برآورد آب مجازی حوضه‌ی آبخیز و نقش آن در سامانه های انتقال آب بین حوضه‌ای

حمیدرضا دهقان منشادی[۱]، محمد حسین نیک سخن[*۲]، مجتبی اردستانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۴

چکیده

طرحهای انتقال آب علاوه بر هزینه های گزاف، همواره پیامد های زیست محیطی زیانباری را بر اقلیم حوضه‌های مبدا، مقصد، و بعضاً در طول مسیر انتقال، گذاشته‌اند. از طرفی، بحث مدیریت منابع آب در طرحهای انتقال آب، رویکرد سنتی خود را از دست داده و امروزه توجه مدیران به مسائلی مانند آب مجازی به منظور در نظر گرفتن کل توان آبی بیش از پیش معطوف گردیده است. در این مقاله ساختاری به منظور بررسی و تاثیر توانایی استفاده از آب مجازی حوضه‌ی مقصد در طرحهای انتقال آب پیشنهاد گردیده است. همچنین، سود حاصل از مدیریت آب با درنظرگرفتن توانایی استفاده از آب مجازی حوضه‌ی مقصد، و افزایش سهم آب‌بران حوضه‌ی مبدإ در سامانه های انتقال آب برآورد شده است. کارایی ساختار پیشنهادی در طرح انتقال آب از سولگان به رفسنجان ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آنند که هرچند حوضه‌ی مقصد تبخیر- تعرق بالایی داشته، و توان آب مجازی حوضه پایین می باشد، لکن علاوه بر کاهش هزینه های انتقال و پیامد های مضر انتقال آب برای منطقه، کشت و صنعت خوزستان و کشاورزی خوزستان توانستند به ترتیب ۱۸.۹ و ۷.۲۵ میلیارد ریال سود به‌دست آورند.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب بین حوضه ای، شبیه SWAT، آب مجازی، آب سبز، آب آبی، مدیریت منابع آب

[۱]- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی محیط زیست- منابع آب دانشگاه تهران

[۲]- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست دانشگاه تهران

[۳] - دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست دانشگاه تهران

[*]- نویسنده مسئول مقاله: Niksokhan@ut.ac.ir

مقدمه

طرحهای انتقال آب عملاً اسباب خشک شدن رودخانه‌های حیات بخش و تاریخ ساز کشور، نابودی حیات تالابها، به خطر افتادن محیط زیست و تنوع زیستی جانوری و گیاهی، بروز نارضایتیهای اجتماعی و ناپایداری سرزمین، خصوصاً در حوضه‌های مبدأ شده اند. پیشینه‌ی تاریخی طرحهای انتقال آب بین حوضه‌ای در جهان نیز بعضاً حکایت از پیامدهای دراز مدت ناگوار مانند رشد سریع و نامتوازن جمعیت در حوضه‌های مقصد، خشکی و یا کاهش شدید بده‌ی رودها، چشمه‌ها و سفره‌های زیر زمینی، نابودی باتلاها و تالابها، و بروز فجایع زیست محیطی جبران‌ناپذیر و صرف هزینه‌های زیاد، بروز مشکلات اجتماعی و جابه‌جایی سنگین آبگیرها و مسیرهای انتقال داشته است. آنچه در سالهای اخیر در بعضی مناطق کشور رخ داده و سبب خشکی و کاهش بده‌ی رودها و چشمه‌ها، افت سطح آب زیر زمینی و یا مرگ تالابها شده است، ناشی از آن است که در دهه‌های اخیر، بدون توجه به داشته‌های محیطی و اقلیمی مناطق، و به بهانه‌ی اشتغال زایی و تنها با حمایتهای سیاسی، بزرگترین و پرمصرفتر صنایع کشور در چنین مناطقی مستقر شده‌اند. بر همین روال، به جای افزایش بازدهی آبیاری در بخش کشاورزی و کاهش ضایعات‌این بخش، تنها به افزایش سطوح زراعی و باغی برای دستیابی به تولید بیشتر پرداخته شده، و امروز چنین سرنوشتی ناگوار برای آن مناطق و مردمان شان رقم خورده است (خاکپور، ۱۳۹۱).

در اجرای طرحهای انتقال آب بین حوضه‌ای باید معیارهای یونسکو اعمال شود. معیار اول این سازمان جهانی برای طرحهای انتقال آب بین حوضه‌ای در سال ۱۹۹۹ چنین است: ناحیه‌ی مقصد باید پس از توجه به منابع جایگزین تأمین آب، و تمامی‌اقدامات منطقی برای کاهش تقاضای آب در تأمین نیازهای فعلی و پیش بینی شده، کمبود جدی داشته باشد تا طرح انتقال آب قابل توجیه گردد. در واقع، تأکید یونسکو بر انجام تمامی‌اقدامات منطقی کاهش تقاضای آب، نشان دهنده‌ی اولویت مدیریت تقاضا بر مدیریت عرضه می‌باشد، یعنی اگر کمبود آبی را بتوان با مدیریت تقاضا و هزینه‌های معقول حل کرد، به انتقال آب بین حوضه‌ای نیازی نخواهد بود. چنانچه با اعمال‌این موارد همچنان بحث انتقال آب مطرح باشد، در اجرای‌این طرحها در مرحله‌ی بعد، باید مباحث اجتماعی-فرهنگی، اقتصادی، زیست محیطی و تغییرات بنیادین و اساسی آن در حوضه‌های مبدأ و مقصد، مدنظر قرار گیرند (ابریشمچی و تجریشی، ۱۹۹۹). لذا، دراین مقاله، به منظور بررسی کل توان آبی حوضه‌ی مقصد، و کاهش حجم آب انتقالی در مدیریت تخصیص آب بین حوضه‌ای در قالب بررسی توانایی استفاده از آب مجازی این حوضه پرداخته شده است.

جهت انتقال آب بین حوضه‌ای معمولاً با استفاده از سفته و نهر، و در صورت نیاز، از بندهای انحرافی و ذخیره‌ای استفاده می شود(اخباری،۱۳۹۰). آسیبهای اجتماعی بند و سدهای انحرافی و یا ذخیره‌ای در حوضه‌های بالادست و یا پایین دست به جهت انحراف و یا ذخیره آب به شرح ذیل مشخص شده اند (گولوبف و بیسواس، ۱۹۷۹):

به دلیل آن‌که عمده سکونتگاه‌های انسانی درایران اطراف منابع آب شکل گرفته‌اند، احداث سد معمولاً این محلها را در حوضه‌ی مخزن دچار زیان کرده و محیط طبیعی آن‌جا را دستخوش دگرگونی می‌نماید. با جابه‌جایی مردم و زیر آب رفتن کشتزارها و مراتع، نظام معیشتی آنها دچار مشکلات زیادی می‌گردد. همچنین، گروههای بومی و آسیب پذیر، اراضی و معیشت خود را در معرض تهدید نیروهای فراتر از تجربه یا توان خود می‌بینند.

اهالی منطقه با ورود شمار زیادی از اهالی خارجی، خود را در معرض مسائل فزاینده بهداشتی (شامل مالاریا، بیماریهای جنسی وایدز) می‌یابند، و ساختارهای اجتماعی تأثیرگذار و تعارضاتی در میان گروههای مردم پدید آید. سدها و سامانه‌ی انتقال آب تأثیر قابل توجهی بر میراث فرهنگی و آثار باستان شناسی وخراب شدن آنها می‌گذارند (کاظمی نجف آبادی و همکاران، ۱۳۹۱). پورطبری (۱۳۹۰) در مقاله ای برنامه‌ی بهینه بهره برداری از منابع آب داخل حوضه و احیای منابع آبی برون حوضه‌ای را بر پایه‌ی سه هدف: ۱- تأمین نیازهای آبی داخل حوضه‌ای، ۲- کاهش میزان آبی خروجی از مرز و

۳- افزایش انتقال آب به حوضه‌ی مجاور(مانند حوضه‌ی زاینده رود) ارائه کرد. نتایج نشان دادند که اجرای سیاستهای ارائه شده به وسیله‌ی مدل پیشنهادی می تواند از خروج حجم قابل توجهی از منابع آبی از مرز جلوگیری کرده، و با مدیریت مناسب و بهینه ، مقادیر مازاد بر نیاز حوضه را به حوضه‌ی مجاورانتقال دهد.

با توجه به موارد یاد شده و پیشینه طرحهای انتقال آب، اجرای این گونه طرحها همواره خطراتی را برای هر دو حوضه‌ی مبدأ و مقصد داشته است. به منظور بررسی کاهش انتقال آب بین حوضه‌ای دراین ساختار از توان آب مجازی حوضه‌ی مقصد بهره وری شده است؛ بدین منظور شبیه SWAT مورد استفاده قرار می گیرد.

در چرخه‌ی آبشناسی، منابع آب به دو دسته‌ی آبی و سبز تقسیم می‌شوند. آبهای زیرزمینی و آبهای سطحی آب آبی را تشکیل می دهند، در حالی‌که به رطوبت خاک در مناطق غیر اشباع آب سبز می‌گویند. منشاء آبهای آبی و سبز، بارندگی است. اصطلاح آب مجازی نخستین بار به وسیله‌ی آلن (۱۹۹۷) به صورت زیر تعریف شد: " مجموع آب مصرف شده برای تولید مقدار معینی از محصول اعم از کالا، فراورده‌های کشاورزی یا حتی خدمات را آب مجازی می نامند." با توجه به نقش این دو در تولید مواد غذایی می‌توان گفت که منشاء آب مجازی، آبهای سبز اند. بر این اساس می توان آب مجازی را به آب مجازی آبی و آب مجازی سبز تقسیم بندی نمود (اوبی اوبه و همکاران، ۲۰۰۵)

در مطالعات مربوط به منابع آب، تاکنون بیشتر به مؤلفه‌ی آب‌آبی توجه گردیده و مؤلفه‌ی آب‌سبز به عنوان بخشی از منابع آب در کشاورزی دیم نادیده گرفته شده است. بحث آب‌سبز و لزوم توجه به آن برای نخستین بار به وسیله‌ی فالکنمارک در سال ۱۹۹۷ مطرح شد. آب آبی مجموع رواناب سطحی و تغذیه‌ی آبهای زیرزمینی عمیق است که متفاوت از تعریف آب‌سبز می‌باشد. فالکنمارک و روکستارم (۲۰۰۶) آب‌سبز را شامل دو مؤلفه‌ی جریان آب‌سبز[1] و منبع آب‌سبز[2] دانسته اند.

روکستارم و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی مقدار آب‌سبز در ۹۲ کشور در حال توسعه پرداختند. در این مطالعه سهم نسبی از آب نفوذی باران (جریان آب‌سبز در دیم)، آب‌آبی برای آبیاری و مقدار افزایش کارایی مصرف آب به منظور کاهش فشار بر منابع آب بررسی شدند. مطالعات آنان همچنین قابلیت بالایی را در افزایش کارایی مصرف آب براساس شبیه غیر خطی بین جریان تبخیر-تعرق در کشاورزی و رشد محصول نشان داد. با افزایش کارایی مصرف آب، نیاز آب در کشاورزی ۱۶ و ۴۵ درصد به ترتیب در سالهای ۲۰۱۵ و ۲۰۵۰ کاهش می یابد. شول و همکاران (۲۰۰۸)، در راستای طرح محاسبه‌ی توزیع زمانی و مکانی مقدار آب قابل دسترس جهانی، از شبیه SWAT برای تخمین کل آب قابل استفاده‌ی غرب آفریقا در سطح چهار میلیون کیلومتر مربع بهره برده‌اند. دراین تحقیق، علت استفاده از شبیه SWAT، توانایی آن در شبیه‌سازی تراز آبشناسی به صورت ساده و واقع بینانه بیان شد. اخوان و همکاران (۱۳۸۹) به تخمین آب‌آبی و آب‌سبز در حوضه‌ی آبریز همدان-بهار پرداخته و نتایج شبیه سازی را قابل قبول عنوان کردند. فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی آب‌آبی و آب‌سبز در ایران و به کمک نرم افزار SWAT پرداختند؛ نتایج نشان دادند که شیوه‌ی آبیاری تاثیر زیادی در تعادل آبخوانها دارد. جیرانی و همکاران (۱۳۹۰) اثر دقت مکانی ۵ نقشه‌ی رقومی ارتفاع متفاوت را در براورد رواناب و رسوب بررسی کرده و به نتایج نسبتاً یکسانی دست یافتند. روند کلی مراحل تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده اند. در مراحل ابتدایی‌این ساختار به جمع آوری اطلاعات و تحلیلهای اقتصادی پرداخته شده است. پس از آن، مرحله‌ی اول شبیه‌سازی، شبیه-های حوضه‌ی آبریز و شبیه مخزن، به همراه تحلیل عدم قطعیت آنها را شامل می‌شود. دراین مرحله، ابتدا با توجه به حوضه‌ی آبخیز مطالعه‌ی موردی معرفی شده با استفاده از SWAT شبیه‌سازی حوضه آبخیز انجام می‌گردد. پس از واسنجی و صحت سنجی و ورود اطلاعات اقلیمی، شبیه برای پیش بینی گروه زمانی داده‌های بده آماده می‌شود. سپس مقدار آب آبی که مجموع دو مقدار رواناب سطحی و آبهای زیر زمینی

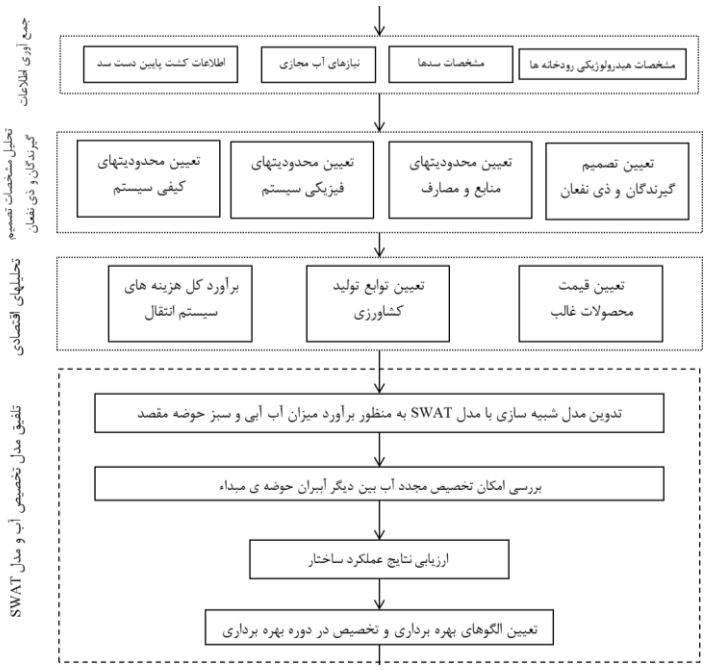
[1]- green water flow
[2]- green water resource

عمیق می‌باشد، و آب‌سبز که مجموع دو مقدار آب موجود در نیمرخ خاک(ذخیره آب‌سبز) و تبخیر - تعرق واقعی (جریان آب‌سبز) که در قالب تبخیر از سطح خاک و آب و تعرق از پوشش گیاهی وارد هواکره گردد، محاسبه می‌شود. مقدار ذخیره‌ی آب‌سبز، قسمتی از منابع آب تجدید پذیر با برگشت اقتصادی بوده که منبع اصلی کشاورزی دیم است. پس از واسنجی کردن شبیه با بده-های مشاهداتی در حوضه‌ی مورد مطالعه، مقدار آب‌آبی، آب‌سبز، و در نهایت آب مجازی در حوضه‌ی مقصد به-دست می‌آید. پس از آن شبیه بهینه سازی تخصیص آب بین آب بران صورت گرفته، و در مرحله‌ی نهایی، مقدار آب مجازی حوضه‌ی مقصد به‌دست آمده از سهم آب تخصیص یافته به حوضه‌ی مقصد کاهش یافته، و به آب بران حوضه‌ی مبدأ برگشت داده شده، و میزان سود ناشی از عدم انتقال آب برای آب بران حوضه‌ی مبدأ محاسبه گردیده است.

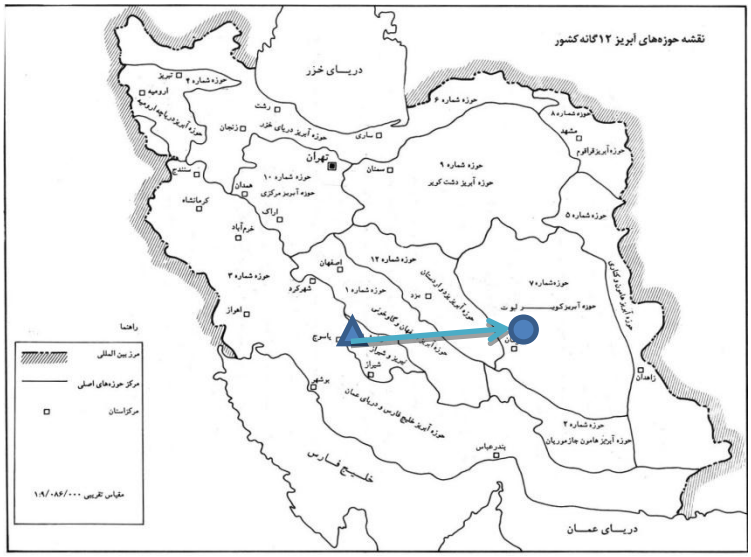
مطالعه‌ی موردی

حوضه‌ی آبخیز رود کارون در استانهای خوزستان، لرستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد واقع بوده و مساحت آن نزدیک به ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. این حوضه بین عرضهای جغرافیایی حدود ۳۰ تا ۳۴ درجه شمالی قرار گرفته، و طیف ارتفاعی گسترده‌ای از جلگه‌های پست ساحلی تا مناطقی با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر را شامل می‌شود.رود کارون به عنوان یکی از پرآبترین و طویلترین رودهای ایران، وظیفه‌ی تأمین آب مورد نیاز شرب و صنعت حدود ۱۶ شهر و دهها روستا، هزاران هکتار اراضی کشاورزی و بخشی از تولید کارمایه‌ی برقابی کشور را به عهده دارد. از طرفی، دشت رفسنجان با مساحت ۱۶۰۹۶ کیلومتر مربع، که در طولهای جغرافیایی ۵۵ درجه تا ۵۷ درجه، و عرضهای جغرافیایی ۲۹ درجه ۵۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه واقع شده است، یکی از دشتهای حوضه‌ی آبخیز کویر درانجیرساغند می‌باشد. این حوضه شامل دشتهای زرند کرمان، باغین، بردسیر، ماهان، کرمان، رفسنجان و کوه بنان است.

طرح انتقال سالانه ۲۵۰ میلیون مترمکعب آب از سرشاخه‌های کارون (رود سولکان) به دشت رفسنجان صورت تهیه شده، و مشخصات آن در قالب جدول ۱ عرضه گردیده‌اند. شکل ۲ طرح انتقال آب را به صورت کلی نشان می‌دهد. در این انتقال آب، کشاورزی کرمان در حوضه‌ی مقصد و کشاورزی خوزستان و کشت و صنعت خوزستان در حوضه‌ی مبدأ از آب بران اصلی این شبیه انتقال آب به حساب می آیند.



شکل ۱. روند کلی ساختار پیشنهادی.



شکل ۲: نقشه‌ی کلی طرح انتقال آب از سولگان به رفسنجان (کارآموز و همکاران، ۲۰۱۰).

جدول ۱ : اطلاعات طرح انتقال آب از سولگان به رفسنجان (مهجوری و همکاران، ۲۰۱۰).

سامانه انتقال آب							سد سولگان		
خط لوله			تونل						
قطر داخلی (m)	دبی طراحی (m^3/s)	طول (Km)	قطر داخلی (m)	دبی طراحی (m^3/s)	طول (Km)	حجم سرریز (m^3/s)	ارتفاع سد (m)	حداکثر حجم سد (m^3)	حداقل حجم سد (m^3)
۲-۲.۶	۹	۳۸۴	۳.۷	۱۳.۵	۵۳.۸	۱۱۱۲	۱۰۶	۶۴۵ x $۱۰^۶$	۸۶.۹ x $۱۰^۶$

تشریح مدل های مورد استفاده در مقاله

به منظور شبیه‌سازی حوضه‌ی آبخیز از دو مدل شبیه سازی SWAT و بهینه سازی تخصیص به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شده است، که درادامه به تشریح آنها می‌شود.

تشریح شبیه SWAT و داده ها مربوط

بررسی و شبیه‌سازی نمایشنامه‌های مربوط به اعمال راهکارهای افزایش بهره وری آب مانند تغییر الگوی کشت و یا افزایش بازدهی آبیاری در سطح یک حوضه با کاربرد هر شبیهی امکان‌پذیر نمی‌باشد. شبیه SWAT از معدود شبیه‌هایی است که توانایی و امکانات شبیه‌سازی این نمایشنامه‌ها را داراست. این مدل ترکیبی از شبیه‌هایی چون CREAMS، GLEAMS و ROTO می‌باشد که در اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی به‌وسیله‌ی موسسه‌ی تحقیقات کشاورزی ایالات متحده توسعه‌یافته است (Borah and Bera 2003). این شبیه براساس تقسیم حوضه به زیر حوضه‌هایی همگن که هرکدام اطلاعات آبشناسی، کاربری اراضی و نوع خاک مربوط به خود را دارند بنا نهاده شده است. داده‌های ورودی شبیه می‌تواند براساس اطلاعات روزانه و یا ساعتی جمع‌آوری شود. از بین شبیه‌های مختلف به دلایل زیر می‌توان SWAT را به عنوان مدلی مناسب برای شبیه‌سازی حوضه‌ی مورد مطالعه نام برد:

- نتایج شبیه‌سازی با کمک SWAT در مورد حوضه‌های دیگر در ایران، و همچنین دیگر حوضه‌ها نشان می‌دهند که داده‌های خروجی شبیه، مخصوصاً آبشناسی آن دقت نسبی قابل قبولی دارند.
- با کمک شبیه می‌توان تاثیر ارزیابی مدیریتی را برای حوضه بررسی کرد.
- پیچیدگیهای موجود در حوضه از لحاظ کاربری اراضی، پستی و بلندی زمین و غیره در شبیه قابل اعمال می‌باشند.

- داده‌های ورودی در شبیه چندان پیچیده نبوده و با اندازه گیری میدانی قابل جمع‌آوری می‌باشند.

SWAT یک شبیه نیمه توزیعی است که در آن تعریف واحدهای همگن آبشناسی (HRU[1]) جهت اجرای آن و شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر (متغیرهای آبشناسی، عملکرد، بهره‌وری و غیره) بسیار اهمیت دارد. این کار با معرفی نقشه‌های DEM [2] حوضه (جهت محاسبه تغییرات شیب) ، کاربری اراضی و خاک به شبیه صورت می‌گیرد. بعد از تشکیل HRU ها، در ادامه متغیرهای مربوط به هر کدام از اجزاء اصلی شبیه شامل متغیرهای گیاهی (Dat)، خاکشناسی (Sol)، آب زیرزمینی (Gw)، مدیریتی (Mgt)، رود (Rte) بر اساس آمار و داده‌های موجود به شبیه معرفی می‌شوند.

از زمان معرفی SWAT در اوایل دهه‌ی ۸۰ تاکنون حوضه‌های آبخیز فراوانی با کاربرد این نرم افزار شبیه-سازی گشته‌اند. از این نرم افزار جهت پیش بینی وضعیت آینده‌ی حوضه‌ی آبخیز، تعیین بیشینه‌ی بار مجاز آلودگی روزانه (TMDL)، شبیه‌سازی حوضه‌ی آبخیز، و یا به دست آوردن یک متغیر خاص آلاینده نیز استفاده گشته است.

جمع‌آوری داده‌های لازم (مانند متغیرهای هواشناسی، آبشناسی و گیاهی)، و بررسی آنها برای شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظریکی از بخشهای‌این مقاله است. داده‌های مورد استفاده دراین تحقیق به شرح جدول ۲ می‌باشند. بخشی ازاین داده‌ها به عنوان ورودی شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، و برخی دیگر در بخش واسنجی و صحت سنجی شبیه‌ها کاربرد داشته اند. نقشه‌ی DEM حوضه نخستین لایه‌ی اطلاعاتی ورودی به SWAT می باشد. دراین تحقیق از اطلاعات پستی و بلندی برای تهیه‌ی نقشه DEM جهت تولید اطلاعات فیزیکی شامل رودها، حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها استفاده گردید. در جدول ۳ سطح مربوط به هر کدام از کاربریها در حوضه‌ی رفسنجان نشان داده شده است. همچنین، داده‌های روزانه دما و بارندگی ۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، که نزدیکترین فاصله را با منطقه مورد مطالعه داشتند، برای کل حوضه جهت شبیه‌سازی فرایندهای مورد نظر برای دوره‌ی ۱۹۸۶ لغایت ۲۰۰۹ برای‌این تحقیق تهیه گردیدند. از آمار ماهانه بده‌ی سه ایستگاه آبسنجی جهت واسنجی و اعتبارسنجی شبیه استفاده گردید. موقعیت این‌ایستگاهها در شکل ۳، و مشخصات آنها همراه با طول دوره‌ی آماری در جداول ۴ و ۵ ارائه شده اند.

شبیه بهینه سازی تخصیص به کمک الگوریتم ژنتیک

هدف این شبیه به دست آوردن مقادیر ماهانه‌ی حجم آب تخصیصی است که به هریک از طرفهای درگیر اختصاص داده می‌شود، بطوری که سود اقتصادی خالص کل حداکثر گردد. به این منظور، شبیه بهینه‌سازی با تابع هدف حداکثرسازی سود خالص اقتصادی کل (سود منهای هزینه)، و با قیود فیزیکی و زیست محیطی سامانه، تدوین شده است.

متغیرهای تصمیم این شبیه بهینه‌سازی نیز مقادیر حجم ماهانه‌ی آب تخصیصی به نیازها در دوره‌ی زمانی برنامه‌ریزی می‌باشند. تابع هدف شبیه را نیز می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد(مهجوری و اردستانی، ۲۰۱۰)

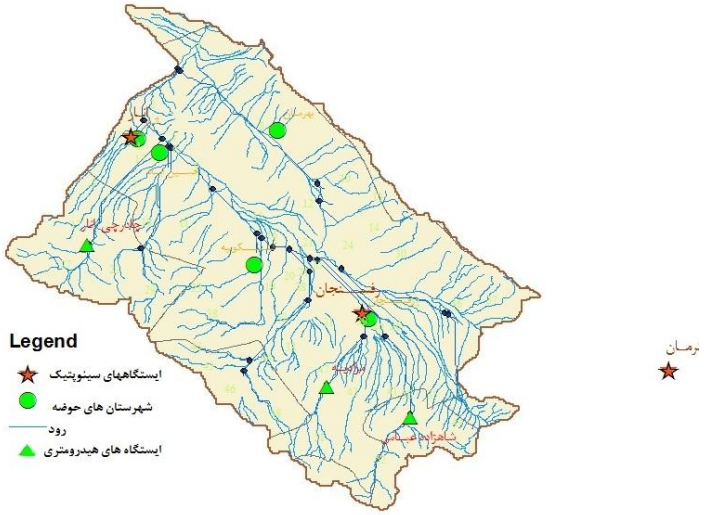
(۱)

$$\text{Maximize } Z = \sum_{n=1}^{2} B_n - \sum_{k=1}^{3} C_k$$

در رابطه‌ی بالا، Bn نشان دهنده‌ی n امین تابع سود و Cn نشان دهنده‌ی n امین تابع هزینه می‌باشد. تابع هدف بیان شده شامل کل توابع سود و هزینه در حوضه‌های مبدأ و مقصد است.B1 تابعی است که کل سودهای به دست آمده در نتیجه‌ی فروش محصولات کشاورزی در دو حوضه‌ی مبدأ و مقصد را تعریف می‌کند، که از منبع آب مورد نظر در حوضه‌ی مبدأ برای آبیاری استفاده می کرده اند که اثر آب مجازی در نیاز آبی مصرفی آنها اعمال شده است.B2 تعریف کننده‌ی سود حاصل از تعادل بخشی آبخوان بر اثر کاهش نیاز به آبکشی در حوضه‌ی مقصد پس از انتقال می‌باشد.B3 مجموع سودهای ماهانه حاصل از تولید کارمایه‌ی برقابی در سدهای برقابی پایین دست محل انتقال است، لکن از آن جایی که در سدهای برقابی از کل آب مصرفی مجدداً

[1]- hydrologic response units
[2]- Digital Elevation Model

استفاده می‌گردد، عـدد آب مجـازی آن برابـر بـا آب‌آبـی است، و البته چون با انتقـال آب از حوضـه‌ی مبـدأ سـود کاهش می‌یابد، این مقدار با علامـت منفـی در محاسـبات ترتیب اثر داده می‌شود.



شکل۳. موقعیت جغرافیایی‌ایستگاه‌های هواشناسی و آبسنجی مورد استفاده در حوضه‌ی رفسنجان.

جدول ۲. فهرست داده‌های مورد استفاده در بخشهای مختلف شبیه‌سازی.

نام نقشه	محل تهیه	کاربرد
نقشه مدل رقومی‌ارتفاعی DEM	سازمان نقشه برداری در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰	ورودی به مدل SWAT
نقشه کاربری اراضی	مطالعات عباسپور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ موسسه پژوهش‌های برنامه ریزی و اقتصاد کشاورزی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ مهندسین مشاور جاماب در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰	ورودی به مدل SWAT
نقشه خاکشناسی	مطالعات عباسپور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ موسسه پژوهش‌های برنامه ریزی و اقتصاد کشاورزی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰	ورودی به مدل SWAT
اطلاعات دما، بارش،باد و رطوبت	اطلاعات‌ایستگاهای سینوپتیک کرمان از سازمان هواشناسی کشور	ورودی به مدل SWAT
اطلاعات دبی ماهانه	شرکت مدیریت منابع آب مهندسین مشاور جاماب شرکت آب منطقه‌ای کرمان	کالیبراسیون و صحت سنجی مدل SWAT

جدول ۳. نوع کاربری اراضی و سطوح مربوط به آنها در حوضه‌ی رفسنجان.

نوع کاربری اراضی	زراعت آبی	زراعت دیم	اراضی مرتعی	اراضی بایر	دریا و کفه	مناطق شهری	اراضی جنگلی
مساحت (Km^2)	۱۴۹۵/۰	۱۳۴/۲	۷۸۵۶/۳	۱۳۰۶/۵	۱۸/۶	۲۷/۱	۱۵۸۴/۱

جدول ۴. مشخصات‌ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق.

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	طول دوره آماری
انار	۵۵/۲۵	۳۰/۸۸	۱۴۰۸/۸	۱۹۸۶-۲۰۰۹
رفسنجان	۵۵/۹۰	۳۰/۴۲	۱۵۸۱	۱۹۸۶-۲۰۰۴
کرمان	۵۶/۹۷	۳۰/۲۵	۱۷۵۳/۸	۱۹۸۶-۲۰۰۹

جدول ۵. مشخصات‌ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده و طول دوره‌ی آماری آنها.

ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	طول دوره آماری
مرادیه	شور	۵۵/۵۳	۳۰/۱۲	۱۹۰۰	۱۹۸۷-۲۰۰۶
شاهزاده عباس	گیودری	۵۶/۰۹	۳۰/۰۷	۲۰۹۰	۱۹۸۸-۲۰۰۶
چادرچی انار	طرزج	۵۵/۰۷	۳۵/۳۰	۱۹۵۵	۱۹۸۸-۲۰۰۶

همچنین، C1 تابع افزایش هزینه‌های لایروبی در رودخانه‌ی حوضه‌ی مبدأ در پایین دست محل انتقال آب است، زیرا این هزینه‌ها با کاهش بده‌ی جریان در رودخانه افزایش می یابند. C2 هزینه‌های ماهانه ساختن و بهره برداری سامانه‌ی انتقال است. اجزاء تابع هدف بیان شده را می‌توان در روابط زیر خلاصه کرد:

(۲)

$$B_1 = \sum_{s=1}^{3}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{12} X_{s,m,y} \times \overline{CPD_{sv}} \times \overline{P_{cr\,s}}$$

(۳)

$$B_2 = \sum_{1}^{S}\sum_{1}^{M}\sum_{1}^{Y} \frac{X_{s,m,y} \times H_b \times h_r}{\overline{\eta} \times 0.102} \times p_p$$

(۴)

$$C_1 = \sum_{s=1}^{S}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{12} \acute{f}(Q_{s,m,y} - X_{s,m,y}) - \acute{f}(Q_{s,m,y})$$

(۵)

$$C_2 = \sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{12} \overline{P_{cm}}$$

(۶)

$$C_3 = \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{12} f_r\left(Q_{s,m,y} - X_{s,m,y}\right) \times \overline{PE}$$

Subject to:

(۷)

$$X_{Min} \le X_{1,m,y} \le X_{Max}$$

(۸)

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{12}(X_{s,m,y} - Ins_{m,y}) \le S_{m,y}$$

(۹)

$$S_{m+1,y} = S_{m,y} + R_{m,y} - \sum_{s=1}^{S} X_{s,m,y} - L_{m,y} - Ins_{m,y} \quad \forall y,\ \forall = 1,2,\dots,11$$

(۱۰)

$$S_{1,y+1} = S_{m,y} + R_{m,y} - \sum_{s=1}^{S} X_{s,m,y} - L_{m,y} - Ins_{m,y} \quad \forall y,\ \forall m = 12$$

(۱۱)

$$X_{2,m,y} > 23.3$$

بطوری که:

i = نرخ بهره

$X_{2m,y}$ = حجم آب انتقالی بهینه از سولکان به رفسنجان (میلیون متر مکعب)

CPD_{1v} = میانگین وزنی محصول تولیدی در واحد کل آب مصرفی در کشاورزی رفسنجان (کیلوگرم بر متر مکعب)

CPD_{2v} = میانگین وزنی محصول تولیدی در واحد کل آب مصرفی در کشاورزی خوزستان (کیلوگرم بر متر مکعب)

CPD_{3v}=میانگین وزنی محصول تولیدی در واحد کل آب مصرفی در کشت و صنعت خوزستان (کیلوگرم بر متر مکعب)

P_{crs}= متوسط سود فروش محصولات به وسیله ی هر کاربر (ریال بر کیلوگرم)

H_b= متوسط عمق آبخوان در زمینهای کشاورزی (متر)

H_r= مجموع زمان لازم برای آبکشی در هر ماه در زمینهای کشتزارها و باغها (ساعت)

P_p= قیمت هر کیلووات ساعت برق مورد استفاده برای آبکشی (ریال بر کیلووات ساعت)

η= میانگین بازدهی تلمبه

$R_{m,y}$=حجم آب آزاد شده از مخزن در ماه m از سال y(میلیون متر مکعب)

$L_{m,y}$= حجم آب تبخیر شده از مخزن در ماه m از سال y(میلیون متر مکعب)

$S_{m,y}$=حجم آب ذخیره شده در مخزن سد در شروع ماه m از سال y (میلیون متر مکعب)

$Q_{m,y}$=بده‌ی رود کارون در ماه m از سال y (میلیون متر مکعب)

$f'(Q)$=تابع هزینه‌ی لایروبی

fr(Q)=تابع تولید برق مربوط به r امین نیروگاه برقابی

$Pc_{mm,y}$= هزینه‌های ساختن و بهره برداری ماهانه از سامانه در ماه m از سال y (میلیون ریال)

$Ins_{m,y}$ = آب مورد نیاز برای تامین نیازهای زیست محیطی پایین دست سد(میلیون متر مکعب)

به منظور حل این شبیه از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده گردیده که نتایج آن در ادامه آورده شده اند. به منظور مطالعه‌ی بیشتر شبیه تخصیص به مقاله‌ی دهقان منشادی و همکاران (۲۰۱۳) مراجعه شود.

نتایج و بحث

در ساختار پیشنهادی دراین مقاله، به منظور در نظر گرفتن توان حوضه‌ی آبخیز مقصد، و با هدف کاهش حجم آب انتقالی به این حوضه سعی شده است تا میزان آبهای‌آبی و سبز موجود در حوضه مقصد برآورد گردد، و سپس این مقدار از سهم آبی آب بران حوضه‌ی مقصد تعین شده با کاربرد شبیه بهینه سازی کاهش یافته، و آب بین آب بران حوضه های مبدأ تقسیم گردد.

دراین ساختار از مولفه‌ی آبشناسی SWAT بهره‌وری شده است. ابتدا حوضه‌ی آبخیز به زیر حوضه‌هایی بر اساس نقشه‌های رقومی تقسیم، سپس با توجه به نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به واحدهای کوچک HRU تقسیم بندی شده است. مساحت حوضه‌ی شبیه‌سازی شده ۱۱۷۲۶ کیلومتر مربع بوده، و با توجه به‌این‌که به منظور دقت بیشتر مطالعه، دقت شبیه دو برابر مقدار پیشنهادی خود برنامه تنظیم گردیده است، ۵۲ زیر حوضه در شبیه به کار گرفته شده اند.

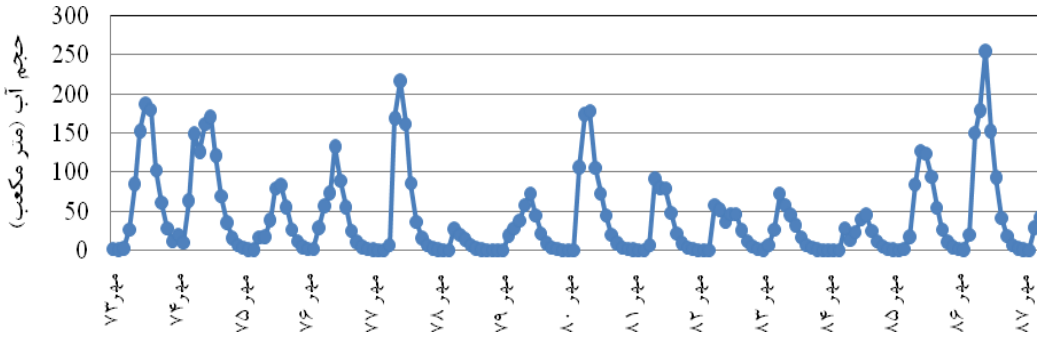
شبیه‌سازی از سال ۱۹۹۶تا ۲۰۰۹ و برای ۲۴ سال صورت گرفته است؛ همچنین، ۷ سال برای انجام warm up (به منظور راه اندازی شبیه و به اصطلاح گرم شدن شبیه) در نرم افزار محاسبه شده است. برای انتخاب متغیرهای موثر و تعیین کننده در مورد بده‌ی خروجی از حوضه، تحلیل حساسیت در خود نرم افزار SWAT انجام گرفت تا از میان متغیرهای متنوع شبیه، با انتخاب موثرترین متغیرها، مدل به خوبی واسنجی و صحت سنجی گردد. برنامه‌ی SWAT متغیرهای حساس را به صورت رتبه بندی شده اعلام کرده که در جدول ۶ ارائه گردیده اند. که ازاین متغیرها در شبیه SWAT-Cup به منظور واسنجی و اعتبار سنجی استفاده شده است.

به منظور واسنجی شبیه از بسته‌ی الحاقی SWAT-CUP و از الگوریتم SUFI-2 استفاده شده است (عباسپور، ۲۰۰۷). شبیه با استفاده از آمار بده‌ی ماهانه‌ی ۳ ایستگاه آبسنجی جدول ۵ واسنجی و اعتبارسنجی شده است. دراین تحقیق جهت ارزیابی شبیه از شاخص ضریب تبیین R^2 استفاده گردید. همچنین، جهت ارزیابی بده‌ی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی مدل، خروجی شبیه واسنجی شده برای سالهای ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ و برای ۲ سال بعدی به منظور صحت سنجی ایستگاههای مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این بخش در جدول۷ ارائه شده اند. محدوده‌ی نهایی متغیرهای شبیه در جدول ۸ عرضه گردیده‌اند.

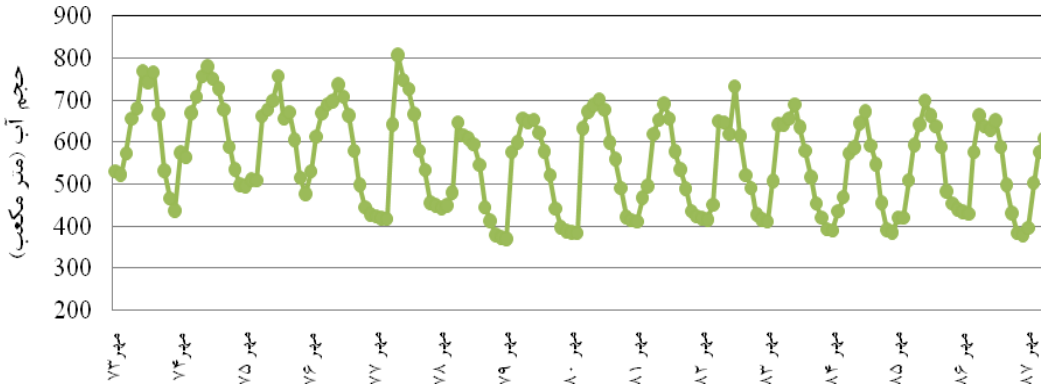
مقدار آبهای‌آبی و سبز، و آب مجازی، به صورت گروههای زمانی برای حوضه‌ی دشت رفسنجان در شکلهای ۴ تا ۶، و مقدار بارش و تبخیر - تعرق در سطح حوضه در شکل ۷ نشان داده شده اند. نکته‌ی قابل توجه دراین شبیه‌سازی این که میزان آب‌سبز موجود در حوضه به مراتب بیشتر از میزان آب‌آبی آن می‌باشد، که البته آب‌سبز در اکثر تحقیقات در نظر گرفته نمی‌شود.

پس از آن شبیه بهینه سازی تخصیص آب با تابع هدف بیشینه کردن سود خالص به کمک الگوریتم ژنتیک اجرا گردید، که ضرایب نهایی این الگوریتم در جدول ۹ مشخص شده اند. همچنین، شکل ۸ روند تغییرات مقدار تابع هدف را بر حسب شماره‌ی نسل نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، شبیه در تعداد ۴۰ نسل به جواب نهایی نزدیک شده و این تعداد نسل برای شبیه کفایت می‌کند.

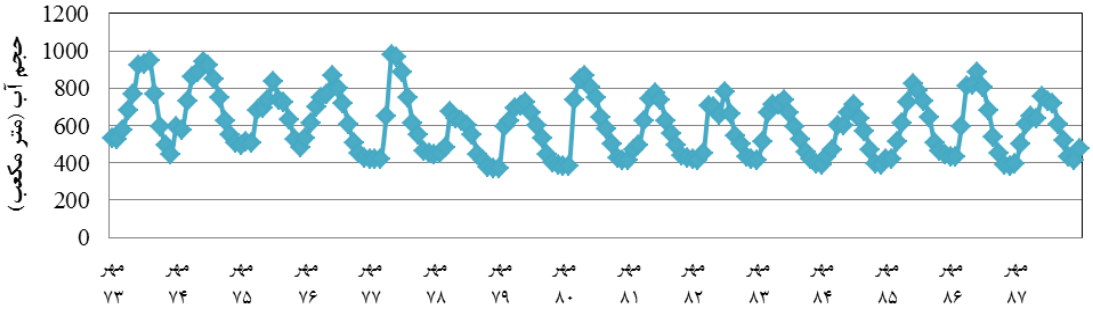
در مرحله‌ی بعد، به منظور تامین آب کرمان از منابع آب مجازی موجود خود و کاهش حجم آب انتقالی، مقدار آب موجود را در حوضه‌ی مقصد (کشاورزی کرمان) از سهم آب تخصیص یافته در شبیه تخصیص به‌این آب بر کم کرده و به دو آب بر دیگر (کشت و صنعت خوزستان و کشاورزی خوزستان) به صورت یکسان تخصیص یافته، و میزان سودی که در صورت تخصیص آب به این دو آب بر می رسد حساب شده است که نتایج آن در جدول ۱۰خلاصه گردیده اند.



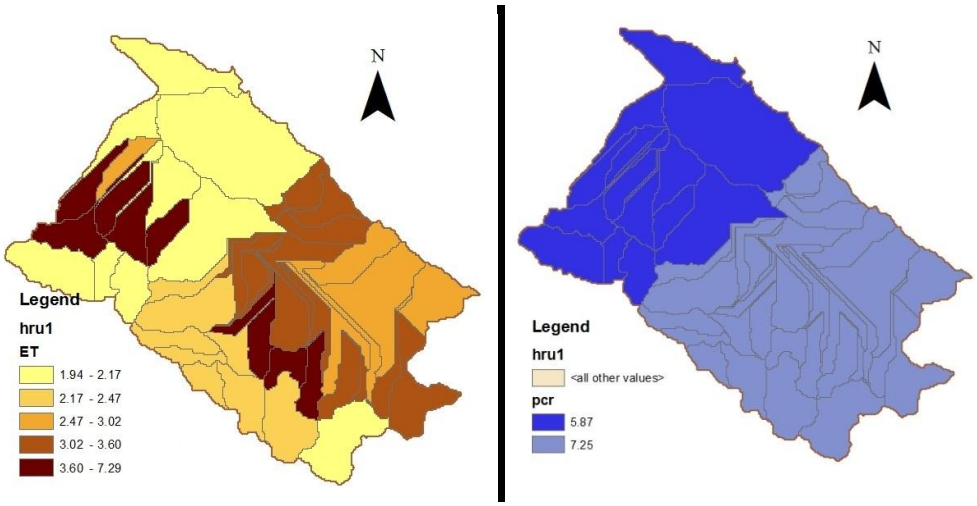
شکل ۴. مقدار ماهانه‌ی آب‌آبی در دوره‌ی ۱۷ ساله شبیه‌سازی شده با کاربرد SWAT در حوضه‌ی دشت رفسنجان.



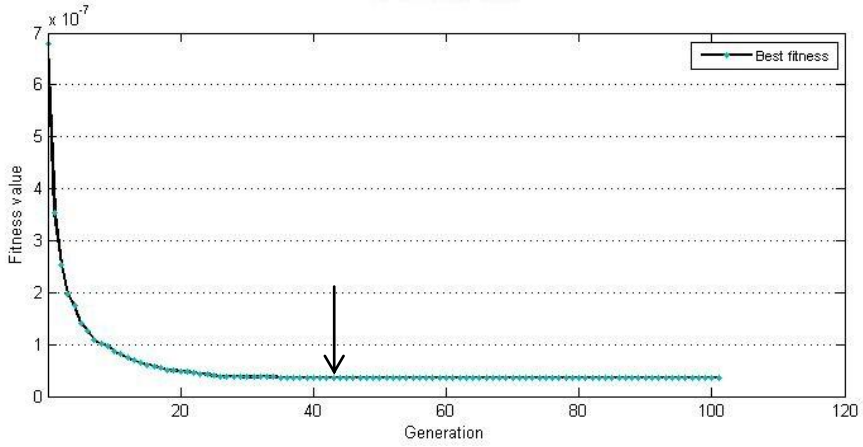
شکل ۵. مقدار ماهانه‌ی آب‌سبز در دوره‌ی ۱۷ ساله شبیه‌سازی شده با کاربرد SWAT در حوضه‌ی دشت رفسنجان.



شکل ۶. مقدار ماهانه‌ی آب مجازی در دوره‌ی ۱۷ ساله شبیه‌سازی شده با کاربرد SWAT در حوضه‌ی دشت رفسنجان.



شکل ۷. میانگین سالانه‌ی (دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۹) بارندگی و تبخیر- تعرق واقعی در ۵۲ زیر حوضه‌ی شبیه(میلیمتر)



شکل ۸. روند تغییرات مقدار تابع هدف در الگوریتم ژنتیک.

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت و رتبه بندی متغیر ها در SWAT.

متغیر	رتبه	متغیر	رتبه
Alpha_Bf	۱۰	Sftmp	۲۷
Biomix	۱	Slope	۷
Blai	۱۲	Slsubbsn	۱۶
Canmx	۹	Smfmn	۲۷
Ch_K2	۱۵	Smfmx	۲۷
Ch_N2	۱۷	Smtmp	۲۷
Cn2	۱	Sol_Alb	۱۳
Epco	۲۷	Sol_Awc	۳
Esco	۲	Sol_K	۶
Gw_Delay	۸	Sol_Z	۴
Gw_Revap	۱۴	Surlag	۱۱
Gwqmn	۲۷	Timp	۲۷
Revapmn	۵	Tlaps	۲۷

جدول ۷. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی شبیه برای هریک ازایستگاهها در دوره‌ی آماری مربوطه.

شماره ایستگاه	ایستگاه	رودخانه	واسنجی		اعتبارسنجی	
			دوره آماری	R^2	دوره آماری	R^2
۱	مرادیه	شور	۱۹۹۵-۱۹۹۷	۰.۴۶	۲۰۰۰-۲۰۰۲	۰/۶۹
۲	شاهزاده عباس	گیودری	۱۹۹۵-۱۹۹۷	۰/۶۳	۲۰۰۰-۲۰۰۲	۰/۷۷
۳	چادرچی انار	طزرج	۱۹۹۵-۱۹۹۷	۰/۸۰	۲۰۰۰-۲۰۰۲	۰/۸۹

جدول ۸. محدوده‌ی نهایی متغیرهای مدل شبیه‌سازی.

شماره	متغیر	مقدار بهینه	کمینه	بیشینه
1	CN2	-0.282	-0.288	-0.278
2	GWQMN	27.728	0.000	2772.785
3	ALPHA_BF	0.231	0.229	0.233
4	GW_DELAY	57.989	54.161	63.976
5	ESCO	0.893	0.893	0.896
6	GW_REVAP	0.115	0.108	0.117
7	CH_N2	0.214	0.108	0.300
8	CH_K2	409.046	185.838	564.157
9	SOL_AWC	0.101	0.087	0.104
10	SOL_K	0.100	0.069	0.110
11	REVAPMN	373.660	367.569	391.933
12	CANMX	57.783	27.173	82.827
13	SLSUBBSN	115.761	71.803	197.396
14	SURLAG	24.123	9.429	28.512

جدول۹. ویژگیهای اصلی شبیه بهینه‌سازی ژنتیک به منظور تخصیص.

تعداد متغیر های تصمیم	ضریب جهش	ضریب تزویج	اندازه جمعیت	تعداد نسل	نخبه گرایی
۱۰۸۰	۰	۰/۷	۱۰۰	۴۰	دارد

جدول ۱۰. متوسط آب تخصیص یافته بر مبنای شبیه‌سازی حوضه (متر مکعب).

ماه	مقدار متوسط آب مجازی موجود در کرمان	کشاورزی خوزستان	کشت وصنعت خوزستان
		سود بدست آمده ناشی از افزایش مقدار آب تخصیصی (ریال)	
مهر	۴۴۴	۱۱۷۹۲۸۴	۴۵۱۱۳۱
آبان	۴۸۴	۱۲۸۵۵۴۰	۴۹۱۷۸۸
آذر	۵۷۲	۱۵۱۹۳۹۵	۵۸۱۳۲۴
دی	۷۰۳	۱۸۶۷۵۴۰	۷۱۴۶۳۲
بهمن	۷۴۹	۱۹۸۹۸۴۶	۷۶۱۴۹۹
اسفند	۷۲۹	۱۹۳۶۷۱۴	۷۴۱۱۶۶
فروردین	۷۷۴	۲۰۵۶۲۶۴	۷۸۶۹۱۸
اردیبهشت	۶۹۶	۱۸۴۹۰۴۳	۷۰۷۶۱۵
خرداد	۶۰۰	۱۵۹۳۹۵۷	۶۰۹۹۶۷
تیر	۵۱۱	۱۳۵۷۴۸۸	۵۱۹۴۵۶
مرداد	۴۴۴	۱۱۷۹۳۲۶	۴۵۱۱۷۴
شهریور	۴۲۳	۱۱۲۳۵۵۹	۴۲۹۸۴۶
مجموع	۷۱۲۹	۱۸۹۳۷۹۵۶	۷۲۴۶۵۱۷

نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختاری به منظور بررسی توانایی استفاده از آب مجازی حوضه‌ی مقصد در طرحهای انتقال آب، و نقش آن در تخصیص آب بین آب بران دو حوضه ی مبدأ و مقصد پیشنهاد شده است. در این ساختار از SWAT به منظور شبیه‌سازی آبشناسی حوضه‌ی مقصد در طرح انتقال آب از سولکان به رفسنجان، و تخمین میزان آبهای آبی و سبز این حوضه استفاده شده، و مقدار آب مجازی موجود در این حوضه دریک دوره‌ی ۲۴ ساله شبیه‌سازی و واسنجی گردید. سپس این مقدار آب مجازی با هدف کاستن میزان آب انتقالی در طرحهای انتقال آب از میزان آب تخصیص یافته در شبیه تخصیص آب بین حوضه ای از آب بر مقصد کاهش یافت، و این میزان آب مجازی به آب بران حوضه‌ی مقصدبرگشت داده شد. در مرحله‌ی آخر، اندازه‌ی سود حاصل از این مدیریت آب در طرح انتقال آب سولکان به رفسنجان برآورد شده است.

در مطالعه‌ی موردی ارزیابی شده برای ساختار پیشنهادی، با توجه به تبخیر - تعرق بالای منطقه‌ی رفسنجان، میزان آب‌آبی بسیار کمتر از آب‌سبز بود، و در کل، توانایی حوضه در تامین نیاز آبی خود کم ارزیابی شد. لکن کشت و صنعت خوزستان و کشاورزی خوزستان توانستند به ترتیب مقدار ۱۸.۹ و ۷.۲۵ میلیارد ریال سود به‌دست آورند و البته با این کار هزینه های انتقال، و تا حدودی پیامد های زیانبار انتقال نیز کاهش یافته است. در نتیجه، ساختار پیشنهادی این مقاله، با توجه به بررسی دقیقتر منابع و نیاز های آبی بر اساس مفهوم آب مجازی می تواند علاوه بر زیانهای طرحهای انتقال آب، از ظرفیتهای حوضه های آبخیز به صورت بهینه تر بهره وری گردیده، با مدیریت جامعتر، هزینه های انتقال را کاهش داده، سود بیشتری را در حوضه ی مبدأ به‌دست آورد.

منابع

۱. اخباری م. ۱۳۹۰. بررسی پیامد های انتقال آب رودخانه های مرزی به حوضه های داخلی (مورد: رودخانه زاب کوچک). سومین کنفرانس ملی برقابی.

۲. اخوان، س.، ک.ج عابدی، س.موسوی، پ.ک. عباس، م. افیونی، و س. اسلامیان. (۱۳۸۹). تخمین «آب آبی» و «آب سبز» با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان-بهار. علوم آب و خاک. ۱۴(۵۳): ۹-۲۳.

۳. جنت رستمی، س.، م. خلقی، و ا. بزرگ حداد. ۱۳۸۹. مدیریت بهره برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده جستجوی هارمونی، مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۳): ۶۱-۷۱.

۴. جیرانی، ف.، س. مرید، و ع. مریدی. ۱۳۹۰. اثر دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع در واسنجی و برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT-CUP. پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۴): ۸۱-۱۰۱.

۵. خاکپور، ه. ۱۳۹۱. انتقال آب بین حوضه ای و پیامدهای زیست محیطی آن. همایش ملی انتقال آب بین حوضه ای (چالشها و فرصتها)، شهرکرد، دانشگاه آزد اسلامی واحد شهر کرد.

۶. صمدی بروجنی، ح. ۱۳۸۹. انتقال آب بین حوضه ای(فرصت ها و چالشها). انتشارات دانشگاه شهرکرد، مرکز تحقیقات منابع آب.

۷. کاظمی نجف آبادی، ا.، ح. اسماعیلی، و م. فرهادنژاد درفولی. ۱۳۹۱. بررسی مسائل و پیامدهای زیست محیطی در انتقال آب بین حوضه ای، همایش ملی انتقال آب بین حوضه ای (چالشها و فرصتها). شهرکرد، دانشگاه آزد اسلامی واحد شهر کرد.

۸. پور طبری، م. ۱۳۹۰. بهره برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد انتقال آب بین حوضه ای: محدوده مطالعاتی پیرانشهر. آب و فاضلاب، شماره ۴

۹. یازرلو، ب.، و م. ذاکری نیا. ۱۳۹۱. انتقال آب بین حوضه ای: بررسی فرصت ها و چالش های مرتبط با انتقال آب، همایش ملی انتقال آب بین حوضه ای (چالشها و فرصتها). شهرکرد، دانشگاه آزد اسلامی واحد شهر کرد.

10. Abbaspour, K.C. 2007. User manual for SWAT-CUP SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland 95 p. Available at: http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen /siam/software/swat/index_EN.

11. Abrishamchi, A., and M. Tajrishy. 1999, Interbasin water transfer in Iran, Int. Workshop on Interbasin Water Transfer, UNESCO. Paris.

12. Allan, J.A. 1997. Virtual water: A long-term solution for water short Middle Eastern economies. British Assoc. Festival of Sci., University of Leeds, UK.
13. Borah, D.K. and M. Bera. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. Trans. ASAE 46:1553-1566.
14. Dehghan Manshadi, H.R., M.H. Niksokhan, and M. Ardestani. 2013. Water Allocation in Interbasin water transfer with the virtual water approach. World Environ. Water Resour. Cong. 2013: Showcasing the Future © ASCE 2013.
15. Falkenmark, M. 1997. Meeting water requirements of an expanding world population. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 352: 929–936.
16. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin, and H. Yang. 2009. Modeling blue and green water resources availability in Iran. Hydrol. Proc. 23:486-501.
17. Golubev, G.N., and A.K. Biswas. 1979. Interregional water transfers: Problem and prospects. Oxford: Pergamon.
18. Karamouz, M., A. Mojahedi, and A. Ahmadi. 2010. Interbasin water transfer: Economic water quality-based model. J. Irrig. Drain. Eng. Div. DOI: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0000140.
19. Mahjouri, N., and M. Ardestani. 2010. A game theoretic approach for interbasin water resources allocation considering the water quality issues. Environ Monit Assess. 167:527–544.
20. Obuobie, E., P.M. Gachanja, and A.C. Dörr. 2005. The Role of green water in food trade. Term paper for the interdisciplinary course, International Doctoral Studies. Center of Development Research University of Bonn, November 2005.
21. Rockström, J., M. Lannerstad, and M. Falkenmark. 2007. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. Proc. Nat. Acad. Sci. 104: 6253-6260.
22. Schuol, J., K.C. Abbaspour, R. Srinivasan, and H. Yang. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. Journal of Hydrology 352: 30–49.