ارزیابی یکپارچه حوضه آبریز فریزی در قالب چارچوب حسابداری آب با استفاده از مدل SWAT

آرش رضاپور[۱]، سید محمود حسینی[۱*] و عزیزالله ایزدی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۴)

چکیده

ارزیابی یکپارچه حوضه آبریز در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با تنش شدید آبی مواجه هستند امری حیاتی است. آمار و اطلاعات، بخش اساسی فرآیند تصمیم‌گیری و حکمرانی آب برای تحقق مدیریت یکپارچه منابع آب در مقیاس حوضه آبریز هستند. برای دستیابی به این هدف، حسابداری آب ابزاری مفید برای سازمان‌دهی اطلاعات و ارائه آن‌ها در قالب شاخص‌های استاندارد است. بنابراین، هدف این پژوهش پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب پلاس (Water Accounting Plus (WA+)) در حوضه آبریز فریزی واقع در استان خراسان رضوی است. در این پژوهش، شاخص‌های حسابداری آب حوضه آبریز فریزی برای یک دوره ۲۸ ساله (۱۳۹۵-۱۳۶۸) و دو دوره تر (۱۳۷۵-۱۳۶۸) و خشک (۱۳۷۶-۱۳۸۷) با استفاده از مدل SWAT استخراج شدند. شاخص‌های استخراج‌شده نشان داد که میزان آب قابل مدیریت و سودمندی مصرف (تعریق) در سطح حوضه پایین است و بخش زیادی از سهم آبیاری حوضه از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل SWAT، چارچوب +WA و تحلیل شاخص‌های حسابداری آب نقش مهمی را در ارزیابی شرایط کشاورزی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز ایفا می‌کنند. رویکرد پیشنهادشده در این پژوهش، می‌تواند به مدیران در اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای حفظ پایداری حوضه آبریز کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: مدیریت یکپارچه منابع آب، چارچوب حسابداری آب +WA، مدل SWAT، حوضه آبریز

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. بخش تحقیقات آب، دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shossein@um.ac.ir

مقدمه

عواملی همچون توزیع پراکنده بارش، افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و صنعت، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، خشکسالی و مدیریت نامناسب منابع آبی باعث شده است که کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نظیر ایران با بحران منابع آبی مواجه باشند. فائق آمدن بر این بحران نیازمند پایش یکپارچه و مستمر حوضه‌های آبریز است، تا بتوان براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده، برای مدیریت و حکمرانی مناسب حوضه آبریز برنامه‌ریزی کرد. اطلاعات آبی کشورها عموماً بر اساس بیلان منابع و مصارف جمع‌آوری می‌شود. این نوع نگاه فقط به بعد هیدرولوژیکی آب می‌پردازد و امکان تحلیل سیستماتیک و چندجانبه عوامل مؤثر بر وضعیت منابع آب و محیط‌زیست را درنظر نمی‌گیرد، به همین منظور مدیریت یکپارچه منابع آب مطرح شد تا بتواند تمام بخش‌های تأثیرگذار در مسائل مربوط به آب را درنظر بگیرد. طبق تعریف سازمان همکاری جهانی آب ((Global Water Partenship (GWP))، مدیریت یکپارچه منابع آب فرآیندی برای توسعه و مدیریت هماهنگ آب، زمین و منابع مرتبط با هدف افزایش بهره‌وری اقتصادی و رفاه اجتماعی با رویکردی عادلانه بدون برهم‌زدن پایداری اکوسیستم‌های طبیعی است (۱).

با توجه به مطالب بیان‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که بارزترین گام برای تحقق مدیریت یکپارچه منابع آب، داشتن آمار و اطلاعات موثق، به‌روز و کافی از میزان منابع و مصارف حوضه آبریز، تحلیل اطلاعات، برنامه‌ریزی، اجرا و پایش مستمر حوضه آبریز است. از طرفی پایش و تحلیل سیستم‌های منابع آب نیازمند تدوین چارچوبی نظام‌مند و متشکل از مجموعه‌ای از شاخص‌ها است تا بتوانند به صورت مطلوب شرایط موجود در حوضه را ترسیم کرده و مشارکت تمام ذینفعان در فرآیندهای تصمیم‌گیری را تسهیل نمایند. در این‌راستا، حسابداری آب با توجه به امکان سازمان‌دهی اطلاعات مختلف از بخش‌های گوناگون هیدرولوژیکی، محیط زیستی و اقتصادی امکان مشارکت تمامی ذینفعان را فراهم کرده و می‌تواند با کنار هم قراردادن اطلاعات مختلف بستر مناسبی را برای استخراج شاخص‌ها به‌منظور تحلیل هرچه بهتر وضعیت حوضه فراهم کند. به‌همین منظور حسابداری آب می‌تواند چارچوب و مبنای قابل اطمینانی برای مدیریت یکپارچه منابع آب باشد. حسابداری آب، به معنی تشکیل مکانیسمی برای ترکیب داده‌های گردآوری‌شده از منابع مختلف به‌منظور تدوین یک مجموعه اطلاعات یکپارچه و فراهم‌آوردن امکان پیوند داده‌های فیزیکی با داده‌های اقتصادی است (۲۷).

چارچوب‌های مختلفی برای حسابداری آب در سطح بین‌المللی شکل‌گرفته‌اند که این چارچوب‌ها را می‌توان به دو دسته مبتنی بر جریان‌های فیزیکی آب و مبتنی بر مصارف آب دسته‌بندی کرد. چارچوب‌های حسابداری مبتنی بر جریان فیزیکی آب براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری، تخصیص‌ها و برداشت‌ها شکل گرفته است (۱۶). از چارچوب‌های مهم مبتنی بر جریان فیزیکی آب می‌توان به چارچوب حسابداری آب با اهداف عمومی (۲۹) و چارچوب حسابداری اقتصادی- زیست محیطی برای آب (۲۳) اشاره کرد. در طرف مقابل چارچوب‌های مبتنی بر مصارف آب، مقدار مصارف آب را از برداشت جدا کرده و مصارف را به آب مصرف‌شده و آب‌مصرف‌نشده تقسیم می‌کنند. در این چارچوب‌ها، کاربرد میزان مصارف به جای مقادیر برداشت می‌تواند از خطاهای برآورد آب بازگشتی جلوگیری کند. از چارچوب‌های مهم مبتنی بر مصارف می‌توان به چارچوب‌های حسابداری ردپای آب (۱۰)، چارچوب حسابداری مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (International Water Management Institute (IWMI)) (۱۹) و چارچوب حسابداری آب پلاس (Water Accounting Plus ((WA+)) (۱۶) اشاره کرد.

در بین چارچوب‌های حسابداری آب مطرح شده، چارچوب‌های حسابداری مبتنی بر میزان آب مصرف شده به علت تفکیک مصارف از برداشت، تقسیم مصارف آب به مصارف سودمند و غیرسودمند، در نظر گرفتن آب بازگشتی و

پایه‌گذاری‌شده براساس مفهوم بیلان، چارچوب‌های مناسبی برای ارزیابی شرایط هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه‌های آبریز و همچنین ابزار مناسبی جهت تحقق مدیریت یکپارچه منابع آب هستند. از بین چارچوب‌های مبتنی بر مصرف، +WA یک چارچوب حسابداری آب نوین است که برمبنای مفاهیم چارچوب حسابداری IWMI و بیلان آب توسعه‌یافته است و دارای هشت صفحه (Sheet) مجزا به همراه شاخص‌های مربوط به هرصفحه به‌منظور تشریح شرایط آبی، کشاورزی و محیط‌زیستی حوضه آبریز است (۱۶). از طرفی چارچوب +WA امکان بررسی اثر اقدامات مدیریتی بر تغییر مصارف سودمند و غیرسودمند در بخش‌های مختلف را فراهم کرده و ارتباط بین کاربری اراضی و جریان آب را در نظر می‌گیرد و می‌تواند توسط مدل‌های هیدرولوژیکی، داده‌های سنجش‌ازدور و داده‌های زمینی استخراج شود. با توجه به دلایل مطرح‌شده، چارچوب +WA بر چارچوب IWMI برتری دارد و در پژوهش حاضر برای حسابداری آب حوضه از آن استفاده شده است.

در ادامه به برخی از مهم‌ترین مطالعاتی که در زمینه پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب +WA با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور صورت گرفته است اشاره می‌شود. کریمی و همکاران (۱۶) در پژوهش خود به تاریخچه حسابداری آب اشاره‌کرده، چارچوب +WA و معادلات مربوط به آن را شرح داده و صفحات منابع- مصارف، تبخیر و تعرق، بهره‌وری، برداشت و شاخص‌های مرتبط با هر صفحه را مطرح کردند. کریمی و همکاران (۱۴)، برای مدیریت آب در حوضه آواش در اتیوپی از چارچوب +WA بهره بردند. روش اتخاذشده برای این مطالعه شامل استفاده از سناریوهای اقلیمی و سنجش‌های ماهواره‌ای بود. همچنین تأثیرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری زمین روی شاخص‌های صفحه‌های منابع- مصارف و برداشت در حوضه آواش مورد ارزیابی قرار گرفت. کریمی و همکاران (۱۵)، از چارچوب حسابداری +WA و از داده‌های سنجش‌ازدور برای حوضه ایندوس در پاکستان استفاده کردند. داده‌های ورودی در این روش شامل کاربری اراضی، بارندگی، تبخیر و تعرق و تغییرات ذخیره بودند. در این پژوهش مشخص شد که داده‌های سنجش از دور قابلیت استخراج مؤلفه‌های صفحه برداشت نظیر میزان آب بازگشتی را ندارند، به همین منظور از مدل SWAT برای تعیین این مؤلفه‌ها استفاده کردند.

سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) (Food and Agriculture Organization (FAO))، به‌تازگی یک چارچوب حسابداری سریع (Rapid) را با استفاده از داده‌های درگاه دسترسی آزاد بهره‌وری آب استخراج شده از سنجش‌ازدور (Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data (WAPOR)) برای آفریقا و خاورمیانه توسعه داده است. داده‌های این پایگاه شامل بارندگی، تبخیر و تعرق واقعی، برگاب و دسته‌بندی‌های مربوط به کاربری‌های مختلف زمین هستند که در سه سطح قاره‌ای، ملی و محلی توسعه پیدا کرده‌اند. فائو در حال حاضر از داده‌های این درگاه برای محاسبه سریع صفحه منابع- مصارف چارچوب +WA در ۳ حوضه آواش (٤)، اردن (۵) و نیجر (٦) استفاده کرده است که در ادامه به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند.

فائو، با استفاده از داده‌های WAPOR صفحه منابع- مصارف چارچوب حسابداری آب +WA را برای حوضه آواش و برای سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۹ در کشور اتیوپی پیاده‌سازی کرد. نتایج نشان داد در این حوضه ۹۵ درصد از آب قابل مدیریت حوضه صرف آبیاری می‌شود و به همین منظور راهکارهایی نظیر افزایش راندمان مصرف آب و ایجاد ظرفیت ذخیره‌سازی آب در سال‌های ترسالی مطرح شد (٤). فائو، از داده‌های WAPOR برای پیاده سازی +WA و به تصویر کشیدن منابع- مصارف آب حوضه رودخانه جردن (اردن) استفاده کرد. نتایج نشان داد که برای حوضه‌هایی مانند جردن که بیلان آبی در آن تحت تأثیر فعالیت‌های بین حوضه‌ای و برداشت آب زیرزمینی قرار دارد معادله ساده بیلان آبی کاربردی ندارد. به همین دلیل برای حسابداری دقیق منابع آبی حوضه به اطلاعات

بیشتری نظیر آب‌های زیرزمینی، انتقال بین حوضه‌ای، آب‌های مصرفی و بازگشتی مورد نیاز است و در حال حاضر نمی‌توان این داده‌ها را به‌طور مستقیم از سنجش از دور به‌دست آورد. بنابراین، هنوز هم اندازه‌گیری‌های میدانی نقش مهمی در حسابداری آب ایفا می‌کنند. درصورت در دسترس نبودن این داده‌ها، استخراج داده‌های مورد نیاز از طریق مدل‌سازی جامع هیدرولوژیکی بسیار کارآمد خواهد بود (۵). فائو، از مجموعه داده‌های WAPOR برای استفاده و پیاده‌سازی چارچوب WA+ و بستن بیلان آبی رودخانه نیجر که دارای یک سیستم آبی پیچیده است استفاده کرد. یافته‌ها نشان داد که با درنظرگرفتن تمامی عدم قطعیت داده‌ها و خطاهای موجود در بیلان آب هنوز هم می‌توان بیان کرد که آب موجود در حوضه رودخانه نیجر در حال حاضر بیش از حد مورد بهره‌برداری قرار نگرفته و به‌طور گسترده مدیریت می‌شود و در نتیجه ظرفیت توسعه کشاورزی در حوضه وجود دارد (٦).

همان‌طور که ذکر شد WA+ می‌تواند توسط داده‌های سنجش‌ازدور تکمیل شود؛ اما محدودیت‌هایی نظیر عدم دسترسی به منابع گوناگون داده‌های سنجش‌ازدور و عدم دسترسی به داده‌های زمینی کافی و دقیق برای واسنجی نتایج حاصل از داده‌های سنجش‌ازدوری باعث شده تا مطالعات مربوطه از تنوع و تعدد کافی برخوردار نباشند. همچنین کریمی و همکاران (۱۵) در حوضه ایندوس و فائو (۵) در حوضه جردن، در مطالعات خود بدین نتیجه رسیدند که مدل‌های هیدرولوژیکی دارای قابلیت بالایی برای استخراج اطلاعات مرتبط با صفحه برداشت چارچوب WA+ هستند، در حالی‌که داده‌های سنجش از دور این قابلیت را ندارند. در مدل‌های هیدرولوژیکی امکان تعریف و اعمال انواع سناریوهای مختلف از جمله اعمال سناریوهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم وجود داشته و می‌تواند مجموعه‌ای از دیدگاه‌ها را به‌منظور حکمرانی مناسب منابع آبی حوضه در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

در راستای مطالب بیان‌شده، برای حسابداری آب حوضه و به تبع آن مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه آبریز به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیعی از داده‌ها همچون بارش، مرزهای حوضه، توپوگرافی، خصوصیات خاک، پروفیل‌های خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، سیستم‌های انتقال رواناب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی بکار برد. در این‌راستا، مدل SWAT به‌عنوان یک مدل جامع فیزیکی و نیمه‌توزیعی با قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای پیوسته زمانی در گام‌های روزانه، ماهانه و سالانه در تحقیقات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی تمام فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه نظیر رواناب (۲۱)، تبخیر و تعرق (۱۸)، رسوب و فرسایش (۲)، برف (۹)، آب زیرزمینی (۱۱) مورد استفاده قرارگرفته است. از طرفی در مدل SWAT امکان تعریف و اعمال سناریوهای مختلف و ایجاد باندهای ارتفاعی به‌منظور برآورد دقیق‌تر بودجه برفی در مناطق کوهستانی وجود دارد و چون SWAT یک مدل کد باز است امکان اعمال تغییرات و اصلاحات به واسطه بهبود عملکرد مدل را نیز برای کاربر فراهم می‌کند. با توجه به ویژگی‌های بیان‌شده و قابلیت‌های مدل SWAT از آن به‌منظور استخراج صفحات حسابداری آب WA+ در حوضه آبریز فریزی استفاده شد.

در راستای مطالب بیان شده، فرخ نیا و همکاران (۷) با استفاده از مدل توسعه یافته SWAT-LU و به‌کارگیری چارچوب حسابداری آب WA+ راهکارهای مختلفی برای صرفه‌جویی آب در حوضه دریاچه ارومیه و افزایش جریان آب به این حوضه ارائه دادند. در این پژوهش اثر اقدامات مدیریتی و ایجاد سناریوها بر مؤلفه‌های مختلف بیلان آبی حوضه در قالب صفحات مختلف حسابداری آب مورد ارزیابی قرارگرفت. نتایج نشان داد که برخی اقدامات مانند توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار تأثیر چندانی بر صرفه‌جویی آب در سطح حوضه ندارند. به‌تازگی، دلاور و همکاران (۳) از مدل SWAT به‌منظور استخراج شاخص‌ها و اطلاعات چارچوب حسابداری آب WA+ بهره بردند. آنها با تغییر در کدهای فرترن مدل SWAT مدل ارتقایافته‌ای به نام SWAT-FARS را به‌منظور تطبیق با شرایط محدوده مطالعاتی خود توسعه دادند تا بتوانند

عواملی نظیر تبخیر و تعرق را به مؤلفه‌های آن تفکیک نمایند. نتایج حاکی از کارایی مدل ارتقایافته برای حوضه آبریز طشک- بختگان به‌عنوان یک حوضه کارستی، نیمه‌خشک و با مساحت نسبتاً بزرگ (حدود ۲۷۵۲۰ کیلومتر مربع) بود. با وجود این، کارایی این مدل بهبودیافته توسط دلاور و همکاران (۳) در حوضه‌های آبریز با مساحت کوچک و اقلیم متفاوت هنوز بررسی نشده است. در این بین درک فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق کوهستانی با توجه به سهم بالای برف از کل بارش و همچنین نقش ذوب برف در ایجاد رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌همین‌منظور هدف این پژوهش بررسی عملکرد مدل SWAT-FARS برای حوضه آبریز فریزی (Ferizi) واقع در استان خراسان رضوی به‌عنوان یک حوضه کوچک (۲۸۳ کیلومتر مربع)، کوهستانی، سرد، با پوشش قابل توجه از برف و مبتنی بر کشاورزی آبی است که نقش مهمی در تغذیه آبخوان دشت مشهد- چناران ایفا می‌کند. همچنین، در پژوهش حاضر مقدار حقابه زیست‌محیطی پایین دست حوضه آبریز فریزی به‌عنوان جز جدانشدنی بیلان آبی حوضه با روش منحنی تداوم جریان محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و تشریح داده‌ها

حوضه آبریز فریزی در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه بینالود و در ۵۰ کیلومتری شمال غربی مشهد واقع است. زهکش اصلی حوضه، رودخانه فریزی است که از بخش‌های جنوبی حوضه یعنی ارتفاعات بینالود سرچشمه گرفته و در جهت شمال جریان دارد. سیلاب این رودخانه به کشف‌رود می‌رسد و در مسیر خود آبخوان دشت مشهد- چناران را تغذیه می‌کند. حوضه آبریز فریزی با مساحت ۲۸۳ کیلومترمربع، یک حوضه کوهستانی و مبتنی بر کشاورزی آبی است (۲۸). میانگین بارندگی سالانه در این حوضه براساس آمار بلندمدت ایستگاه باران‌سنجی آبقد برابربا ۲۸۵ میلی‌متر و متوسط دبی سالانه رودخانه فریزی براساس آمار بلندمدت ایستگاه آب‌سنجی موشنگ برابر با ۱/۶۷ مترمکعب بر ثانیه است. میانگین دمای حوضه نیز براساس آمار بلندمدت ایستگاه‌های چهارباغ و زشک ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز فریزی را به همراه ایستگاهای هواشناسی، چاه‌های پیزومتری و شبکه رودخانه‌ای نشان می‌دهد.

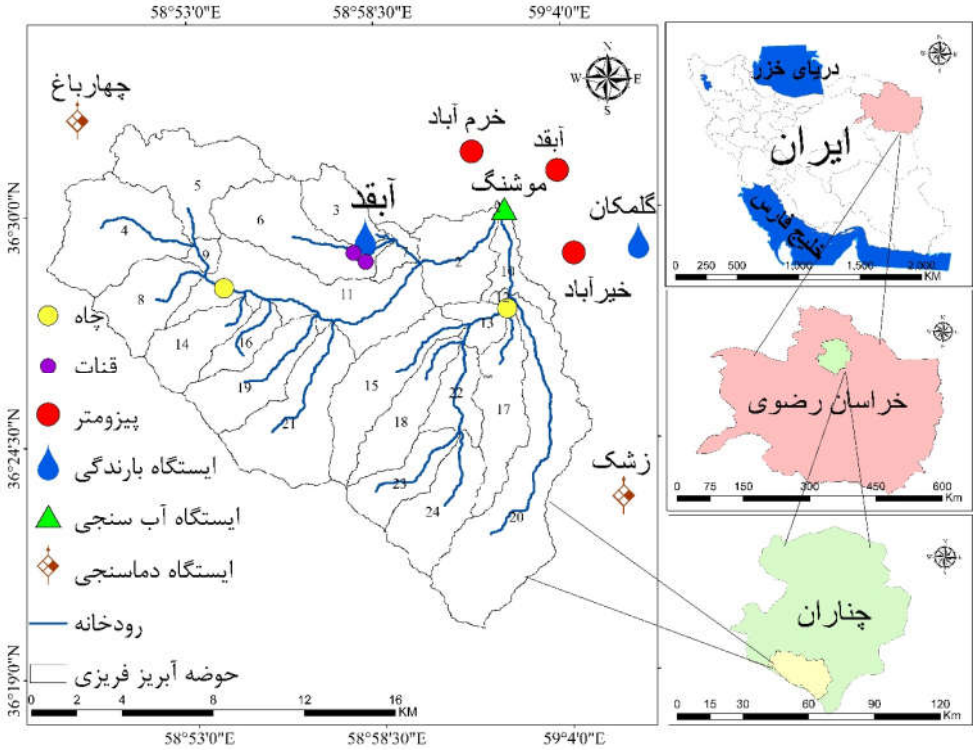
جدول (۱)، مشخصات ایستگاه‌های نشان‌داده‌شده در شکل (۱) را نشان می‌دهد. اطلاعات ایستگاه‌های ذکرشده در جدول (۱) برای سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ و از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ شده است.

در ادامه به‌منظور بررسی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در حوضه آبریز فریزی، سالنامه‌های آماری سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی (از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵) و گزارش مربوط به بخش کشاورزی شرکت سازآب شرق (۱۳۸۹) در سطح حوضه آبریز فریزی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از طریق مطالعات میدانی و مشاهدات مستقیم و مصاحبه با کشاورزان منطقه، صحت اطلاعات گزارش‌شده مورد ارزیابی قرارگرفت. درنهایت مشخص شد که مجموع کل سطح زیرکشت حوضه ۱۳۰۰ هکتار است و سه محصول گیلاس، سیب و گردو عمده‌ترین محصولات کشت شده در حوضه آبریز فریزی می‌باشند. مهم‌ترین دلیل برای انتخاب این محصولات تناوب کشت ثابت این محصولات در طی دوره شبیه‌سازی (۱۳۹۵-۱۳۶۵) است. در جدول (۲) سطح زیر کشت هر محصول و عملکرد آن آورده شده است.

همچنین مدل ارتفاعی رقومی (Digital Elevation Model(DEM))، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک استخراج‌شده حوضه آبریز فریزی (مربوط به سال ۱۳۸۷)؛ به‌عنوان ورودی‌های اصلی مدل SWAT در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

چارچوب حسابداری آب +WA

چارچوب حسابداری آب +WA توسط مؤسسه آموزش آب



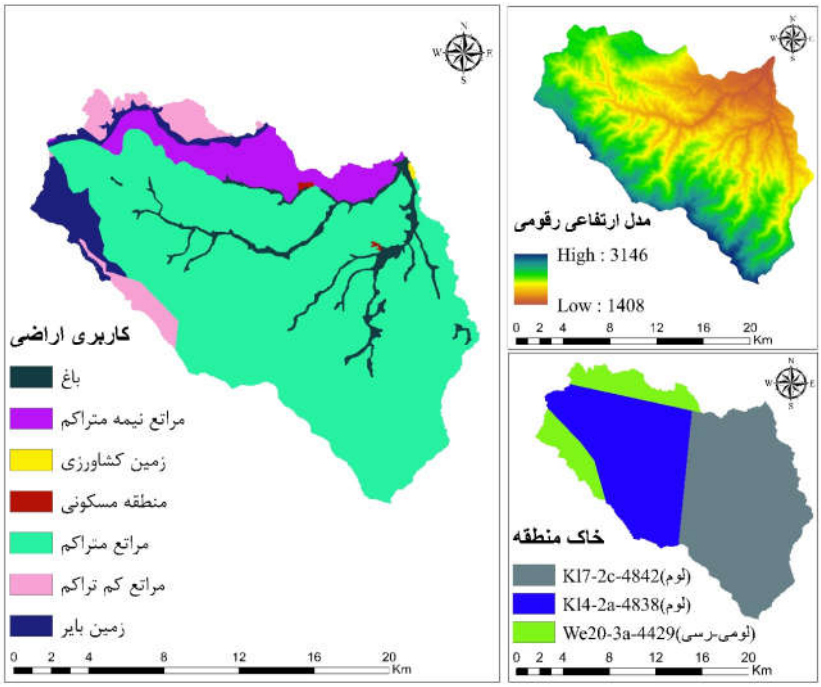
شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز فریزی، ایستگاه‌های هواشناسی، چاه‌های پیزومتری و شبکه رودخانه‌ای

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی حوضه آبریز فریزی

کد ایستگاه	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	X (utm)	Y (utm)	طول آمار (تا سال ۱۳۹۵)	سال تأسیس
٦٤٢٠١	آبقد	باران‌سنجی	٦٧٦٤٢٩	٤٠٣٩٨١٥	٣٧	١٣٥٩
٦٤٠١١	گلمکان	باران‌سنجی	٦٨٨٤٤٤	٤٠٣٩٩٥٠	٤٩	١٣٤٧
٦٤٢١٠	چهارباغ	دماسنجی	٦٦٣٨١٠	٤٠٤٥١١٨	٤٢	١٥٩٩
٦٤٠١٧	زشک	دماسنجی	٦٨٧٧٧٣	٤٠٢٨٧٤٠	٤٤	١٣٥٢
٦٤٠٠٧	موشنگ	آب‌سنجی	٦٨٢٤٧٠	٤٠٣٩٨٨٣	٤٣	١٣٥٣

جدول ۲. میزان عملکرد محصولات عمده باغی در حوضه آبریز فریزی و سطح زیر کشت آن‌ها

نوع محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	عملکرد (تن بر هکتار)	کل تولید (تن)
گردو	٣٠٠	٣	٩٠٠
سیب	٣٠٠	١٠	٣٠٠٠
گیلاس	٤٠٠	٤/٢٥	١٧٠٠



شکل۲. کاربری اراضی، مدل ارتفاعی رقومی و خاک حوضه آبریز فریزی

یونسکو (UNESCO-IHE)، مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (International Water Management Institute (IWMI)) و پایه فائو (FAO) در سال ۲۰۱۳ توسعه یافته است. WA+ توسعه یافته چارچوب حسابداری IWMI است و بر معادله بیلان آب بنا نهاده شده است. در چارچوب حسابداری WA+ بیلان کلی آب در یک حوضه و در یک دوره زمانی مشخص به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود (۱۶):

$$P+\left(Q_{in}^{SW}+Q_{in}^{GW}\right)-ET-\left(Q_{in}^{SW}+Q_{in}^{GW}\right)+\Delta S=0 \qquad (1)$$

که در رابطه (۱)، P بارندگی، $(Q_{in}^{SW}+Q_{in}^{GW})$ جریان‌های سطحی و زیرزمینی ورودی به حوضه، $(Q_{out}^{SW}+Q_{out}^{GW})$ جریان‌های خروجی سطحی و زیرزمینی، ET میزان کل تبخیر و تعرق و ΔS تغییرات در مقدار ذخیره است.

چارچوب حسابداری WA+ بر پایه برآورد مصرف واقعی آب به جای برداشت از منابع آب ایجاد شده است. در این رویکرد، مصارف آب در سطح حوضه به دو دسته مصرف‌شده و مصرف نشده تقسیم‌بندی می‌شوند. آب مصرف‌شده خود به دو دسته مفید و غیر مفید و آب مصرف نشده نیز به دودسته آب بازگشتی و آب غیرقابل استفاده تفکیک می‌شوند. در این رویکرد آب تعهد داده شده (نظیر حقابه زیست محیطی) نیز مد نظر قرار می‌گیرد. یکی از تمایزهای ویژه چارچوب WA+ نسبت به چارچوب‌های حسابداری دیگر طبقه‌بندی مصارف آب در کاربری‌های مختلف به‌منظور تفکیک آب قابل مدیریت و غیر قابل مدیریت و تفکیک مصارف سودمند و غیرسودمند در آنها است. به‌منظور لحاظ تغییرات کاربری اراضی و مدیریت مصرف در این نوع کاربری‌ها، چارچوب حسابداری WA+، کلاس‌های کاربری اراضی را به چهار دسته اراضی طبیعی نظیر مراتع، اراضی دستکاری شده مانند کشت دیم، اراضی مدیریت شده آبی نظیر کشت آبی و اراضی حفاظت شده نظیر پارک‌های حفاظت شده تقسیم می‌کند (۱۵).

یکی از وجه تمایزهای چارچوب WA+ در مقایسه با دیگر چارچوب‌های حسابداری آب استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور است که می‌تواند راهی را برای ارائه چارچوبی استاندارد و شفاف برای جمع‌آوری داده‌ها فراهم کند. به همین منظور

می‌توان بیلان آب را در مناطقی با داده‌های زمینی محدود تخمین زد. قابلیت دیگر چارچوب +WA این است که علاوه بر داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند توسط مدل‌های هیدرولوژیکی وداده‌های زمینی در سطح منطقه مطالعاتی پیاده‌سازی شود. به‌طور کلی چارچوب +WA دارای ۸ صفحه (Sheets) توسعه‌یافته شامل صفحه منابع- مصارف، صفحه تبخیر و تعرق، صفحه خدمات کشاورزی، صفحه برداشت، صفحه آب سطحی، صفحه آب زیرزمینی، صفحه خدمات محیط زیستی و صفحه پایداری منابع آب به همراه شاخص‌های مربوط به هر صفحه به‌منظور تشریح شرایط آبی، کشاورزی و محیط‌زیستی حوضه‌های آبریز است (۱۶). یکی از ویژگی‌های چارچوب +WA استخراج شاخص‌های متنوع از صفحات مختلف آن به‌منظور ریشه‌یابی مشکلات، کمک به سیاست‌گذاری‌ها و اقدامات مدیریتی مناسب در سطح حوضه آبریز و تفحص در نتایج و اقدام برای ارائه یک برنامه اصلاحی است. با توجه به استخراج اطلاعات صفحات منابع- مصارف، تبخیر و تعرق و برداشت چارچوب +WA در پژوهش حاضر در ادامه کارکرد این صفحات بیان می‌شود.

صفحه منابع- مصارف، در حقیقت همان بیلان منابع آب است که در آن جزئیات بیشتری نظیر میزان آب قابل مدیریت، آب قابل تخصیص، آب مصرف‌شده و آب تعهد داده شده (مانند حقابه زیست محیطی) را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. در این صفحه اطلاعاتی از جمله ورودی‌های حوضه (بارش و تغییرات ذخیره)، نحوه مصرف آب (مصارف به تفکیک نوع کاربری و مصرف آب آبی و سبز) و جریان خروجی حوضه نمایش داده می‌شوند. صفحه تبخیر و تعرق، نقش عوامل انسانی و کاربری اراضی را بر روی میزان تبخیر و تعرق در نظر گرفته و نشان می‌دهد که چه میزان از تبخیر و تعرق در شرایط مدیریت شده، قابل مدیریت و غیرقابل مدیریت اتفاق افتاده است. در این صفحه، تبخیر و تعرق به دو دسته سودمند (تعرق) و غیرسودمند (تبخیر) تفکیک می‌شود. به‌منظور بررسی جزئیات بیشتر و کمک به نحوه اعمال اقدامات مدیریتی مناسب، میزان تبخیر از سطح رودخانه، تبخیر از آب زیرزمینی، تبخیر از خاک، تبخیر از برگاب، تبخیر از مخازن، تصعید برف، تعرق گیاهان زراعی و تعرق مراتع طبیعی به صورت مجزا در این صفحه بیان می‌شوند. صفحه برداشت، بین آب مصرف‌شده و مصرف‌نشده تمایز قائل شده و به‌همین دلیل میزان آب بازگشتی را مشخص می‌کند. در این صفحه، برداشت آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی به تفکیک مشخص می‌شود. به‌طور کلی این صفحه اطلاعاتی در خصوص نحوه جریان آب در زمین‌های مدیریت شده آبی را ارائه می‌دهد. مصرف‌کنندگان در این دسته می‌توانند زمین‌های کشاورزی فاریاب، کاربری‌های شهری و صنعتی باشند. آب از منابع سطحی و زیرزمینی در اختیار بخش‌های مختلف برداشت‌کننده قرار می‌گیرد که بخشی از آن در قالب مصارف مدیریت شده آب در حوضه (تبخیر و تعرق تکمیلی) مصرف شده، بخشی تحت عنوان تلفات انتقال و کاربرد از دسترس خارج می‌شود و بخش دیگر تحت عنوان آب بازگشتی به منابع سطحی و زیرزمینی برمی‌گردد.

مدل SWAT و قابلیت‌های آن در استخراج اطلاعات مورد نیاز چارچوب +WA

مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه آبریز است که توسط سرویس پژوهش کشاورزی (Agricultural Research Service) ایالات متحده توسعه داده شده است. مدل SWAT توانایی شبیه‌سازی اثرات همزمان اقدامات مدیریتی (مقدار آب آبیاری، دور آبیاری و راندمان آبیاری) و کشاورزی (کوددهی و سم‌پاشی) بر روی بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی، دبی، رطوبت خاک، آب‌های زیرزمینی، محصولات کشاورزی (عملکرد) و کیفیت منابع آبی را در مقیاس حوضه‌ای دارد. در این مدل هر حوضه به چند زیرحوضه و هر یک از زیرحوضه‌ها به چند واحد پاسخ هیدرولوژیک (Hydrologic Response Unit (HRU)) که کوچک‌ترین واحد کاری نرم‌افزار و ازنظر کاربری اراضی و

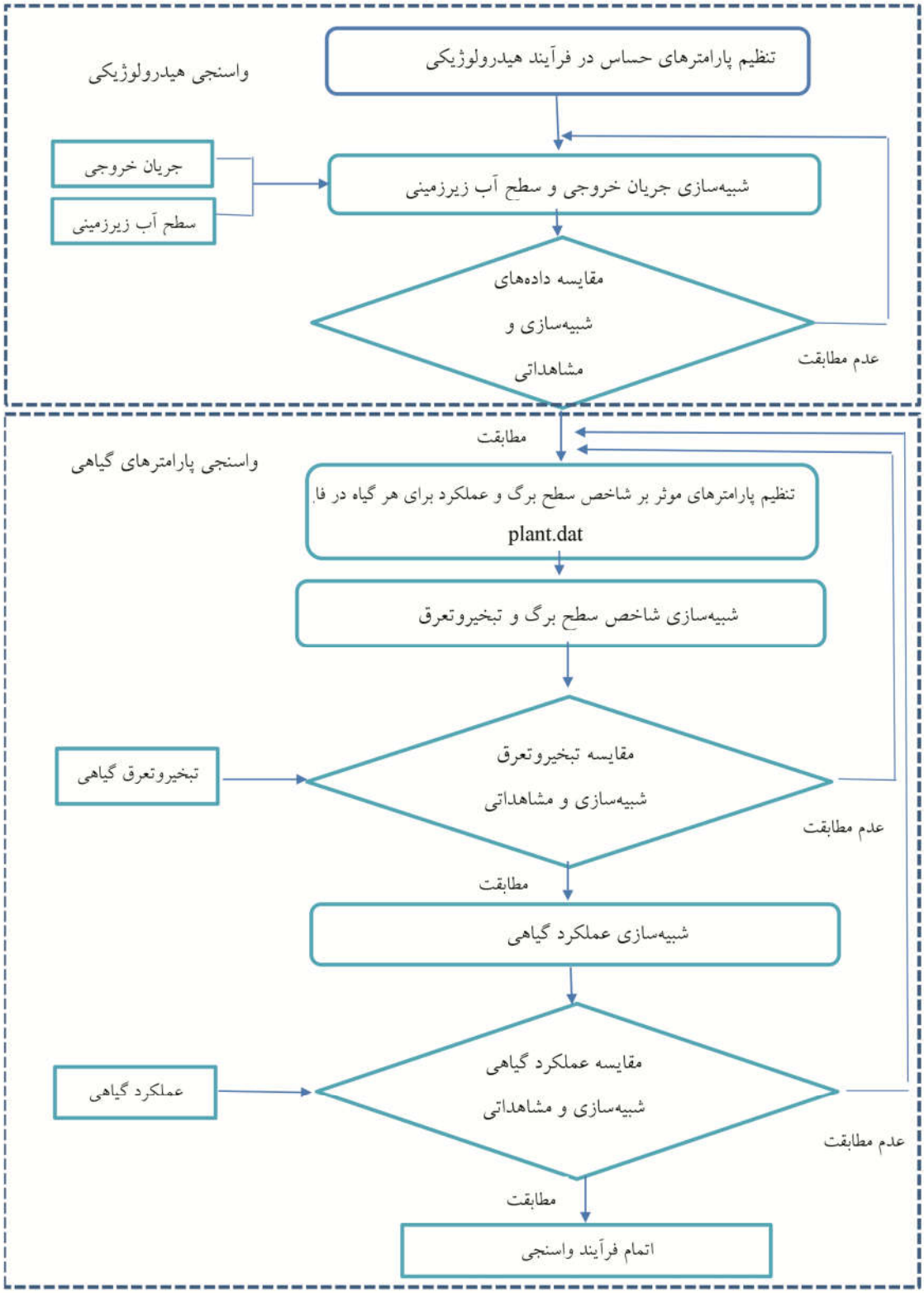
ویژگی‌های خاک و توپوگرافی همگن هستند، تقسیم می‌شوند. در ابتدا رطوبت موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصرغذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک و سپس برای هر زیرحوضه به صورت متوسط وزنی محاسبه می‌شود. تقسیم حوضه آبریز به اجزای کوچکتر (زیرحوضه و HRU) این امکان را فراهم می‌سازد که تغییرات و تفاوت‌ها در میزان تبخیر و تعرق برای هر خاک و هر گیاه، مشخص و قابل بازتاب باشد. از سوی دیگر مقدار رواناب ابتدا برای هر HRU به صورت جداگانه محاسبه و سپس میزان رواناب برای کل حوضه آبریز تعیین می‌شود که این امر امکان تفسیر بهتر از فرآیندهای فیزیکی رخ داده در سطح حوضه آبریز را میسر می‌کند (۲۲).

یکی از ویژگی‌های مهم مدل SWAT شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه است. علاوه بر آن به علت دسترسی رایگان و کد باز بودن مدل SWAT، کاربر می‌تواند باتوجه به نیاز و ویژگی منطقه مطالعاتی خود تغییراتی را در مدل ایجاد نماید. به‌طور مثال کاربر می‌تواند با تغییر در کدهای مدل SWAT کل مؤلفه تبخیر و تعرق را به اجزای آن مانند تبخیر از خاک، تبخیر از برگاب و تعرق تفکیک کرده و زمینه استخراج اطلاعات صفحه تبخیر و تعرق چارچوب +WA را فراهم نماید. در مدل SWAT امکان اعمال انواع سناریو و اقدامات مدیریتی به‌ویژه در بخش کشاورزی (مانند ایجاد سناریوهای بدون آبیاری برای تفکیک میزان تبخیراز آب سبز و آبی) وجود داشته و می‌تواند به ارزیابی وضعیت حوضه کمک شایانی نماید. مزیت دیگر این مدل امکان شبیه‌سازی توأمان رواناب، نفوذ و آب زیرزمینی است که می‌تواند در بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی کمک بسزایی نماید. یکی از قابلیت‌های دیگر مدل SWAT که در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است امکان ایجاد باندهای ارتفاعی در مناطق کوهستانی به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر ارتفاع بر تغییرات دما و بارش در سطح حوضه است.

آماده‌سازی و اجرا مدل SWAT-FARS و استخراج اطلاعات چارچوب +WA

آماده‌سازی مدل SWAT-FARS به‌منظور استخراج اطلاعات چارچوب +WA با جمع‌آوری اطلاعات ایستگاه‌های بارندگی، دماسنجی، آب‌سنجی، چاه‌های پیزومتری، اطلاعات مدیریتی کشاورزی، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و مدل ارتفاعی رقومی انجام گرفت. مدل SWAT از روی مدل ارتفاعی رقومی حوضه، شروع به ایجاد شبکه آبراهه‌ها، مرز حوضه، مرز زیرحوضه‌ها، نقطه خروجی هر زیرحوضه و خروجی اصلی حوضه آبریز فریزی کرد. به‌طوری که درنهایت در داخل حوضه، مجموعه‌ای متشکل از ٤٧٥ واحد پاسخ هیدرولوژیک در ٢٤ زیر حوضه ایجاد شد. پس از آن اطلاعات اقلیمی و اطلاعات مربوط به مدیریت محصولات در مدل اعمال شد. به‌منظور شبیه‌سازی بهتر تغییرات بارش، دما و همچنین بودجه برفی، در ١٧ زیرحوضه از مجموع ٢٤ زیرحوضه آبریز فریزی ٥ باند ارتفاعی ایجاد گردید. سپس روند واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT مطابق شکل (٣) صورت پذیرفت. دراین پژوهش، دوره شبیه‌سازی مدل بین سال‌های ١٣٦٥ تا ١٣٩٥ درنظرگرفته شد. در دوره شبیه‌سازی، سه سال اول (١٣٦٧-١٣٦٥) به‌عنوان دوره گرم کردن (Warm Up Period)، یک دوره ٢٥ ساله (١٣٩٢-١٣٦٨) برای واسنجی و یک دوره ٣ ساله (١٣٩٣-١٣٩٥) برای اعتبارسنجی مدل در نظرگرفته شد. دوره گرم کردن، دوره‌ای برای سازگار کردن مدل با شرایط موجود و اولیه حوضه، تعیین اولیه ضرایب پارامترها و برای رساندن مدل به شرایط بهینه است. زمانی که مدل به حالت بهینه می‌رسد پاسخ مدل واقع‌بینانه‌تر (پایدارتر) می‌شود و متغیرهای هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده مطابقت بهتری با داده‌های مشاهداتی دارند (١٧).

مدل SWAT می‌تواند براساس شاخص سطح برگ ((Leaf Area Index (LAI))، تبخیر از تاج پوشش برگ (برگاب)، تعرق و تبخیر از خاک را به صورت مجزا از هم شبیه‌سازی کند. این مدل باوجود شبیه‌سازی مجزا نتیجه را به صورت تفکیک‌شده در خروجی نشان نمی‌دهد و همگی را در



شکل ۳. روند واسنجی مدل SWAT در پژوهش حاضر

قالب تبخیر و تعرق گزارش می‌نماید. در این راستا دلاور و همکاران (۳) با تغییر در کدهای فرترن مدل SWAT، مدل ارتقایافته‌ای به نام SWAT-FARS را به‌منظور تطبیق با شرایط محدوده مطالعاتی خود (حوضه آبریز طشک- بختگان) توسعه دادند تا بتوانند عواملی نظیر تبخیرو تعرق را به مؤلفه‌های آن تفکیک نمایند. در پژوهش حاضر نیز از مدل SWAT-FARS به‌منظور نمایش مجزای تبخیر از خاک، تعرق و تبخیر از برگاب استفاده شد. بعد از اجرا مدل SWAT-FARS، به‌منظور استخراج تبخیر و تعرق طبیعی اراضی مدیریت شده آبی در صفحه منابع- مصارف می‌بایست تبخیر ناشی از آبیاری حذف شود. بدین‌منظور یک سناریوی بدون آبیاری برای مدل تعریف شد. در گام نهایی با توجه به خروجی‌های مدل و براساس دو سناریو پایه (با اعمال آبیاری) و سناریو بدون آبیاری اطلاعات و شاخص‌های صفحات چارچوب حسابداری آب +WA استخراج شدند.

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی دبی خروجی از حوضه آبریز فریزی

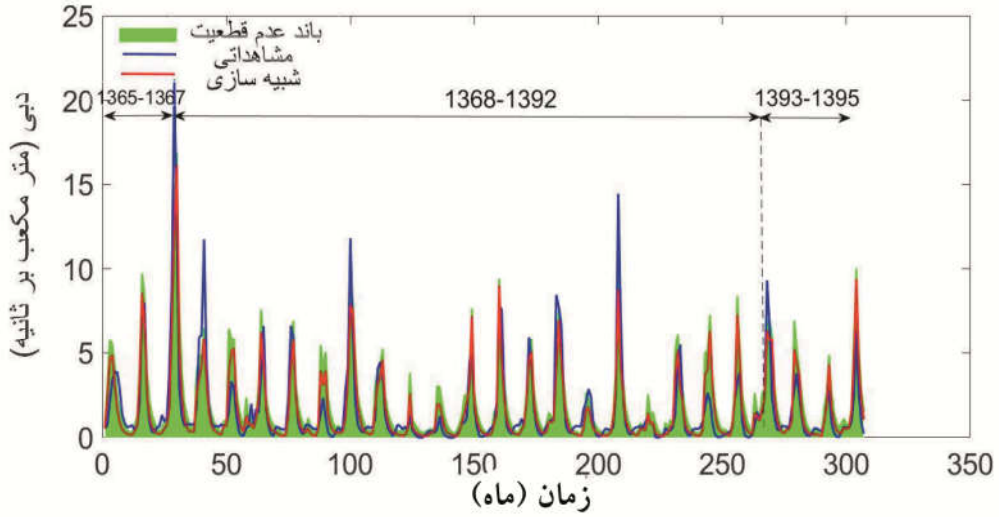
مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی دبی خروجی از حوضه آبریز فریزی (ایستگاه آب‌سنجی موشنگ) در شکل (٤) نشان داده‌شده است. چنانچه در شکل نیز مشخص شده است، سال‌های ۱۳٦۷-۱۳٦۵ به‌عنوان دوره گرم‌کردن مدل مورداستفاده قرار گرفت. همچنین سال‌های ۱۳۹۲-۱۳٦۸ به‌عنوان دوره واسنجی و سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۳ دوره اعتبارسنجی مدل را شامل می‌شود.

چنانچه در شکل (٤) مشخص شده است، مدل SWAT توانسته است مقادیر دبی پایه، دبی پیک و جریان متوسط ماهانه را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به خوبی شبیه‌سازی نماید. از طرفی همان طور که در شکل (٤) مشخص است، اکثریت جریان‌های ماهانه شبیه‌سازی شده در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند (P-factor=۰/٥٦) و ضخامت باند نیز در وضعیت مناسبی از لحاظ پراکندگی جریان‌های شبیه‌سازی شده قرار دارد (R-factor =۰/٤۷).

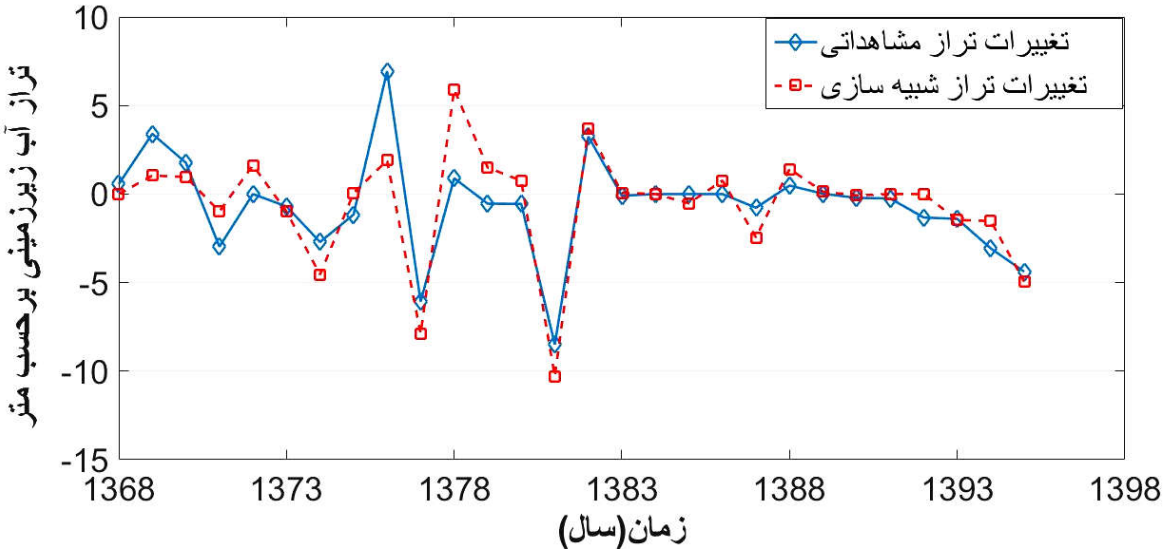
واسنجی و اعتبارسنجی تغییرات تراز آب زیرزمینی

همزمان با واسنجی مدل برای دبی خروجی حوضه و اطمینان از توانایی مناسب آن در شبیه‌سازی این دبی، واسنجی مدل به‌منظور برآورد مناسب تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی نیز انجام گرفت. شکل (۵) تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و مشاهداتی را در سطح حوضه آبریز فریزی نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد تغییرات تراز شبیه‌سازی شده آب زیرزمینی از روند تغییرات تراز مشاهداتی تبعیت می‌کند؛ اما در مقادیر پیک اختلاف چشمگیری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد که در کنار مقادیر پایین به‌دست آمده از شاخص‌های ضریب تعیین و نش- ساتکلیف در دوره واسنجی (NS =۰/٦۲ و R^2 =۰/٥٦) نشان‌دهنده ضعف مدل SWAT در برآورد میزان تغذیه آب زیرزمینی است. البته این نکته شایان ذکر است که اگرچه مقدار NS و R^2 به‌دست‌آمده برای شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی پایین است؛ اما این نتایج با توجه به مقادیر مرزی (NS=۰/٤ و R^2 = ۰/٥) ارائه شده توسط گرین و گرینسون (۲۳) و همچنین مقدار نش- ساتکلیف توصیه شده توسط موریاسی (۲٤) (NS≥ ۰/٥) در دامنه قابل قبول و رضایت‌بخش قرار دارد.

یکی از نکات مهم دیگری که باید مدنظر قرار گیرد این است که اگرچه مدل SWAT به‌طور کلی در شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی ضعیف عمل می‌کند؛ اما این مدل با شبیه‌سازی توأمان رواناب، نفوذ و آب زیرزمینی نقش مهمی در بررسی اندرکنش آب سطحی و آب زیرزمینی ایفا می‌کند. بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی نقش بسزایی در برآورد دقیق دبی پایه دارد. در شکل (٤) نیز مشخص است مقادیر دبی پایه برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌دلیل درنظرگرفتن اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی به خوبی



شکل ٤. مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی دبی خروجی از حوضه آبریز فریزی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و مشاهداتی در حوضه آبریز فریزی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

شبیه‌سازی شده است. اهمیت بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در حوضه‌هایی که ناحیه اشباع فاصله زیادی از سطح زمین نداشته و یک لایه نفوذناپذیر در عمق کم قرار گرفته است بیش‌تر نمود پیدا می‌کند. دلیل اهمیت این موضوع آن است که در این نوع حوضه‌ها آب از ناحیه اشباع از طریق صعود موئینگی به سمت بالای لایه غیر اشباع حرکت می‌کند و سهم زیادی در تشکیل جریان پایه دارد (۲۲). در حوضه آبریز فریزی بافت خاک (با توجه به شکل (۲)) لومی و لومی- رسی است و این نوع بافت خاک در گروه هیدرولوژیکی C قرار دارد. خاک‌های گروه هیدرولوژیک C به این دلیل که عمدتاً دارای یک لایه غیر قابل نفوذ در تحت‌الارض هستند و شدت نفوذپذیری کمی دارند باعث ایجاد یک ناحیه اشباع در نزدیکی

سطح زمین می‌شوند به همین دلیل بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در آن‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.

واسنجی عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی

پس از واسنجی دبی و تغییرات تراز آب زیرزمینی، مدل با استفاده از آمار متوسط سالانه عملکرد و میزان تبخیر و تعرق محصولات باغی عمده در منطقه واسنجی شد. میزان تبخیر و تعرق برای محصولات باغی حوضه آبریز فریزی از نرم‌افزار NETWAT استخراج شد. میزان عملکرد محصولات باغی حوضه آبریز فریزی نیز از سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی اخذ شد. در جدول (۳) مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات باغی عمده حوضه آبریز فریزی شامل سیب، گیلاس و گردو نشان داده‌شده است.

با توجه به جدول (۳)، مدل SWAT توانسته است به صورت رضایت‌بخشی میزان عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات عمده باغی در سطح حوضه آبریز فریزی را شبیه‌سازی نماید. یکی از دلایل اصلی کسب این نتایج مطلوب، گردآوری دقیق اطلاعات مربوط به شیوه‌های مدیریتی کشاورزی هر محصول (نظیر تاریخ کاشت، برداشت، آبیاری، کود شیمیایی) واعمال آن‌ها در مدل است.

در ادامه نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای حوضه آبریز فریزی در جدول (٤) گزارش شده است. با توجه به نتایج جدول (٤)، مدل SWAT توانسته است مقادیر رواناب، عملکرد محصولات و تبخیر و تعرق را براساس ضرایب تعیین (R^2) و نش- ساتکلیف (NS) به‌خوبی برآورد نماید. مدل SWAT بنا به دلایلی نظیر عدم پراکندگی مناسب چاه‌های پیزومتری در سطح حوضه، تقسیم‌بندی آبخوان‌ها بر حسب عمق، منطبق کردن مرز آبخوان با مرز واحدهای پاسخ هیدرولوژیک و با توجه به اینکه در واقعیت آبخوانی در حوضه آبریز فریزی وجود نداشت، نتوانست نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی را به خوبی برآورد کند.

حسابداری آب حوضه آبریز فریزی برمبنای نتایج مدل SWAT

نتایج این بخش بر اساس چارچوب حسابداری آب +WA در قالب سه گزارش منابع- مصارف، تبخیر و تعرق و برداشت ارائه و شرایط آبی حوضه ارزیابی شده است. تحلیل‌های مربوط علاوه بر کل دوره (۱۳٦۸-۱۳۹۵) به تفکیک در دو دوره زمانی تر (۱۳۷۵- ۱۳٦۸) و خشک (۱۳۸۷-۱۳۷٦) مورد بررسی قرارگرفته است. تفکیک دوره تر و خشک براساس میانگین متحرک ۵ ساله بارندگی ایستگاه آبقد (Abghad) در حوضه آبریز فریزی صورت گرفته است (شکل ٦). باتوجه به شکل (٦)، سال‌هایی که میانگین ۵ ساله بارندگی آن‌ها از میانگین بلندمدت حوضه بیشتر باشد در دوره ترسالی قرار دارند و سال‌هایی که میانگین ۵ ساله بارندگی آن‌ها از میانگین بلندمدت حوضه کم‌تر باشد در دوره خشکسالی قرار دارند.

گزارش صفحه منابع- مصارف

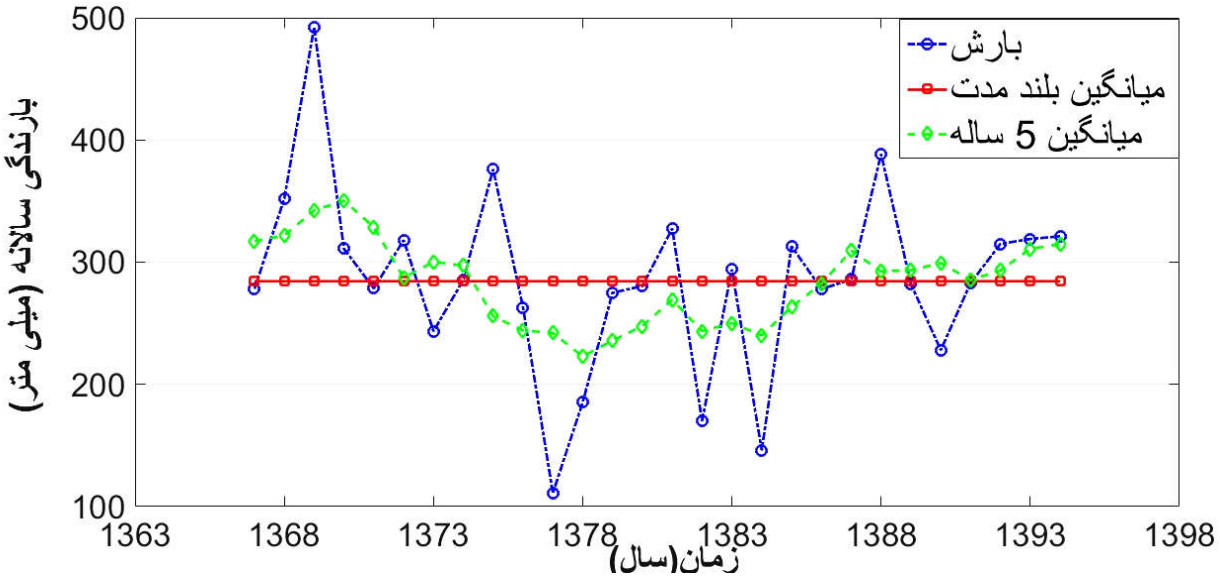
در این گزارش ابتدا مقدار حقابه زیست‌محیطی پایین‌دست حوضه آبریز فریزی براساس آمار دبی ماهانه بلند مدت ایستگاه آب‌سنجی موشنگ و با استفاده از روش منحنی تداوم جریان و براساس مقدار دبی که در ۹۰ درصد زمان‌ها در رودخانه جریان دارد برابر ۰/۰۱۳ کیلومترمکعب تعیین شد. در این صفحه تمامی مؤلفه‌ها از خروجی مدل SWAT استخراج شدند و سپس با توجه به ارتباط مستقیم مؤلفه تغییر ذخیره با برآورد آب زیرزمینی و به‌منظور جلوگیری از خطای احتمالی این مؤلفه با بستن بیلان به‌دست آمد. شکل ۷ گزارش صفحه منابع- مصارف را نشان می‌دهد. در شکل ۷، ورودی خالص، مجموع آب در دسترس حوضه شامل بارش و تغییرات ذخیره است. تبخیر و تعرق طبیعی اراضی (آب سبز)، تبخیرو تعرق در سطح اراضی بدون تأثیر مدیریت آبی است و یا به بیانی دیگر تبخیر و تعرق طبیعی اراضی در

جدول۳. مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و تبخیرو تعرق محصولات حوضه آبریز فریزی

		سیب	گیلاس	گردو
عملکرد (تن برهکتار)	مشاهداتی	۱۰	٤/۲٥	۳
	شبیه‌سازی	۸/۹٤	٤/۲۸	۳/۱۹
تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	مشاهداتی	۸۲۹	۷۷۳	۸۳۲
	شبیه‌سازی	۷۰٦/٤	۷۹٥/۲۹	۸٤٥/۳۱

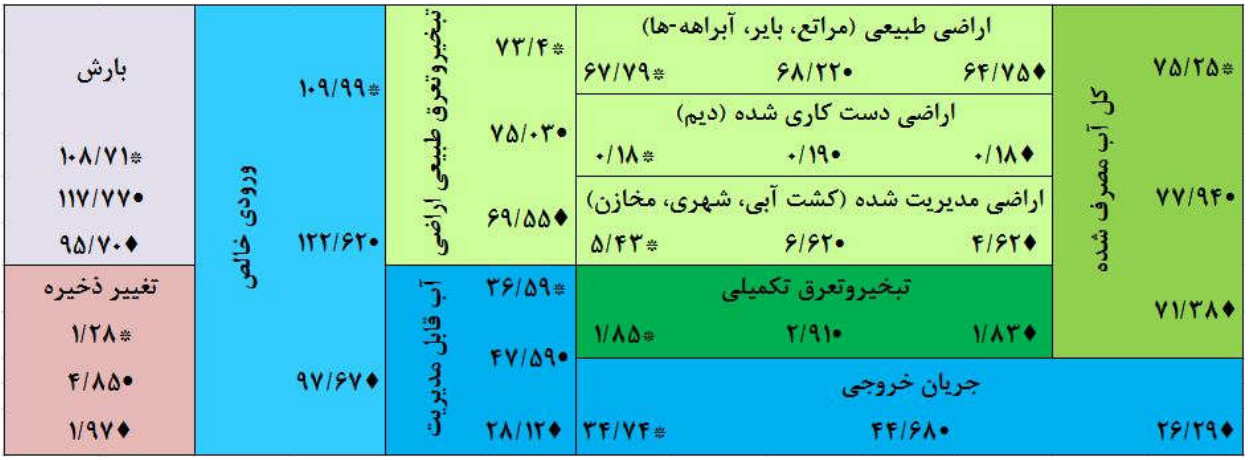
جدول٤. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای حوضه آبریز فریزی

پارامتر	دوره واسنجی (۱۳۹۲-۱۳٦۸)		دوره اعتبارسنجی (۱۳۹٥-۱۳۹۳)	
	R^2	NS	R^2	NS
دبی (رواناب سطحی)	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷٦	۰/۷۷
نفوذ و آب زیرزمینی	۰/٥٦	۰/٦۲	۰/٥٥	۰/۷
عملکرد محصولات	۰/۸۱	۰/۹۹	—	—
تبخیر و تعرق محصولات	۰/٦۷	۰/۷۸	—	—



شکل ٦. میانگین متحرک ٥ ساله بارندگی ایستگاه آبقد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتیجه تبخیر از بارش بر سطح حوضه است که بدون دخالت بشر انجام می‌شود. آب قابل مدیریت (آب آبی)، آبی است که برای مصرف در سطح حوضه و یا تأمین حقابه پایین‌دست در اختیار است. تبخیر وتعرق تکمیلی، بخشی از آب تخصیصی است که به‌واسطه تبخیرو تعرق کشت آبی ناشی از آبیاری از سیستم خارج شده است و کل آب مصرف‌شده، مجموع حجم



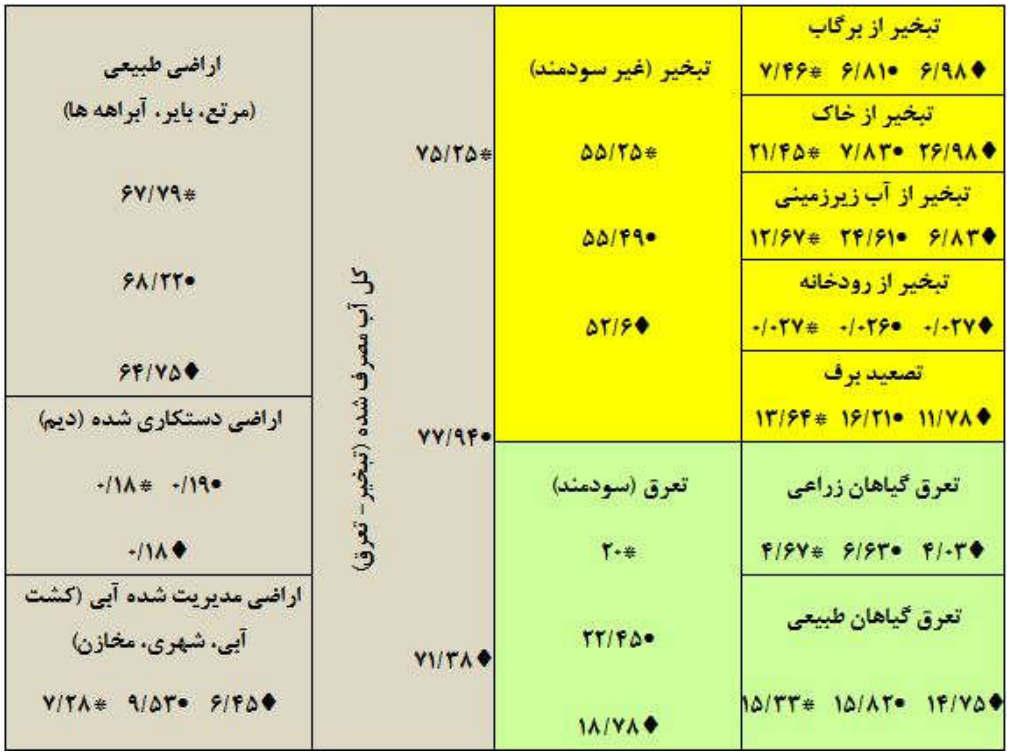
شکل ۷. گزارش صفحه منابع- مصارف چارچوب حسابداری +WA برای دوره‌های زمانی (*)۱۳۹۵-۱۳۶۸،(•) ۱۳۷۵-۱۳۶۸ (♦)۱۳۸۷-۱۳۷۶ تمامی واحدها بر حسب (10^3 km^3 / yr) هستند (رنگی در نسخه الکترونیکی)

آب خارج‌شده از سیستم آبی حوضه به‌واسطه تبخیرو تعرق در اراضی حوضه است. در گزارش منابع- مصارف، از دوره تر به خشک تغییر شرایط اقلیمی باعث کاهش حدود ۱۹ درصدی بارش ورودی به حوضه شده است. همچنین مؤثرترین مؤلفه خروجی در بیلان، تبخیر و تعرق می‌باشد که به‌طور متوسط سهمی درحدود ۷۰ درصدی از بارش کل حوضه آبریز فریزی را شامل می‌شود. مشابه این رفتار در پژوهش کریمی و همکاران (۱۳)، مربوط به ارزیابی حسابداری آب در حوضه دریاچه ارومیه نیز مشاهده شده است. اثر تغییر در شرایط اقلیمی حوضه، در تغییر مؤلفه آب قابل مدیریت خودنمایی می‌کند، به‌طوری که حجم آب قابل مدیریت از ۰/۰۴۷ کیلومتر مکعب در شرایط ترسالی به مقدار ۰/۰۲۸ کیلومتر مکعب در شرایط خشکسالی رسیده است. کاهش آب قابل مدیریت حوضه نیز باعث کاهش ۳۷ درصدی تبخیر و تعرق تکمیلی و کاهش ۴۱ درصدی جریان خروجی حوضه آبریز فریزی شده است. کاهش جریان خروجی نیز متقابلاً در تأمین حقابه پایین‌دست حوضه آبریز فریزی تأثیرگذار بوده است. همان‌طور که در نتایج گزارش شده مشخص است، در حوضه آبریز فریزی سهم تبخیر و تعرق اراضی طبیعی نظیر مراتع در مقایسه با اراضی مدیریت‌شده آبی (کشت آبی) بسیار بالاست. بنابراین، طبق برنامه ششم توسعه اهمیت پیاده‌سازی الگوی کشت بهینه به‌منظور مدیریت منابع آب، توسعه پایدار و افزایش تولید در بخش کشاورزی در حوضه فریزی احساس می‌شود. به همین‌منظور یکی از راهکارها برای کاهش مصرف آب و افزایش تولید و ارزش افزوده محصولات، می‌تواند تبدیل مراتع به زمین‌های زراعی باشد. در پژوهش دلاور و همکاران (۳)، در طشک- بختگان مشخص شد که تغییر الگوی کشت از برنج به گندم باعث کاهش برداشت آب کشاورزی و کاهش تبخیر و تعرق می‌شود. شاخص‌های قابل‌استخراج از گزارش صفحه منابع- مصارف حوضه آبریز فریزی در جدول (۵) ارائه شده‌اند. از بین شاخص‌های جدول (۵)، نسبت آب قابل مدیریت نشان‌دهنده بخشی از ورودی خالص حوضه است که تبخیر نشده و برای مصرف و تأمین حقابه‌های پایین‌دست و برداشت‌ها در دسترس است. مقدار این شاخص به علت کاهش نسبی بارندگی‌ها از ۳۹ درصد در دوره تر به ۲۹ درصد در دوره خشک کاهش پیدا کرده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که حوضه آبریز فریزی ۱۰ درصد از ظرفیت تولید منابع آبی قابل مدیریت خود را بر اثر کاهش نسبی بارندگی‌ها از دست‌داده است. از سوی دیگر نسبت آب قابل مصرف نشان‌دهنده مقدار آب قابل تخصیصی است که می‌تواند برای مصارف کشاورزی، صنعت و

جدول۵. شاخص‌های مستخرج از گزارش صفحه منابع- مصارف

عنوان شاخص	روش محاسبه	دوره	مقدار
نسبت آب قابل مدیریت	آب قابل مدیریت / آب ورودی خالص	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۳۳
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۳۹
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۲۹
نسبت آب قابل‌مصرف	تعهدات پایین دست – آب قابل مدیریت / آب قابل مدیریت	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۶۴
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۷۳
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۵۴
نسبت مصرف	تبخیر و تعرق تکمیلی / تعهدات پایین دست – آب قابل مدیریت	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۰۸
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۰۳
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۱۲
نسبت تأمین تعهدات پایین‌دست	جریان خروجی / تعهدات پایین دست	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۲/۶۷
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۳/۴۳
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۲/۰۲

خانگی در حوضه استفاده شود. میزان این شاخص در حوضه آبریز فریزی نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد از آب قابل مدیریت حوضه قابلیت تخصیص به بخش کشاورزی را دارد. شاخص بعدی نسبت مصرف حوضه است که نشان‌دهنده میزان آب قابل تخصیص مصرف شده در سطح حوضه است و امکان توسعه بیشتر حوضه را مشخص می‌نماید. نسبت پایین مصرف آب در حوضه آبریز فریزی امکان توسعه صنعت و کشاورزی را در این حوضه مشخص می‌نماید. مشابه این رفتار در حوضه رودخانه نیجر نیز مشاهد شده است و به امکان توسعه کشاورزی در آن به دلیل پایین بودن شاخص نسبت مصرف اشاره شده است (۶). نسبت پایین مصرف حوضه آبریز فریزی می‌تواند دلایلی نظیر کم‌بودن سطح زیر کشت محصولات باغی نسبت به مساحت کل حوضه، تلفات زیاد انتقال و کاربرد کانال‌های آبیاری، جریان خروجی بالا و جریان بالای آب بازگشتی باشد. شاخص نهایی در این گزارش نسبت تأمین تعهدات پایین دست (حقابه زیست‌محیطی پایین‌دست) است و نشان‌دهنده آن است که چه سهمی از تعهدات آبی پایین دست تأمین شده است. نتایج نشان می‌دهد که حوضه آبریز فریزی به‌طور متوسط حدود ۳ برابر تعهد آبی پایین‌دست را تأمین می‌کند. به‌طور مشابه در مطالعه فرخ‌نیا و همکاران (۷)، در حوضه دریاچه ارومیه مشخص شد که در دوره ترسالی (۱۳۶۷-۱۳۷۷) حدود ۲ برابر حقابه دریاچه ارومیه تأمین می‌شود. در پژوهش‌های صورت گرفته توسط کریمی و همکاران (۱۲ و ۱۳) در دریاچه ارومیه و کرخه جریان خروجی حوضه به‌ترتیب صرف تغذیه دریاچه ارومیه و تالاب هورالعظیم شده است، به‌طور مشابه جریان خروجی حوضه آبریز فریزی نیز می‌تواند با مدیریت مناسب صرف تغذیه آبخوان دشت مشهد- چناران شود.



شکل ۸. گزارش صفحه تبخیر و تعرق چارچوب حسابداری +WA برای دوره‌های زمانی(*)۱۳۹۵-۱۳۶۸،(•)، (●) ۱۳۷۵-۱۳۶۸ (♦)۱۳۸۷-۱۳۷۶ تمامی واحدها بر حسب (10^3 km^3 / yr) هستند (رنگی در نسخه الکترونیکی)

گزارش صفحه تبخیر و تعرق

این گزارش، شامل تفکیک مصارف آب در سطح حوضه و در دو بخش قابل مدیریت و غیر قابل مدیریت آن است. شکل (۸) وضعیت حوضه آبریز فریزی را از منظر این گزارش برای کل دوره و دو دوره تر و خشک نشان می‌دهد. در شکل (۸)، اراضی طبیعی، اراضی هستند که تبخیر و تعرق آنها تحت تأثیر مدیریت انسان نیست. اراضی دست‌کاری شده، اراضی هستند که تبخیرو تعرق آنها به‌صورت غیرمستقیم تحت مدیریت انسانی است. اراضی مدیریت‌شده آبی، اراضی هستند که تمام یا بخشی از تبخیر و تعرق در آنها تحت تأثیر اعمال مدیریت آبی (آبیاری) قرار دارد و کل آب مصرف‌شده، حجم آبی است که از سطح حوضه به‌واسطه تبخیر و تعرق خارج می‌شود. براساس نتایج حاصل در گزارش تبخیر و تعرق، تغییرات عمده این بخش در مصارف بخش اراضی مدیریت‌شده آبی بوده که ۳۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد که می‌تواند حاصل کاهش بارندگی حوضه و کاهش آب مصرف‌شده، ناشی از آبیاری کمتر باشد. در بخش مصارف غیر سودمند حوضه، مهم‌ترین مؤلفه برای دوره خشکسالی مربوط به تبخیر از خاک بوده و مشابه این میزان تبخیر از خاک در حوضه ایندوس نیز مشاهده شده است (۱۵). در بخش مصارف غیر سودمند حوضه برای دوره ترسالی نیز مهم‌ترین مؤلفه مربوط به تبخیر از آب زیرزمینی است. به همین‌دلیل باید تبخیر از خاک با فرآیندی نظیر مالچ‌پاشی کاهش یابد. کاهش تبخیر از خاک با استفاده از مالچ کاهی در پژوهش کریمی و همکاران (۱۵) و ژانگ و همکاران (۳۰) توصیه و به کار گرفته شده است. از طرفی تبخیر زیاد آب زیرزمینی در دوره ترسالی نتیجه بالاآمدن سطح آب زیرزمینی به دلیل افزایش بارندگی و افزایش نفوذ عمقی در اثر آبیاری زیاد است. به‌همین دلیل باید سطح ایستابی آب زیرزمینی با احداث سیستم‌های زهکشی کنترل شده و از بالاآمدن بیش از حد آن جلوگیری شود. کاهش تبخیر از آب زیرزمینی با احداث سیستم‌های

جدول٦. شاخص‌های مستخرج از گزارش صفحه تبخیر و تعرق

عنوان شاخص	روش محاسبه	دوره	مقدار
نسبت تعرق (سودمندی مصرف)	تعرق / کل تبخیر و تعرق	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۲۷
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۲۹
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۲۶
نسبت مصارف مدیریت‌شده	تبخیر و تعرق اراضی مدیریت شده / کل تبخیر و تعرق	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۱
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۱۲
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۰۹
نسبت تبخیروتعرق کشاورزی	تبخیر و تعرق کشاورزی / کل تبخیر و تعرق	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۱
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۱۲
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۰۹
نسبت تبخیروتعرق کشاورزی آبی	تبخیر و تعرق کشاورزی آبی / تبخیر و تعرق کشاورزی	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۹۷
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۹۸
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۹۷

زهکشی زیرسطحی توسط اسمدما (۲۵)، فرخ‌نیا و همکاران (۷) و کارگروه احیای دریاچه ارومیه توصیه و به کار گرفته شده است.

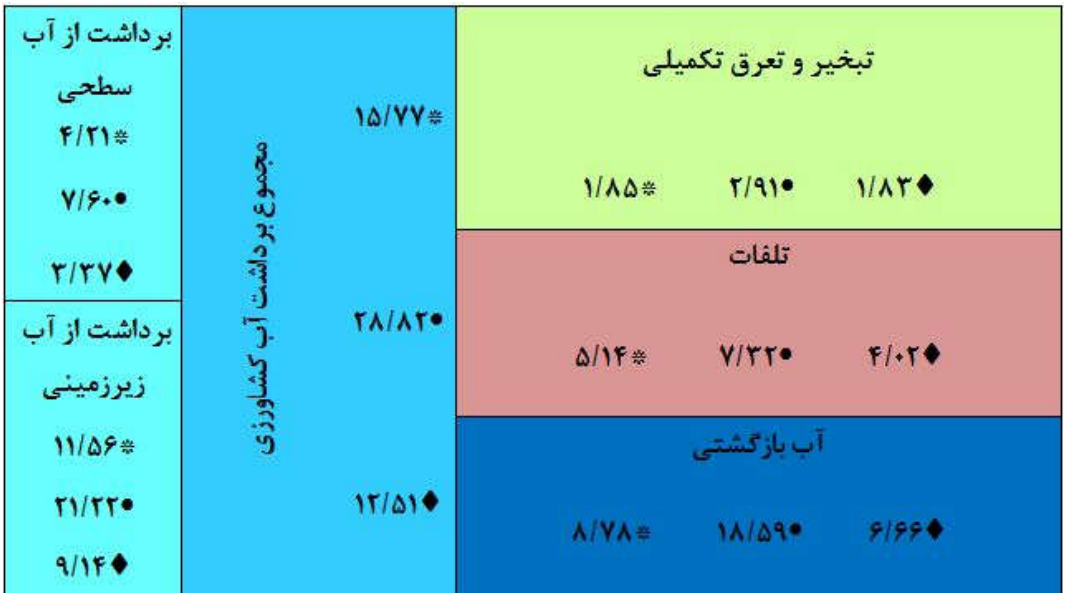
شاخص‌های قابل‌استخراج از گزارش صفحه تبخیرو تعرق حوضه آبریز فریزی در جدول (٦) ارائه شده‌اند. از بین شاخص‌های جدول (٦)، نسبت تعرق نشان‌دهنده سهم مصارف سودمند آب برای تولیدات گیاهی شامل زراعی و طبیعی، از کل مصارف آب حوضه می‌باشد. مقدار شاخص برای دوره‌های زمانی اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۲۹ درصد و ۲٦ درصد است. کاهش میزان تعرق در دوره دوم به علت کم‌شدن آب در دسترس برای گیاه، به‌منظور انجام عمل فتوسنتز است. گیاه در شرایط کم‌آبی دچار تنش آبی شده و برای حفظ خود روزنه‌های خود را بسته تا عمل تعریق صورت نگیرد. از طرفی دیگر نسبت مصارف مدیریت شده نشان می‌دهد چه نسبتی از مصارف آب حوضه در اراضی تحت مدیریت انسان (اراضی فاریاب) مصرف شده است. مقدار شاخص برای دوره اول برابر با ۱۲ درصد بوده و بدین معنی است که کمتر از یک‌ششم از مصرف آب حوضه در اراضی تحت مدیریت صورت گرفته است. شاخص بعدی نسبت تبخیر و تعرق کشاورزی است که نشان دهنده نسبت مصرف آب منجر به تولید محصولات کشاورزی به کل مصرف آب حوضه است. مقدار این شاخص برای دوره‌های اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۱۲ و ۹ درصد به‌دست‌آمده که نشان‌دهنده سهم کم تبخیر و تعرق کشاورزی در مصارف حوضه است. شاخص نهایی نسبت تبخیر و تعرق کشاورزی آبی است و مبین آن است که چه نسبتی از مصارف آب بخش کشاورزی از آبیاری تأمین‌شده است. مقدار این شاخص برای حوضه آبریز فریزی نشان می‌دهد که تقریباً تمام نیاز آب بخش کشاورزی حوضه آبریز فریزی از آبیاری تأمین می‌شود. براساس نتایج و شاخص‌های استخراج شده در گزارش تبخیر و تعرق می‌توان بدین نتیجه رسید که حوضه آبریز فریزی علاوه بر اصلاح الگوی کشت نیازمند اجرا برنامه‌هایی به‌منظور بهبود عملکرد محصولات و افزایش تعرق (سودمندی مصرف) در

سطح حوضه است. در این راستا، استدیوتو و همکاران (۲۶)، عنوان کردند که با بهبود عملکرد محصولات، تعرق نیز افزایش می‌یابد و همین رابطه اساس مدل تجربی Aquacrop را تشکیل می‌دهد. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادشده توسط استدیوتو و همکاران (۲۶) برای بهبود عملکرد محصولات، توزیع یکنواخت آب در سطح مزرعه یا باغ با استفاده از تسطیح زمین و اجرا سیستم‌های قطره‌ای است. توزیع یکنواخت آب علاوه بر کاهش مصرف آب، می‌تواند با تأمین منبع آب قابل اطمینان در طول کل رشد محصول از مواجه‌شدن محصولات با تنش آبی جلوگیری کند و بدین واسطه عملکرد و درنتیجه تعریق را در سطح حوضه افزایش دهد.

گزارش صفحه برداشت

این گزارش اطلاعات مربوط به مقدار برداشت آب از منابع مختلف، تلفات و آب بازگشتی را در قالبی استاندارد ارائه می‌دهد. شکل (۹) گزارش برداشت دوره‌های زمانی مورد بررسی را برای حوضه آبریز فریزی نشان می‌دهد. در این صفحه تمامی مؤلفه‌ها از خروجی مدل SWAT استخراج شدند و سپس با توجه به ارتباط مستقیم مؤلفه آب بازگشتی با برآورد آب زیرزمینی و به‌منظور جلوگیری از خطا احتمالی، این مؤلفه با بستن بیلان به‌دست آمد. در شکل (۹) تبخیرو تعرق تکمیلی، بخشی از آب برداشت‌شده است که به‌واسطه تبخیر و تعرق کشت آبی از سیستم خارج شده است. تلفات آبیاری، بخشی از آب آبیاری است که در فاز انتقال و یا کاربرد، پیش از ورود به خاک و شرکت در فرآیند تبخیرو تعرق گیاهان، به‌صورت تلفات واقعی از سیستم حوضه خارج می‌شود. جریان بازگشتی، بخشی از آب آبیاری است که مصرف نشده و به منابع سطحی یا زیرزمینی حوضه بازمی‌گردد. براساس نتایج حاصل از گزارش برداشت، مقدار برداشت از منابع زیرزمینی و کل برداشت برای آبیاری به علت کاهش بارندگی و در نتیجه کم‌شدن آب قابل تخصیص حوضه آبریز فریزی ۵۶ درصد در دوره خشکسالی نسبت به دوره ترسالی کاهش یافته است. از طرفی مقدار مصارف آب (تبخیرو تعرق تکمیلی) ۴۵ درصد و تلفات درحدود ۳۷ درصد کاهش را در دوره دوم نشان می‌دهد.

شاخص‌های قابل‌استخراج از گزارش صفحه برداشت حوضه آبریز فریزی در جدول (۷) ارائه شده‌اند. از بین شاخص‌های جدول (۷)، نسبت برداشت از آب زیرزمینی نشان می‌دهد که میزان اتکای آب برداشتی برای آبیاری در سطح حوضه آبریز فریزی به منابع آب زیرزمینی زیاد است. از طرفی راندمان مزرعه نسبت مقدار تبخیر وتعرق ناشی از آبیاری در اراضی کشاورزی نسبت به‌کل آب برداشت‌شده را نشان می‌دهد. مقدار پایین راندمان مزرعه در حوضه آبریز فریزی می‌تواند به علت شیوه آبیاری غرقابی باشد. شاخص بعدی راندمان حوضه‌ای است و نشان می‌دهد که چه میزان از آبی که در اراضی فاریاب مصرف شده، صرف تبخیرو تعرق گیاهان زراعی شده است. مزیت این شاخص، تفاوت قائل‌شدن بین مصرف و برداشت و به تبع آن در نظرگرفتن سهم آب بازگشتی و عدم لحاظ‌کردن آن به‌عنوان تلفات واقعی آب برداشت‌شده برای آبیاری است. شاخص نهایی نسبت آب بازگشتی است و نشان‌دهنده نسبت آب بازگشتی به‌کل آب برداشت‌شده از منابع مختلف می‌باشد. مقدار این شاخص برای دوره اول ٦٤ درصد و برای دوره دوم ۵۳ درصد به‌دست آمده است. مقدار زیاد آب بازگشتی به‌دست آمده در حوضه آبریز فریزی نشان می‌دهد که سهم بزرگی از آب قابل تخصیص حوضه مربوط به این بخش بوده و در نظر گرفتن آن می‌تواند نقش مهمی در مدیریت مناسب منابع آبی حوضه آبریز فریزی ایفا کند. براساس نتایج و شاخص‌های استخراج شده از گزارش برداشت، می‌توان به این نتیجه رسید که به علت استفاده از شیوه آبیاری غرقابی میزان راندمان آبیاری در سطح حوضه پایین است و به همین‌دلیل حوضه آبریز فریزی نیاز به ایجاد سیستم‌های آبیاری با راندمان بالا دارد. یکی از راهکارهایی که در این زمینه توصیه می‌شود تغییر شیوه‌های آبیاری سنتی نظیر غرقابی به سیستم‌های آبیاری نوین و تحت فشار است. در این راستا، در مطالعه دلاور و همکاران (۳) و پری و همکاران (۲٤) مشخص شد که اجرا سیستم‌های آبیاری



شکل ۹. گزارش صفحه برداشت چارچوب حسابداری +WA برای دوره‌های زمانی(*)۱۳۹۵-۱۳۶۸،(●) ۱۳۷۵-۱۳۶۸ (♦)۱۳۸۷-۱۳۷۶. تمامی واحدها بر حسب (10^3 km^3 / yr) هستند. (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول۷. شاخص‌های مستخرج از گزارش صفحه برداشت

عنوان شاخص	روش محاسبه	دوره	مقدار
نسبت برداشت آب زیرزمینی	برداشت از آب زیرزمینی / مجموع برداشت آب کشاورزی	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۷۳
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۷٤
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۷۳
راندمان مزرعه	تبخیر و تعرق تکمیلی / مجموع برداشت آب کشاورزی	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۱۲
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۱
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۱۵
راندمان حوضه‌ای	تبخیر و تعرق تکمیلی / آب برگشتی – مجموع برداشت آب کشاورزی	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۲۷
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/۲۸
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۳۱
نسبت آب بازگشتی	آب بازگشتی / مجموع برداشت آب کشاورزی	۱۳۶۸-۱۳۹۵	۰/۵۵
		۱۳۶۸-۱۳۷۵	۰/٦٤
		۱۳۷۶-۱۳۸۷	۰/۵۳

تحت فشار و بهبود راندمان آبیاری، آب بیشتری را در اختیار کشاورزان قرار می‌دهد و اگر اقدامات مدیریتی تخصیص منابع آب و کنترل برداشت اجرا نشود ایجاد سیستم‌های آبیاری تحت فشار نه تنها باعث صرفه‌جویی در منابع آبی حوضه نمی‌شوند

بلکه بر مصرف آب حوضه تأثیر منفی نیز می‌گذارند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از تلفیق مدل SWAT و چارچوب حسابداری آب +WA به‌منظور تشریح شرایط هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، کشاورزی و پایش و مدیریت یکپارچه منابع آبی حوضه آبریز فریزی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل SWAT توانسته است مقادیر رواناب، عملکرد محصولات و تبخیر و تعرق را براساس ضرایب تعیین (R^2) و نش- ساتکلیف (NS) به‌خوبی برآورد نماید. حصول این نتایج رضایت‌بخش ناشی از اعمال دقیق نحوه مدیریت محصولات در حوضه آبریز فریزی است. به‌طوری که اعمال مدیریت مناسب محصولات تأثیر مستقیمی بر روی تبخیر و تعرق داشته و از طرفی برآورد دقیق تبخیر و تعرق به‌عنوان جزء مهمی از بیلان آبی حوضه باعث بهبود نتایج شبیه‌سازی رواناب شده است. مدل SWAT با توجه به اینکه در شبیه‌سازی آب زیرزمینی، آبخوان‌ها را تنها بر حسب عمق تقسیم‌بندی می‌نماید و مرز آبخوان را بر حسب مرز واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU) در نظر می‌گیرد و با توجه به عدم توزیع مناسب چاه‌های پیزومتری در سطح حوضه نتوانست در برآورد نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز فریزی خیلی موفق عمل کند. البته مقادیر به‌دست آمده برای شبیه‌سازی نفوذ و آب زیرزمینی حوضه آبریز فریزی براساس ضریب تعیین و نش-ساتکلیف (NS =۰/٦۲ و R^2=۰/٥٦) بر طبق نظر مراجعی نظیر موریاسی در دامنه قابل قبول قرار داشت. با این حال به‌منظور احتیاط و جلوگیری از بروز خطای احتمالی، مؤلفه‌های هیدرولوژیکی تغییر ذخیره و آب بازگشتی که ارتباط مستقیمی با برآورد آب زیرزمینی دارند پس از تعیین تمام مؤلفه‌ها در صفحات منابع- مصارف و برداشت و از طریق بستن بیلان در صفحات مذکور به‌دست آمدند. به‌منظوربررسی بهتر تغییرات سطح آب زیرزمینی در سطح حوضه آبریز فریزی احداث چاه‌های پیزومتری با پراکندگی مناسب در سطح حوضه اکیداً توصیه می‌شود. یکی از نکات بسیار مهم در پژوهش حاضر توانایی مدل SWAT در بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی بود که تأثیر آن بر روی برآورد دقیق دبی پایه مشهود بود. بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی توسط مدل SWAT در حوضه‌هایی مانند فریزی که لایه‌های خاک اغلب یک دارای یک لایه غیر قابل نفوذ در تحت الارض هستند و شدت نفوذپذیری کمی دارند، به شدت پیشنهاد می‌شود. دلیل این امر، تشکیل یک ناحیه اشباع در نزدیکی سطح زمین، ایجاد جریان جانبی و سهم زیاد جریان جانبی در ایجاد دبی پایه است.

از اطلاعات و شاخص‌های به‌دست آمده از چارچوب حسابداری آب +WA نیز این‌گونه برداشت می‌شود که تغییر وضعیت از ترسالی به خشکسالی باعث کاهش ۱۹ درصدی بارش و ۸ درصدی کل آب مصرفی حوضه شده است. از طرفی نتایج گویای این است که جریان خروجی حوضه آبریز فریزی حدود ۳ برابر حقابه پایین‌دست را تأمین می‌کند. این حقابه می‌تواند صرف تغذیه آبخوان، حفظ پایداری سیستم منابع آب، حفظ اکوسیستم طبیعی و نگه‌داری رودخانه در سطح متعادلی از شوری و کیفیت و موارد مشابه شود. رودخانه فریزی نقش مهمی در تغذیه آبخوان دشت مشهد- چناران دارد و این جریان خروجی از حوضه آبریز فریزی می‌تواند با توجه به مصوبات شورای عالی آب، در بحث تعادل‌بخشی به منابع آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان دشت مشهد- چناران نقش بسزایی را ایفا کند. همچنین، براساس اطلاعات و شاخص‌ها مشخص شد که تبخیر از خاک در دوره خشکسالی و تبخیر از آب زیرزمینی در دوره ترسالی مهم‌ترین مؤلفه‌های مصارف غیرسودمند حوضه را تشکیل می‌دهند. در این راستا مطالعات مشابه، پیشنهاداتی نظیر مالچ‌پاشی و احداث سیستم‌های زهکشی زیرسطحی را به‌منظور کاهش تبخیر از خاک و تبخیر از آب زیرزمینی ارائه داده‌اند که میزان تأثیر این فرآیندها در کاهش تبخیر می‌تواند در سطح حوضه آبریز فریزی مورد ارزیابی قرار گیرد. بحث مهم دیگر در

حوضه آبریز فریزی پایین‌بودن راندمان آبیاری و بالا بودن تلفات کانال‌های کشاورزی است. به همین دلیل این حوضه نیاز به ایجاد سیستم‌های آبیاری با راندمان بالا و ایجاد پوشش بتنی و طراحی سطح مقطع مناسب به‌منظور کاهش تلفات کانال‌های کشاورزی دارد. در بین سیستم‌های آبیاری، سیستم‌های آبیاری تحت فشار می‌توانند به دلیل جلوگیری از نفوذ عمقی، بر تغذیه آبخوان‌ها تأثیر منفی گذاشته و جریان آب بازگشتی را نیز کاهش دهند. کاهش جریان آب بازگشتی نیز اگر در حوضه‌ای همراه با کاهش برداشت آب نباشد، منجر به افزایش مصارف آب در سطح حوضه و برهم‌خوردن بیلان آبی حوضه می‌شوند. در این‌راستا، ایجاد سیستم‌های آبیاری تحت فشار در حوضه آبریز فریزی می‌بایست تحت عنوان یک سناریو مطرح شوند و اثرات مثبت و منفی آن بر بیلان آبی حوضه آبریز فریزی مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

یکی دیگر از پیشنهادات کاربردی مستخرج از پژوهش باتوجه به سهم بالای تبخیر(مصارف غیرسودمند) از کل آب مصرفی حوضه و همچنین مقدار پایین به‌دست آمده برای شاخص نسبت مصرف آب در سطح حوضه، اصلاح الگوی کشت مطابق با برنامه ششم توسعه کشور است. بدین‌منظور توصیه می‌شود برنامه مدونی برای اصلاح الگوی کشت با توجه به ویژگی‌های حوضه و مشارکت تمام ذی‌نفعان و آب‌بران تنظیم شود و قبل از اجرا، در قالب سناریو تغییر کاربری اراضی در مدل SWAT اجرا و اثرات آن مورد بررسی قرار گیرد. به‌طور کلی تلفیق مدل SWAT و چارچوب حسابداری آب WA+توانست در پایش و ارزیابی حوضه آبریز فریزی به‌عنوان یک حوضه به‌نسبت کوچک، کوهستانی و مبتنی بر کشاورزی آبی موفق عمل کند. بنابراین، استفاده از این رویکرد تلفیقی در مناطق مطالعاتی دیگر با شرایط جغرافیایی مشابه توصیه می‌شود. باتوجه به ویژگی‌های چارچوب WA+ و قابلیت استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور پیشنهاد می‌شود، مؤلفه‌های هیدرولوژیکی صفحات منابع- مصارف و تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش‌ازدور استخراج شده و با مقادیر به‌دست آمده از مدل SWAT در حوضه آبریز فریزی مقایسه شود. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در بحث مدیریت یکپارچه منابع آب، توجه به مدیریت تقاضا بسیار حائز اهمیت خواهد بود. توجه به مدیریت تقاضا و ارائه راه‌کارهایی برای صرفه‌جویی در مصرف آب به ویژه در بخش کشاورزی، کاهش تلفات و افزایش راندمان مصرف می‌تواند در توسعه پایدار حوضه نقش مؤثری را ایفا کند. در انتها انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش بتواند گامی مؤثر در راستای مدیریت یکپارچه منابع آبی بالاخص در کشورهای خشک و نیمه-خشک جهان نظیر ایران که از تنش و بحران آبی رنج می‌برند بردارد و به مدیران محلی و بین‌المللی در اتخاذ تصمیمات و حکمرانی مناسب آب حوضه کمک نماید.

منابع مورد استفاده

1. Agarwal, A., M. S Delos Angeles, R. Bhatia, I. Chéret, S. Davila-Poblete, M. Falkenmark, F. G. Villarreal, T. Jønch-Clausen, M. A. Kadi and J. Kindler. 2000. Integrated Water Resources Management. Global water partnership, Sweden, Stockholm.
2. Betrie, G. D., Y. A. Mohamed, A. van Griensven and R. Srinivasan. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 807-818.
3. Delavar, M., S. Morid, R. Morid, A. Farokhnia, F. Babaeian, R. Srinivasan and P. Karimi. 2020. Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology* 585: 124762.
4. FAO and IHE Delft. 2020. Water Accounting in the Awash River Basin. FAO WAPOR Water Accounting Reports. FAO publication, Rome.
5. FAO and IHE Delft. 2020. Water Accounting in the Jordan River Basin. FAO WAPOR Water Accounting Reports. FAO publication, Rome.
6. FAO and IHE Delft. 2020. Water Accounting in the Niger River Basin. FAO WAPOR Water Accounting reports. FAO publication, Rome.

7. Farokhnia, A., S. Morid, M. Delavar and K. Abbaspour. 2019. Development of SWAT-LU model for simulation of Urmia lake water level decrease and assessment of the proposed actions for its restoration: part3: Water accounting analysis and assessment of the proposed actions for restoration of Urmia lake. *Iranian journal of Irrigation and Drainage* 6(12): 1362-1380 (In Farsi).
8. Green. C. H. and A.V. Griensven. 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modeling and Software* 23: 422-434.
9. Grusson, Y., X. Sun, S. Gascoin, S. Sauvage, S. Raghavan, F. Anctil and J. M. Sáchez-Pérez. 2015. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an Alpine watershed. *Journal of Hydrology* 531: 574-588.
10. Hoekstra, A. Y. and M. M. Mekonnen. 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(9): 3232-3237.
11. Izady, A., K. Davary, A. Alizadeh, A. N. Ziaei, S. Akhavan, A. Alipoor, A. Joodavi and M. L. Brusseau. 2014. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeology Journal* 23: 47-68.
12. Karimi, P., D. Molden, W. Bastiaanssen and X. Cai. 2012. Water accounting to assess use and productivity of water: evolution of a concept and new frontiers. PP. 76-88. *In:* J. M. Godfrey and K. Chalmers (Eds.), Water Accounting: International Approaches to Policy and Decision-Making, Edward Elgar, UK, Cheltenham.
13. Karimi, P., S. Pareeth and C. Michailovsky. 2019. Rapid Assessment of the Water Accounts in Urmia Lake basin. Project report, IHE Delft, Netherland.
14. Karimi, P., W. G. Bastiaanssen, A. Sood, J. Hoogeveen, L. Peiser, E. Bastidas-Obando and R. Dost. 2015. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting-Part 2: Reliability of water acounting results for policy decisions in the Awash Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1): 533-550.
15. Karimi, P., W. G. Bastiaanssen, D. Molden. and M. J. M. Cheema. 2013. Basin-wide water accounting based on remote sensing data: an application for the Indus Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(7): 2473-2486.
16. Karimi, P., W.G. Bastiaanssen and D. Molden. 2012. Water Accounting Plus (WA+)-a water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(11): 2459-2472.
17. Kim, K. B., H. H. Kwon and D. Han. 2018. Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 556: 194-210.
18. Marek, G. W., P. H. Gowda, S. R. Evett, R. L. Baumhardt, D. K. Brauer, T. A. Howell, T. H. Marek and R. Srinivasan. 2016. Estimating evapotranspiration for dryland cropping systems in the semiarid Texas High plains using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association* 52: 298-314.
19. Molden, D. and R. Sakthivadivel. 1999. Water accounting to assess use and productivity of water. *International Journal of Water Resources Development* 15(1-2): 55-71.
20. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 885-900.
21. Narsimlu, B., A. K. Gosain, B. R. Chahar, S. K. Singh and P. K. Srivastava. 2015. SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari River Basin, India, using sequential uncertainty fitting. *Environmental Processes* 2(1):79-95.
22. Neitsch, S. I., J. G. Arnold, J. R. Kinrv and J. R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute, Texas.
23. Pedro-Monzonís, M., A. Solera, J. Ferrer, J. Andreu and T. Estrela. 2016. Water accounting for stressed river basins based on water resources management models. *Science of the Total Environment* 565: 181-190.
24. Perry, C., P. Steduto and F. Karajeh. 2017. Does Improved Irrigation Technology Save Water? A Review of the Evidence. FAO publication, Cairo.
25. Smedema, L. 2000. Irrigation-Induced River Salinization: Five Major Irrigated Basins in the Arid Zone. International Water Management Institute, Sri Lanka, Colombo.
26. Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437.
27. United Nations Statistics Division. 2012. System of Environmental-Economic Accounting for Water. United Nations publication, New York.
28. Velayati, S. A., H. Ghayour and S. Shafiea. 2004. Assesment of hydrological regims of Ferizi river and it's role in recharging aquifer of Mashhad plain. *Journal of Geography and Development* 2: 47-72 (In Farsi).
29. Water Accounting Standards Board. 2014. Water Accounting Conceptual Framework for the Preparation and Presentation of General Purpose Water Accounting Reports. Commonwealth of Australia, Canberra.
30. Zhang, X., D. Pei and C. Hu. 2003. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. *Irrigation Science* 21: 159-166.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 4, Winter 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Integrated Assessment of Ferizi Watershed Based on Water Accounting Framework Using SWAT Model

A. Rezapour[1], S. M. Hosseini[1]* and A. Izady[2]

(Received: December 13-2020; Accepted: April 13-2021)

Abstract

Integrated assessment of the watershed is critical in arid and semi-arid areas due to the severe water stress in these regions. Data and information are an essential part of decision making and water governance to obtain integrated water resources management at the watershed scale. Water accounting is a helpful tool to organize information and present them as the standard indicators to achieve this goal. Therefore, the objective of this study is to implement the Water Accounting Plus framework (WA+) in the Ferizi watershed located in the Khorasan-e Razavi Province. In this study, water accounting indicators of the Ferizi watershed for a period of 28 years (1990-2017) and wet (1990-1997) and dry (1998-2009) periods were calculated using the SWAT model. The calculated indicators showed that the amount of manageable water and usefulness of consumption (transpiration) is low in the watershed and a large part of the share of irrigation in the watershed is provided by groundwater resources. Generally, the results of this study showed that the use of the SWAT model, WA+ framework, and analysis of water accounting indicators play a significant role in assessing the agricultural and hydrological conditions of the watershed. The proposed approach in this study can help managers make enlightened decisions to keep the sustainability of the watershed.

Keywords: Integrated water resources management, WA+ Water accounting framework, SWAT model, Watershed

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Water Research Center, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman.
*: Corresponding author, Email: shossein@um.ac.ir