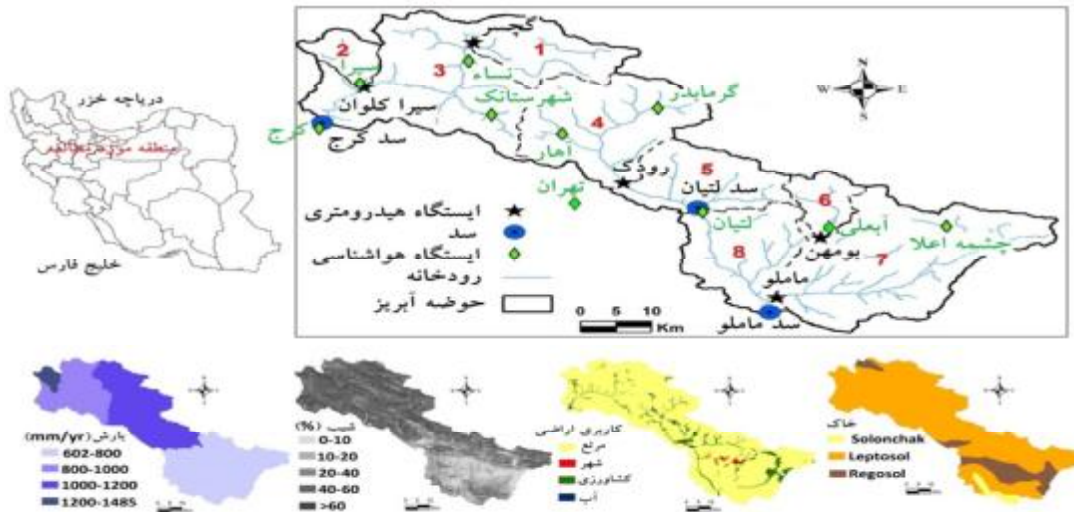
موجود تعریف می‌شود (کونینا و همکاران، ۲۰۱۳)؛ درحالی که نیاز آبی محیط رودخانه در نظر گرفته نمی‌شود. زنگ و همکاران (۲۰۱۳) و لیو و همکاران (۲۰۱۷) یک شاخص جامع کمبود آب آبی را ارائه دادند که با استفاده از کمیت و کیفیت آب و در نظر گرفتن نیاز آبی محیط در نظر گرفته می‌شود. شاخص کمبود آب برپایه ردپای آب که هوکسترا و همکاران (۲۰۱۱) ارائه دادند، نسبت مصرف آب (مقدار آب استفاده شده برای تولید کالا و خدمات انسانی) به منابع آب در دسترس است. ارزیابی مصرف آب، وضعیت تقاضا و تأمین آب را در یک منطقه معین و به سرعت پهنه بحرانی (یعنی مناطق دارای کمبود آب) را برجسته می‌کند. اخیراً ویتیل و میشر (۲۰۱۶) به‌طور جداگانه کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی و آب سبز را بر اساس مفهوم ردپای آب و با در نظر گرفتن نیاز آبی اکولوژی رودخانه ارزیابی کردند. با وجود این شاخص‌ها می‌توان کمبود و آسیب‌پذیری آب (آبی و سبز) را بررسی کرد. در این مطالعه، شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی و آب سبز، بر اساس مفهوم ردپای آب در حوضه سدهای کرج، لتیان و ماملو با مدل SWAT مطالعه و پهنه بحرانی مشخص شده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (با مساحت ۲۶۱۸ کیلومتر مربع) در استان‌های تهران و البرز واقع شده است (شکل ۱). سه سد بزرگ کرج، لتیان و ماملو در منطقه مورد مطالعه برای تأمین نیاز آبیاری و تقاضای آب شهری و صنعتی برای کلان شهر تهران و شهرهای واقع در استان احداث شده است. مساحت حوضه‌های سد کرج، لتیان و ماملو به ترتیب ۸۴۵، ۷۰۵ و ۱۰۶۸ کیلومتر مربع است. جریان روزانه رودخانه در ۸ ایستگاه هیدرومتری در طی دوره ۲۰۱۳-۱۹۹۱ اندازه‌گیری شده است (شکل ۱). ایستگاه‌های هیدرومتری شامل گچسر، سیرا کلوان، سد کرج، رودک، سد لتیان، بومهن، ماملو و سد ماملو هستند که متوسط دبی سالانه در آن‌ها به ترتیب برابر ۴/۱، ۱۷/۳، ۱۲/۵، ۷/۴، ۱۲/۴۶، ۰/۶۲، ۲/۷ و ۸/۹۵ مترمکعب در ثانیه است. داده‌های بارندگی و دمای روزانه از ده ایستگاه هواشناسی در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده شده است. میانگین بارندگی سالانه در مناطق بالادست بیشتر است و با کاهش ارتفاع کاهش

می‌یابد. حداقل، حداکثر و متوسط بارندگی سالیانه در

دوره مشاهداتی ۲۰۱۳-۱۹۹۵ برابر ۶۰۲، ۱۴۸۵ و ۹۲۲



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی بارش، طبقه‌بندی شیب، کاربری اراضی و پوشش خاک

است (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵؛ نادری، ۲۰۲۰؛ نادری و ساعت‌ساز، ۲۰۲۰). لایه های خاک شامل Leptosol (۸۴ درصد)، Regosol (۱۲/۸ درصد) و Solonchak (۳/۲ درصد) است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷). پارامترهای محلی خاک (جدول ۱) بر اساس نوع آن شامل درصد شن، رس، ماسه، گراول، بافت خاک، مقدار آب قابل دسترس (AWC)، چگالی ظاهری (bulk density) و هدایت هیدرولیکی (K) به تفکیک دو لایه ۰-۳۰ و ۳۰-۱۰۰ سانتی‌متری است (فائو، ۲۰۰۹).

۳- اطلاعات پوشش گیاهی با استفاده از نقشه رقومی تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۷) تهیه شده است (شکل ۱). بر این اساس، منطقه از چهار پوشش گیاهی تشکیل شده که شامل مرتع (۹۲/۷ درصد)، کشاورزی (۶/۴ درصد)، شهر (۰/۶ درصد) و آب (۰/۳ درصد) است. بنابراین بخش عمده پوشش گیاهی طبیعی است. در نهایت کل حوضه بر اساس نوع خاک، نوع پوشش گیاهی و درصد شیب به ۲۰۳ واحد هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Units) تقسیم شده است.

۴- داده‌های روزانه دما و بارش مربوط به ده ایستگاه هواشناسی (شکل ۱) برای اعمال تغییرات مکانی بارش در منطقه مورد مطالعه به SWAT داده شده است (سازمان هواشناسی ایران، ۱۳۹۷؛ شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷). جهت اعمال افزایش بارش با ارتفاع، تغییرات

مواد و روش‌ها

توسعه مدل هیدرولوژیکی

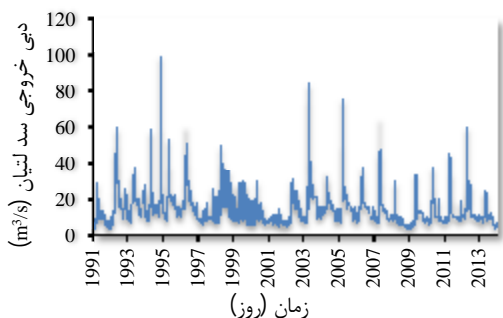
از مدل ارزیابی خاک و آب (Soil and Water Assessment Tool) برای تعیین کمیت منابع آب آبی و آب سبز در منطقه مورد مطالعه استفاده و در این مطالعه، مدل SWAT با استفاده از نرم‌افزار ArcSWAT 2012 برای منطقه تهیه شده است. برای تهیه مدل برای منطقه مورد مطالعه، از داده‌های زیر استفاده شده است: ۱- داده‌های رقومی ارتفاع (DEM) Digital elevation model با تفکیک مکانی ۳۰ متر که از سازمان نقشه‌برداری آمریکا (USGS) تهیه شده است. ابتدا حوضه با استفاده از این داده‌ها، به هشت زیرحوضه بر اساس تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری (شکل ۱) و سپس هر زیرحوضه، به پنج محدوده شیب ۰-۱۰٪، ۱۰-۲۰٪، ۲۰-۴۰٪، ۴۰-۶۰٪ و بیشتر از ۶۰٪ (شکل ۱) طبقه‌بندی شده است.

۲- اطلاعات لایه‌های خاک: این اطلاعات با استفاده از نقشه رقومی تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۷) و تلفیق آن با پارامترهای خاک مربوط به نقشه جهانی ارائه شده توسط سازمان خواربار جهانی (فائو، ۲۰۰۹) به دست آمده است (جدول ۱ و شکل ۱). پژوهشگران زیادی از پارامترهای خاک ارائه شده توسط فائو (۲۰۰۹) برای تهیه مدل SWAT در یک منطقه مشخص استفاده کرده‌اند و نتایج خوبی نیز حاصل شده

بارندگی با ارتفاع در منطقه $(\frac{mm}{km}$ ۳۵۶ میلی‌متر) که توسط داده‌های موجود رسم شده است (شکل ۲)، برای ده باند ارتفاعی تعریف شده در هر زیرحوضه در مدل گنجانده شد.

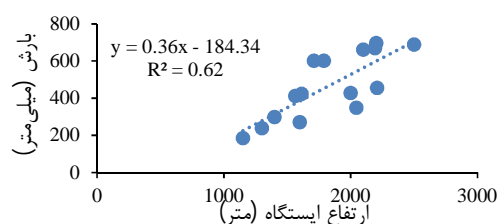
جدول ۱- پارامترهای محلی خاک برای منطقه مورد مطالعه بر اساس نوع خاک (فائو، ۲۰۰۹)

نوع خاک	ضخامت (cm)	آب قابل دسترس (mm/cm soil)	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد ریز	بافت خاک	چگالی ظاهری (g/cm ³)	درصد گرآول	هدایت هیدرومتری (mm/hr)
Leptosol	۲۰-۳۰	۱۵۰	۴۴	۳۴	۲۲	Loam	۱/۳۲	۱۵/۱	۲۵
	۱۰۰-۳۰	۱۵۰	۴۰	۳۳	۲۷	Clay Loam	۱/۴۵	۱۰/۵	۲۵
Solonchak	۳۰-۳۰	۱۵۰	۳۳	۳۴	۳۳	Loam Clay	۱/۳۷	۱۴	۱۰/۴
	۱۰۰-۳۰	۱۵۰	۳۰	۳۵	۳۵	Loam Clay	۱/۳۶	۲۱/۵	۱۰/۴
Regosol	۳۰-۳۰	۱۲۵	۳۲	۴۱	۲۷	Loam Clay	۱/۳	۱۲/۷	۱۵
	۱۰۰-۳۰	۱۲۵	۳۲	۴۰	۲۸	Loam Silt	۱/۳۶	۱۴	۱۵



شکل ۳- دبی خروجی روزانه سد لتیان (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷)

۷- از دبی روزانه اندازه‌گیری شده در هشت ایستگاه هیدرومتری تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع ایران (۱۳۹۷)، استفاده شد. از اندازه‌گیری دبی روزانه رودخانه در هشت ایستگاه هیدرومتری (شکل ۱) در دوره مشاهداتی ۲۰۱۳-۱۹۹۱ برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. داده‌های چهار ساله ابتدای دوره واسنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۱) به‌عنوان دوره‌ی آماده‌سازی (warm up)، داده‌های دوره ۱۳ ساله ۲۰۰۷-۱۹۹۵ برای واسنجی مدل و داده‌های روزانه شش ساله ۲۰۱۳-۲۰۰۸ برای صحت‌سنجی مدل SWAT استفاده شد. از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 برای واسنجی، صحت‌سنجی و بررسی حساسیت مدل استفاده شد. حساسیت پارامتر با استفاده از آزمون t (t-test) و مقادیر P-value بررسی شده که در آن پارامترهای حساس‌تر مقادیر t-test بزرگ‌تر و مقادیر P-value کوچک‌تر دارند (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵). برای بررسی عملکرد SWAT از توابع هدف ضریب تعیین



شکل ۲- تغییرات بارش سالانه نسبت به ارتفاع در ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه مورد مطالعه

برای مدل‌سازی بارش برف، میزان افت دما $(\frac{^{\circ}C}{km}$ ۶/۵-) بر اساس داده‌های دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه در نظر گرفته شد. حداقل و حداکثر میزان بارش برف ماهانه بر اساس مشاهدات طولانی مدت در ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه (تهران و آبدلی) ۱ و ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب سطحی به‌ترتیب با استفاده از روش شماره منحنی (SCS) و روش هارگریوز-سامانی محاسبه شد.

۵- آمار متوسط برداشت ماهانه آب از رودخانه و آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ میلادی) (جدول ۲) به هر زیرحوضه در مدل SWAT داده شد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷). حداقل و حداکثر میزان برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌ترتیب در فصل زمستان و تابستان است.

۶- دبی خروجی روزانه سد لتیان در دوره بهره‌برداری ۲۰۱۳-۱۹۹۱ که توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۷) تهیه شده است، نیز در مدل گنجانده شد. متوسط دبی خروجی در دوره بهره‌برداری حدود ۵/۵ مترمکعب در ثانیه است (شکل ۳).

SOL-BD، بازه ۰/۱ تا ۳۰ برای OV-N، بازه صفر تا ۵۰۰ برای GW-DELAY و REVAP-MN، بازه صفر تا ۵۰۰۰ برای GW-QMN، بازه ۰/۲ تا ۰/۲ برای GW-REVAP و بازه صفر تا ۰/۵ برای RCHRG-DP در نظر گرفته شد (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵؛ نادری، ۲۰۲۰؛ نادری و ساعت‌ساز، ۲۰۲۰).

ارزیابی شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری آب

کمبود و آسیب‌پذیری آب سبز

آب سبز شامل مقدار اولیه آب موجود در خاک (SW_i) در خروجی SWAT که مقدار آب شیرین ذخیره شده در منطقه خاک غیر اشباع است، ردپای آب سبز مقدار تبخیر و تعرق واقعی توسط خاک و محصولات کشاورزی است (وینچل و همکاران، ۲۰۱۳). ویتیل و میسرا (۲۰۱۶) شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری آب سبز را بر اساس مفهوم ردپای آب پیشنهاد کردند. کمبود آب سبز، نسبت ردپای آب سبز به آب در دسترس، و آسیب‌پذیری آن نسبت رد پای آب سبز به آب در دسترس در وضعیت خشکسالی است که مقدار آن برابر مقدار آبی با فراوانی تجمعی ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. بدین معنی که در ۷۰ درصد زمان‌ها، آب موجود بیشتر و در ۳۰ درصد زمان‌ها، آب موجود کمتر از این مقدار است. کمبود و آسیب‌پذیری مقادیر بالاتر از ۱ نشان‌دهنده منطقه تحت تنش آبی است (ویتیل و میسرا، ۲۰۱۶). شاخص‌های کمبود (GW_s) و آسیب‌پذیری (GW_v) آب سبز به صورت زیر تعریف می‌شوند (ویتیل و میسرا، ۲۰۱۶):

$$GW_s(i,t) = GW_f(i,t) / GW_a(i,t) \quad (3)$$

$$GW_v(i,t) = GW_f(i,t) / GW_{a(30\%)}(i,t) \quad (4)$$

در معادلات بالا GW_f مقدار برداشت از آب سبز یا همان تبخیر و تعرق واقعی گیاه، GW_a مقدار آب سبز در دسترس برای رشد گیاه (رطوبت خاک) و $GW_{a(30\%)}$ مقدار آب قابل دسترس با فراوانی ۳۰ درصد در ماه t و زیرحوضه A است.

کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی

آب آبی مجموع جریان رودخانه و ذخیره آب‌های زیرزمینی است. در این مطالعه آب آبی به‌عنوان مقدار آب موجود به‌عنوان جریان رودخانه در نظر گرفته شده است. کمبود و آسیب‌پذیری مقادیر بالاتر از ۱ نشانگر پهنه بحرانی (منطقه تحت استرس آب) است. روش استاندارد

(R^2) و نش-ساتکلیف (NS) استفاده شد (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵). دبی جریان پایه در هشت ایستگاه هیدرومتری بر اساس روش جداسازی جریان پایه از جریان کل با استفاده از برنامه PART تعیین شد و سپس برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در الگوریتم SUFI-2 گنجانیده شد (روتج، ۲۰۰۷). برای ارزیابی نتایج برازش مدل از توابع هدف ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش ساتکلیف (NS) استفاده شد که معادلات آن‌ها به شرح زیر است:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i(Q_m - Q_s)^2}{\sum_i(Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

Q_m دبی مشاهداتی، \bar{Q}_m متوسط دبی مشاهداتی، $Q_{m,i}$ دبی مشاهداتی در ماه i ام، Q_s دبی محاسباتی، \bar{Q}_s متوسط دبی محاسباتی در طول دوره شبیه‌سازی و $Q_{s,i}$ دبی محاسباتی در ماه i ام است. کلیه واحدها بر حسب مترمکعب در ثانیه است. هرچه مقدار توابع بالا نزدیک به یک باشد، نشان‌دهنده این است که نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی نزدیک به یکدیگرند و نتایج مطلوب‌تر است. بهترین و بدترین مقدار ضریب تبیین به ترتیب برابر ۱ و ۰ است. برای ضریب نش ساتکلیف نیز مقادیر نزدیک به ۱ نشان دهنده اعتبار بیشتر و خطای کمتر است.

پس از اعمال داده‌های ورودی مورد نیاز به مدل بر اساس اطلاعات محلی، چهارده پارامتر مدل برای واسنجی استفاده شد که شامل شماره منحنی ۲ (CN2)، هدایت هیدرولیک خاک (SOL-K)، میانگین طول شیب (HRU-SLSUBBSN) و درجه شیب (HRU_SLP)، چگالی ظاهری میزان آب در دسترس خاک (SOL-AWC)، چگالی ظاهری (SOL-BD)، ضریب زبری در معادله مانینگ (OV-N)، تأخیر آب‌های زیرزمینی در پیوستن به جریان پایه رودخانه (GW-DELAY)، حداقل عمق آب مورد نیاز در آبخوان برای ایجاد جریان پایه (GW-QMN)، ضریب آلفا دبی پایه (ALPHA-BF)، ضریب تبخیر مجدد آب‌های زیرزمینی (GW-REVAP)، حداقل عمق آب زیرزمینی برای تبخیر (REVAP-MN)، ضریب جبران تبخیر خاک (ESCO) و مقدار نفوذ آب به آبخوان عمیق (RCHRG-DP) در مدل SWAT است. بازه تغییرات ۲۰ درصدی برای واسنجی CN2 و SOL-K، بازه تغییرات ۱۰-۱۵۰ برای SLSUBBSN، بازه صفر تا ۱ برای HRU_SLP، SOL-AWC، ALPHA-BF و ESCO، بازه ۰/۹ تا ۲/۵ برای

$$EFR_{(i,t)} = 0.8 Q_{mean} \quad (۸)$$

در معادلات بالا Q_{mean} متوسط دراز مدت دبی رودخانه، BW_f مقدار برداشت آب سطحی، BW_a مقدار آب قابل دسترس برای مصارف انسانی، $BW_{a(30\%)}$ مقدار آب قابل دسترس با فراوانی ۳۰ درصد، EFR دبی مورد نیاز برای اکولوژی (Environment Flow Requirement) و Q دبی رودخانه در ماه t و زیرحوضه i است.

اجازه می‌دهد تا ۲۰ درصد جریان رودخانه مصرف شود (آب در دسترس) و ۸۰ درصد برای حفظ محیط زیست آن باقی بماند. شاخص کمبود (BW_s) و آسیب‌پذیری (BW_v) برای آب آبی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود (ویتیل و میسرا، ۲۰۱۶):

$$BW_{s(i,t)} = BW_{f(i,t)} / BW_{a(i,t)} \quad (۵)$$

$$BW_{v(i,t)} = BW_{f(i,t)} / BW_{a(30\%)(i,t)} \quad (۶)$$

$$BW_{a(i,t)} = Q_{(i,t)} - EFR_{(i,t)} \quad (۷)$$

جدول ۲- میزان برداشت ماهانه از آب‌های زیرزمینی و رودخانه در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰ میلادی) در منطقه مورد مطالعه

برداشت از آب رودخانه (مترمکعب بر ثانیه)												
زیرحوضه	ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
حوضه ۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴
حوضه ۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۳۵۸	۰/۳۵۸	۰/۳۵۸	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷
حوضه ۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۹۳۲	۰/۹۳۲	۰/۹۳۲	۲/۳۰۴	۲/۳۰۴	۲/۳۰۴	۲/۳۰۴	۲/۳۰۴	۲/۳۰۴
حوضه ۴	.	.	.	۱/۰۲۸	۱/۰۲۸	۱/۰۲۸	۳/۵۹۹	۳/۵۹۹	۳/۵۹۹	۳/۵۹۹	۳/۵۹۹	۳/۵۹۹
حوضه ۵	.	.	.	۰/۸۸۲	۰/۸۸۲	۰/۸۸۲	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲
حوضه ۶	.	.	.	۰/۱۶۳	۰/۱۶۳	۰/۱۶۳	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶
حوضه ۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۱/۲۴۱	۱/۲۴۱	۱/۲۴۱	۱/۱۷۹	۱/۱۷۹	۱/۱۷۹	۱/۱۷۹	۱/۱۷۹	۱/۱۷۹
حوضه ۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۱۶۸	۰/۱۶۸	۰/۱۶۸	۰/۳۳۲	۰/۳۳۲	۰/۳۳۲	۰/۳۳۲	۰/۳۳۲	۰/۳۳۲
زیرحوضه	ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
حوضه ۱	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
حوضه ۲	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
حوضه ۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
حوضه ۴	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
حوضه ۵	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
حوضه ۶	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
حوضه ۷	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۷۶۹	۰/۷۶۹	۰/۷۶۹	۱/۱۸۲	۱/۱۸۲	۱/۱۸۲	۱/۱۸۲	۱/۱۸۲	۱/۱۸۲
حوضه ۸	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

نتایج و بحث

عملکرد مدل SWAT

R-Factor به ترتیب بین ۰/۷۶-۰/۶۲ و ۰/۵۸-۰/۴۸ تغییر می‌کند. میانگین دبی‌های سالانه مشاهده شده در ایستگاه‌های گچسر، سیرا کلوان، سد کرج، رودک، سد لتیان، بومهن، ماملو و سد ماملو به ترتیب ۴، ۱/۷۱، ۱۲/۹، ۷/۵۶، ۱۲/۵، ۰/۶۵، ۲/۷۳ و ۱۰/۴۷ مترمکعب بر ثانیه و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۴/۲، ۱/۷۵، ۱۲/۸، ۸/۵، ۱۳/۱، ۰/۸، ۲/۸۸ و ۱۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه است. مدل SWAT همچنین دبی روزانه رودخانه در دوره صحت‌سنجی را به خوبی شبیه‌سازی کرد (شکل ۴). حداقل و حداکثر ضریب تعیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۳۶ (سیرا کلوان) و ۰/۸۸۲ (جریان سد کرج)؛ در حالی که حداقل و حداکثر مقادیر نش ساتکلیف ۰/۷ (سیرا کلوان، بومهن، ماملو) و ۰/۸۴۵ (سد کرج) بود. متوسط

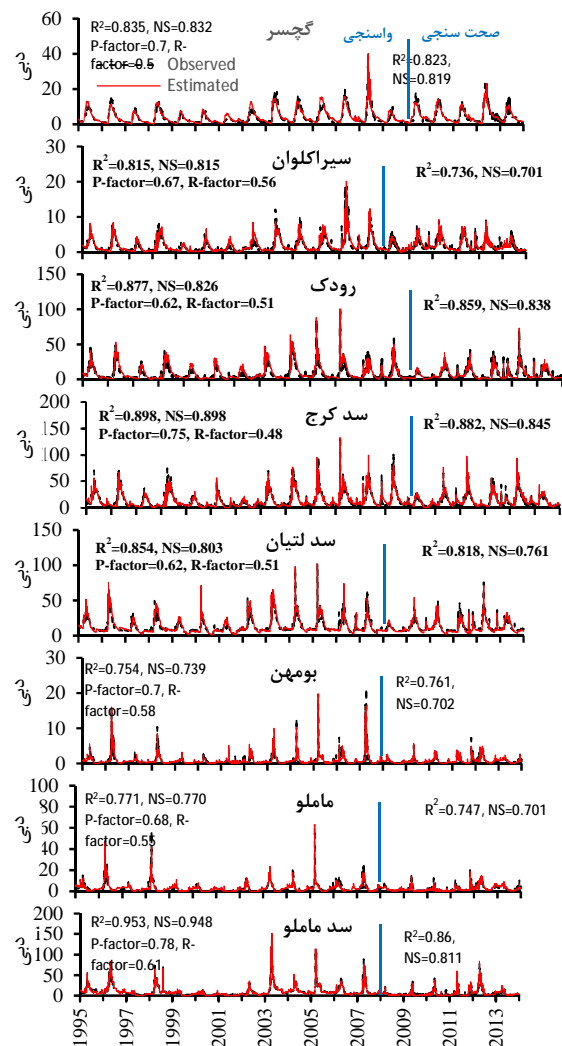
عملکرد مدل با استفاده از مقایسه بین دبی روزانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با SWAT در هشت ایستگاه هیدرومتری (شکل ۴) برای دوره مشاهداتی ۲۰۱۳-۱۹۹۵ ارزیابی شد. دوره مشاهداتی به دوره‌های واسنجی (۲۰۰۷-۱۹۹۵) و اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۰۸) طبقه‌بندی می‌شود (شکل ۴). نتایج واسنجی نشان داد مدل، جریان روزانه رودخانه در همه ایستگاه‌های هیدرومتری را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. ضریب تعیین (R^2) از ۰/۷۵۴ (بومهن) تا ۰/۹۵۳ (سد ماملو) و نش ساتکلیف (NS) از ۰/۷۳۹ (بومهن) تا ۰/۹۴۸ (سد ماملو) در دوره واسنجی متغیر است. دامنه‌های P-Factor و

۰/۸۹ در دوره واسنجی متغیر است. در دوره صحت‌سنجی مقدار R^2 از ۰/۵۵ تا ۰/۸۱ و نش ساتکلیف (NS) از ۰/۳۸ تا ۰/۷۷ متغیر است. نادری (۲۰۲۰) با استفاده از مدل SWAT طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۵ برای حوضه سد درودزن در استان فارس مقدار R^2 را در بازه ۰/۹۲-۰/۸۶ طی دوره واسنجی (۱۹۸۱-۲۰۰۵) و بازه ۰/۷۸-۰/۹ را طی دوره صحت‌سنجی (۲۰۰۶-۲۰۱۵) به دست آورد. همچنین مقدار ضریب نش ساتکلیف (NS) در دوره واسنجی در بازه ۰/۷۳-۰/۸۷ و در دوره صحت‌سنجی در محدوده ۰/۷۵-۰/۸۲ به دست آمد. نتایج مدل SWAT برای حوضه آبریز تالاب انزلی نشان داد که مقدار R^2 بازه‌های ۰/۷۷-۰/۸۸ و ۰/۷۵-۰/۸۸ طی دوره‌های واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۳) و صحت‌سنجی (۲۰۰۴-۲۰۱۲) تغییر می‌کند (نادری و ساعت‌ساز، ۲۰۲۰). همچنین مقدار ضریب نش ساتکلیف (NS) در دوره واسنجی در بازه ۰/۹۱-۰/۷۵ و در دوره صحت‌سنجی در محدوده ۰/۸۵-۰/۷ به دست آمد. مطالعه اخوان و همکاران (۲۰۱۰) در حوضه بهار همدان نشان داد که R^2 بعد از واسنجی بین ۰/۴ تا ۰/۸ و ضریب نش- ساتکلیف بین ۰/۳ تا ۰/۸ در ایستگاه‌های مختلف تغییر می‌کند. همچنین ضریب R^2 به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۳ تا ۰/۷ و ضریب نش- ساتکلیف بین ۰/۲۵ تا ۰/۷ است.

کمبود و آسیب‌پذیری آب سبز

تغییرات مکانی متوسط سالانه آب سبز موجود (رطوبت خاک) در طول دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۳ در شکل ۵ نشان داده شده است. ذخیره آب سبز از ۲۲/۸ تا ۱۳۴ میلی‌متر در سال در منطقه متفاوت و مقدار متوسط آن ۸۶/۴ میلی‌متر در سال است. توزیع مکانی ذخیره آب سبز به طور کلی تحت تأثیر توزیع بارش در سطح زیرحوضه قرار می‌گیرد؛ اما در مقیاس‌های کوچک‌تر از زیرحوضه تحت تأثیر نوع خاک و کاربری اراضی است. میانگین سالانه تبخیر و تعرق واقعی از ۲۵۰ تا ۵۶۵ میلی‌متر در سال در حوضه متغیر و مقدار متوسط آن در منطقه مورد مطالعه ۳۳۳ میلی‌متر در سال است. میانگین مقادیر سالانه شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری در طول دوره مشاهداتی در شکل ۵ ارائه شده و شاخص کمبود از ۰/۲ تا ۰/۹۹ در حوضه متغیر است که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۴ است. حوضه سد کرج (زیرحوضه‌های ۱-۳) از نظر

دبی سالانه مشاهده شده در ایستگاه‌های گچسور، سیرا کلوان، سد کرج، رودک، سد لتیان، بومهن، ماملو و سد ماملو به ترتیب ۴/۳۴، ۱/۷۴، ۱۱/۷، ۷/۰۷، ۱۲/۳۶، ۰/۵۶، ۲/۵۸ و ۵/۸ مترمکعب بر ثانیه و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۴/۵، ۱/۸۲، ۱۲/۳، ۷/۱۱، ۱۱/۲۸، ۰/۷۱، ۲/۲۵ و ۵/۶۴ مترمکعب بر ثانیه است.



شکل ۴- ضرایب R^2 و NS در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در هشت ایستگاه هیدرومتری منطقه مورد مطالعه (دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه)

مقایسه نتایج مدل در این مطالعه با سایر مطالعات نشانگر ضرایب تعیین و نش ساتکلیف قابل قبول در تحقیق حاضر است؛ برای مثال، مطالعه ویتیل و میشر (۲۰۱۶) در حوضه رودخانه ساوانای آمریکا نشان داد که ضریب تعیین (R^2) از ۰/۵۴ تا ۰/۸۸ و نش ساتکلیف (NS) از ۰/۴۵ تا

۰/۰۸ متغیر است که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۹۳۵ است.

شاخص کمبود در حوضه سد ماملو (زیرحوضه ۸-۶) از ۰/۲ تا ۱/۵ متغیر و مقدار متوسط آن ۱/۰۷ است. آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۲۴ تا ۲/۰۸ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۱/۴۶ است. شاخص کمبود بیشتر از ۱ نشانگر پهنه بحرانی است که در آن آب رودخانه بیش از حد مجاز برداشت شده و به محیط زیست وابسته به رودخانه آسیب می‌زند (زیرحوضه‌های ۵، ۶ و ۷). آب آبی در سه زیرحوضه ۵، ۶ و ۷ (حوضه آبریز لتیان و سد ماملو) در هنگام خشک‌سالی آسیب‌پذیر است (شاخص بزرگ‌تر از ۱). برای کاهش تأثیر مخرب اضافه برداشت آب از رودخانه باید در این نقاط میزان برداشت کاهش یابد. برای جبران کاهش برداشت آب در این نقاط، می‌توان آب را از حوضه‌های مجاور به داخل این مناطق انتقال داد، به شرطی که حوضه مجاور خود جزء پهنه بحرانی نباشد و دارای شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری کمتر از یک باشد.

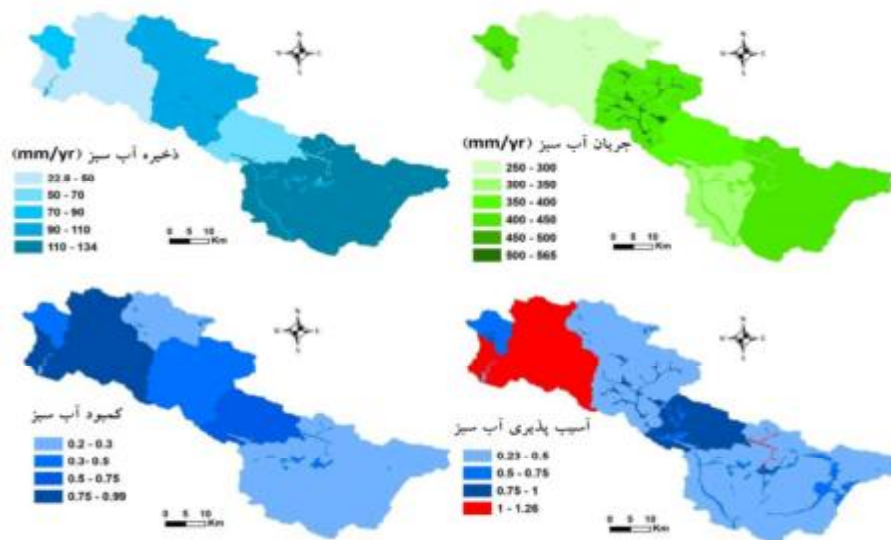
مقایسه شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری در این مطالعه با سایر مطالعات نشان می‌دهد که نتایج قابل قبول و در همه مطالعات شاخص آسیب‌پذیری (وضعیت خشک‌سالی) بیشتر از شاخص کمبود (وضعیت نرمال) است؛ برای مثال، ارزیابی کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب در حوضه رودخانه ساوانای آمریکا نشان داد که تغییرات کمبود آب سبز بین ۰/۴-۰/۱۲ (میانگین آن ۰/۲۴) و آسیب‌پذیری بین ۰/۴۳-۰/۱۵ (میانگین آن ۰/۳) است. تغییرات شاخص کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی در بخش مصارف خانگی و شهری در حوضه آبریز ساوانا به ترتیب بین ۰/۸۸-۰/۰۰۲ (متوسط ۰/۱) و ۳/۷۶-۰/۰۰۷ (متوسط ۰/۱۵) است (ویتیل و میشر، ۲۰۱۶). ارزیابی شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری منابع آب در حوضه آبریز سد درودزن در جنوب ایران نشان داد که کمبود آب سبز در محدوده ۰/۷۵-۰/۳۵ (متوسط ۰/۴۷) و آسیب‌پذیری در محدوده ۱/۰۵-۰/۴ (متوسط ۰/۵) است (نادری، ۲۰۲۰). همچنین تغییرات کمبود آب آبی بین ۱/۲۷-۰ (متوسط ۰/۲۲) و آسیب‌پذیری بین ۳/۴۶-۰ (متوسط ۰/۵) است (نادری، ۲۰۲۰).

کمبود و آسیب‌پذیری درصد بالاتری نسبت به مناطق دیگر در منطقه مورد مطالعه دارد. بر اساس میانگین کمبود سالانه، هیچ منطقه‌ای تحت استرس آب قرار نمی‌گیرد. شاخص کمبود در حوضه آبریز سد کرج (زیرحوضه ۳-۱) از ۰/۲۱۴ تا ۰/۸۶ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۵۹ است. شاخص آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۲۳ تا ۱/۲۶ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۷۵ است. شاخص کمبود در حوضه سد لتیان (زیرحوضه ۴ و ۵) از ۰/۳۸ تا ۰/۵۴ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۴۷ است. شاخص آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۶۳ تا ۰/۸۵ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۶۶ است. شاخص کمبود در حوضه سد ماملو (زیرحوضه ۸-۶) از ۰/۲۵ تا ۰/۳۳۴ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۲۹ است. شاخص آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۵ تا ۰/۶۴ متغیر که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۵۸ است.

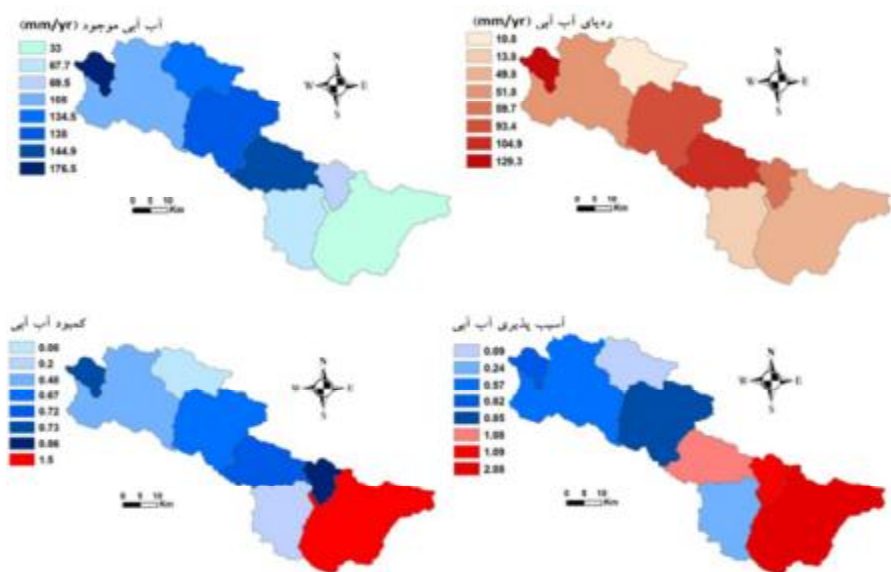
کمبود و آسیب‌پذیری آب آبی

نقشه توزیع مکانی متوسط سالانه آب آبی (شکل ۶) نشان می‌دهد که آب آبی از ۳۳ تا ۱۷۶/۵ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند و میانگین آن ۹۷ میلی‌متر در سال است و عموماً تحت تأثیر توزیع بارش قرار دارد. حوضه سدهای کرج و ماملو به ترتیب دارای حداکثر و حداقل آب آبی قابل مصرف هستند و حوضه سد لتیان دارای آب آبی متوسط است. میزان برداشت سالانه از رودخانه از ۱۰/۸ تا ۱۲۹/۳ میلی‌متر در سال در سراسر منطقه مورد مطالعه متغیر است که در آن مقدار متوسط برداشت ۵۸ میلی‌متر در سال می‌باشد (شکل ۶). ردپای آب (مصرف آب رودخانه) برابر با آب برداشت شده در هر زیرحوضه است زیرا حجم کل (۱۰۰٪) آب رودخانه برای آبیاری زمین‌های زراعی استفاده می‌شود.

شاخص کمبود آب آبی در حوضه سد کرج از ۰/۰۸ تا ۰/۷۳ متغیر است که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۴ است. شاخص آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۰۹ تا ۰/۸۲ متغیر است که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۴۷ است. شاخص کمبود در حوضه سد لتیان (زیرحوضه ۴ و ۵) از ۰/۶۷ تا ۰/۷۲ متغیر است که در آن مقدار متوسط برابر با ۰/۶۸ است. شاخص آسیب‌پذیری در این حوضه از ۰/۸۵ تا



شکل ۵- توزیع مکانی متوسط سالانه ذخیره (رطوبت خاک)، جریان (تبخیر و تعرق واقعی)، شاخص کمبود و آسیب پذیری آب سبز در طول دوره مشاهداتی



شکل ۶- توزیع مکانی متوسط سالانه آب آبی قابل دسترس، رد پای آب (مصرف)، شاخص کمبود و آسیب پذیری آن در طول دوره مشاهداتی

نتیجه گیری

خشک سالی شاخص موردنظر (آسیب پذیری) به مقدار ۰/۶۶ افزایش می یابد. حوضه آبریز سد کرج از لحاظ کمبود و آسیب پذیری آب سبز درصد بالاتری نسبت به مناطق دیگر دارد. میانگین شاخص کمبود برای آب آبی در منطقه مورد مطالعه برابر ۰/۶۵ است که البته در دوره خشک سالی شاخص آسیب پذیری به مقدار ۱/۰۴ افزایش می یابد. همچنین شاخص های آب آبی نشان می دهد حوضه سد کرج دارای کمترین آسیب پذیری و حوضه سد ماملو دارای بیشترین آسیب پذیری است. حوضه آبریز سد

در این مطالعه شبیه سازی دبی روزانه در حوضه سدهای کرج، لتیان و ماملو با مدل هیدرولوژیکی SWAT طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۳ انجام شد. منابع آب آبی و سبز در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نتایج مدل برآورد و در ادامه شاخص های کمبود و آسیب پذیری آب سبز و آبی برای دوره مشاهداتی (۱۹۹۵-۲۰۱۳) محاسبه شد. نتایج نشان می دهد مقدار میانگین شاخص کمبود برای آب سبز برابر ۰/۳۸۸ است که البته در دوره

9. Iranian Water Resources Management Company, 2019. data center. <http://wrbs.wrm.ir>.
 10. Kounina A. Margni M. Bayart J. B. Boulay A. M. Berger M. Bulle C. and Núñez M. 2013. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18(3): 707-721.
 11. Liu J. Yang H. Gosling S.N. Kumm M. Flörke M. Pfister S. Hanasaki N. Wada Y. Zhang X. and Zheng C. 2017. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's future*. 5(6): 545-559.
 12. Naderi M. 2020. Assessment of water security under climate change for the large watershed of Dorudzan Dam in southern Iran. *Hydrogeology Journal*. 28: 1553-1574.
 13. Naderi M. and Saatsaz M. 2020. Impact of climate change on the hydrology and water salinity in the Anzali Wetland, northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 65(4): 552-570.
 14. Rockström J. Falkenmark M. Karlberg L. Hoff H. Rost S. and Gerten D. 2009. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change. *Water resources research*. 45(7).
 15. Rutledge A. T. 2007. Program User Guide for Part. US Geological Survey-Water Resources Application Software.
 16. Seckler D. Amarasinghe U. Molden D. de Silva R. and Barker R. 1998. World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues. Research Report. 19.
 17. Sullivan C. 2001. The potential for calculating a meaningful water poverty index. *Water international*. 26(4): 471-480.
 18. Vanham D. Hoekstra A. Y. Wada Y. Bouraoui F. de Roo A. Mekonnen M. Bund W. Batelaan O. Pavelic P. and Bastiaanssen W. 2018. Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards SDG target 6.4: An evaluation of indicator 6.4. 2 "Level of water stress". *Science of the total environment*. 613: 218-232.
 19. Veetil A.V. and Mishra A. K. 2016. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*. 542: 589-602.
 20. Winchell M. Srinivasan R. Di Luzio M. and Arnold J. 2013. ArcSWAT interface for SWAT2012. Blackland Research Center. Texas AgriLife Research, College Station.
 21. Zeng Z. Liu J. and Savenije H. H. 2013. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality. *Ecological indicators*. 34: 441-449.
- ماملو و در زیرحوضه ۷ (ایستگاه هیدرومتری ماملو) دارای کمبود آب در سال‌های عادی است (سال‌هایی که بارش معمولی است)؛ ولی در وضعیت خشک‌سالی حوضه لتیان، بومهن و ماملو آسیب‌پذیر خواهند بود. حوضه آبریز سد کرج در وضعیت بحرانی قرار ندارد (شاخص‌ها کمتر از ۱ است).
- سیاس‌گذاری**
- نویسندگان از حمایت دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان کمال تشکر را دارند. از همکاری شرکت مدیریت منابع آب ایران در ارائه اطلاعات مورد نیاز بسیار سپاس‌گزاریم.
- منابع**
۱. سازمان هواشناسی ایران. ۱۳۹۷. مرکز آمار و اطلاعات، تهران.
 ۲. شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۷. دفتر مطالعات پایه منابع آب، تهران.
 3. Abbaspour K. C. Rouholahnejad E. Vaghefi S. Srinivasan R. Yang H. and Kløve B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 524: 733-752.
 4. Akhavan S. Abedi-Koupai J. Mousavi S. F. Afyuni M. Eslamian S. S. and Abbaspour K. C. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, ecosystems & environment*. 139(4): 675-688.
 5. Falkenmark M. and Rockström J. 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 132: 129-132.
 6. FAO. 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). Rome, Italy and Laxenburg, Austria. 1-6
 7. Gerten D. Heinke J. Hoff H. Biemans H. Fader M. and Waha K. 2011. Global water availability and requirements for future food production. *Journal of hydrometeorology*. 12(5): 885-899.
 8. Hoekstra A. Y. Chapagain A. K. Mekonnen M. M. and Aldaya M. M. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.