اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸، ص ۳۵۲-۳۴۱

عملکرد مدل WEAP در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضهٔ آبخیز الند

محمد اشرفی[۱]، کامران زینال‌زاده[۲*]، سینا بشارت[۳]، مهدی یاسی[۴]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، پژوهشکدهٔ مطالعات دریاچهٔ ارومیه، دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۰۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۱/۲۳)

چکیده

بهره‌مندی از مدل‌های هیدرولوژیک، امکان برنامه‌ریزی صحیح و پایدار در مدیریت منابع آب را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر، با هدف شبیه‌سازی جریان حوضهٔ آبخیز الند (واقع در حوضهٔ رود ارس) به‌عنوان آبخیزی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، مدل WEAP توسعه، واسنجی و اعتبارسنجی شد. به این منظور، یک دورهٔ آماری ۱۱ ساله (۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰) برای واسنجی و یک دورهٔ پنج‌ساله (۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵) به منظور اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی مدل در خروجی حوضهٔ آبخیز نشان داد شاخص‌های آماری ضریب تعیین و ضریب نش- ساتکلیف در دورهٔ واسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۵ و در دورهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۷۸ بودند. این نتایج بیان‌کنندهٔ عملکرد خوب مدل WEAP در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک اعم از بارش-رواناب، جریان پایه، آب زیرزمینی و سایر اجزای بیلان آبی حوضهٔ آبخیز الند است. در تحقیق حاضر، نتایج شبیه‌سازی سناریوی تأمین آب شرب منطقه از سد آق‌چای بیان‌کنندهٔ کاهش در افت سطح آب زیرزمینی و افزایش حجم آبخوان به میزان سالیانه ۵/۴ میلیون مترمکعب بود.

کلیدواژگان: اعتبارسنجی مدل، بیلان آب، توسعهٔ پایدار، مدیریت آب، واسنجی مدل.

* نویسنده مسئول

Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

مقدمه

مفهوم توسعهٔ پایدار منابع آب، تأمین نیازهای جمعیت فعلی بدون اثر منفی بر توانایی تأمین نیازهای نسل‌های آینده بوده و برنامه‌ریزی برای آن، مستلزم مدل‌سازی، طراحی و مدیریت سامانه‌های منابع آب است [۱]. بسیاری از مناطق در جهان با چالش‌های درخور توجهی در مدیریت آب‌های شیرین روبه‌رو هستند. تخصیص منابع محدود آب، کیفیت محیط زیست و سیاست‌های استفادهٔ پایدار از آب، مسائلی هستند که نگرانی در مورد آن‌ها رو به افزایش است [۲]. رویکرد مدیریت جامع منابع آب در شرایط مختلف آب و هوایی و اجتماعی- اقتصادی ضروری است [۳]. مدیریت صحیح و کارآمد منابع آب نیازمند شناخت آثار هیدرولوژیک توسعهٔ سامانه‌های آبیاری روی منابع آب حوضه‌های آبخیز است. همچنین، فرایندهای هیدرولوژیک بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه‌خشک، حساسیت بسیار زیادی در برابر تغییرات دارند [۴ و ۵].

آشکارسازی فرایندهای هیدرولوژیک حوضه‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف همواره مورد توجه محققان بوده است. مدل‌سازی هیدرولوژیک برای نشان‌دادن تأثیرات اعمال سیاست‌های مدیریتی بر منابع آب موجود، امری کاملاً پیچیده و دشوار است. این موضوع ضمن پیچیدگی مدل‌سازی، منشأ خطا در پیش‌بینی‌ها و عدم قطعیت در برآورد پارامترها می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی زیادی در مدل‌سازی هیدرولوژی حوضه‌ها پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر، مدل WEAP[1] با توجه به قابلیت زیاد و رویکردی یکپارچه برای توسعهٔ منابع آب، در شبیه‌سازی فرایندهای طبیعی (تبخیر و تعرق، رواناب، جریان پایه و...) و مؤلفه‌های مهندسی (مانند مخازن و پمپاژ از آب‌های زیرزمینی) کاربرد گسترده‌ای یافته است. این قابلیت‌ها به طراح امکان اعمال دیدگاه جامع‌تر از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب برای استفاده در حال و آینده را می‌دهد [۶ و ۷]. مدل WEAP، مسائل مربوط به الگوهای مصرف آب، راندمان تجهیزات، استفادهٔ مجدد، هزینه‌ها و تخصیص را همگام با مسائل مربوط به منابع (جریان‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، مخازن و انتقال‌های آب) لحاظ کرده است. همچنین، مدل WEAP آزمایشگاهی برای سنجش راهبردهای متنوع توسعه و مدیریت منابع آب است [۸]. مدل WEAP از نوعی مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثرسازی درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر شرط‌هاست. تمامی شرط‌ها به‌طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت عرضه و تقاضا تعریف می‌شود [۹ و ۱۰]. با استفاده از سری‌های زمانی اقلیم، مدل WEAP مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژی را با شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در سطح حوضهٔ آبخیز محاسبه می‌کند [۱۱].

Momblanch و همکارانش با استفاده از رویکرد مدل‌سازی WEAP، آثار تغییرات جهانی تغییر اقلیم و سناریوهای توسعهٔ اجتماعی و اقتصادی بر منابع آب Himalayan در هند را ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد تغییرات اقتصادی و اجتماعی در آینده نسبت به تغییرات آب و هوایی تأثیرات بسیار بیشتری بر منابع آب این منطقه خواهد داشت [۳]. Karmaoui و همکارانش با بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سیستم تأمین آب درهٔ Middle Draa در مراکش با مدل WEAP، بیان کردند که این مدل به‌عنوان نوعی ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری، پیچیدگی مسائل مربوط به آب را مورد توجه قرار می‌دهد [۱۲]. Gao و همکارانش با استفاده از مدل WEAP به ارزیابی استراتژیک محیط زیست چین پرداختند. آنها با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف نشان دادند مدل WEAP کارایی، قابلیت و انعطاف‌پذیری لازم را برای بررسی گزینه‌های مختلف مدیریتی در منابع آب دارد [۱۳]. Singh و همکارانش با ادغام روش‌های RS[2] و GIS[3] و مدل WEAP، مدل هیدرولوژیک حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ Mahanadi در هند را تهیه کردند و قابلیت این مدل را برای استفاده در برنامه‌ریزی‌های منابع آب و استفاده در آبخیزهای دیگر نشان دادند [۱۴]. Ingol-Blanco و McKinney با واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP در آبخیز Rio Conchos مکزیک و زیرآبخیز Rio Grande، عملکرد خوب مدل را گزارش دادند [۱۵]. Blanco و همکارانش با استفاده از ترکیب مدل WEAP و مدل بهینه‌سازی GAMS[4]، بیلان آب در حوضهٔ آبخیز Middle Guadiana واقع در کشور اسپانیا

1. Water Evaluation And Planning system

2. Remote Sensing (RS)
3. Geographic Information Systems (GIS)
4. General Algebraic Modeling System (GAMS)

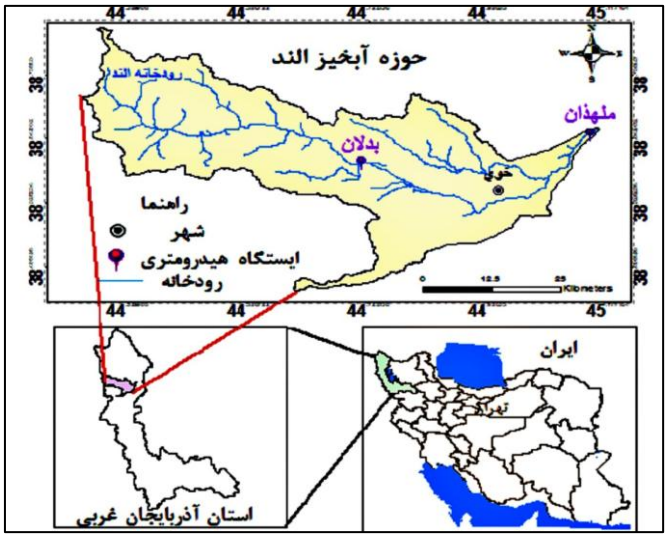
را مدل‌سازی کردند. آنها ضریب نش- ساتکلیف برای ایستگاه‌های هیدرومتری در دورهٔ واسنجی را بین ۰/۷۳ تا ۰/۸۸ گزارش کردند [۱۶]. محمدپور و همکارانش با بررسی تأثیرات هیدرولوژیک توسعهٔ آبیاری تحت فشار در مقیاس حوضهٔ آبخیز اهرچای، مدل WEAP را واسنجی و اعتبارسنجی کرده و عملکرد خوب این مدل را در مدل‌سازی آثار هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز نشان دادند [۵]. احمدآلی و همکارانش سناریوهای مدیریت آب و تأثیر تغییر اقلیم بر پایداری محیط زیستی و کشاورزی حوضه‌های آبخیز زرینه‌رود و سیمینه‌رود را با مدل WEAP ارزیابی کردند. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل، عملکرد خوب آن را نشان داد [۶]. مطالعات گذشته نشان می‌دهد بررسی تأثیرات هیدرولوژیک مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبخیز با استفاده از مدل‌سازی مورد توجه محققان بوده است. با توجه به شرایط پیچیدهٔ هیدرولوژیک ناشی از دخالت‌های انسانی و وضعیت بحرانی منابع آب در حوضهٔ آبخیز الند، پژوهش حاضر با هدف توسعهٔ مدل هیدرولوژیک این حوضهٔ آبخیز با استفاده از مدل WEAP برای نخستین‌بار در این منطقه برنامه‌ریزی شد. با توسعهٔ این مدل در منطقهٔ طرح می‌توان با شبیه‌سازی، سناریوهای مختلفی بر اساس راه‌کارهای ارتقای مدیریت آب و شرایط موجود برای منابع آب منطقه برنامه‌ریزی کرد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

محدودهٔ مطالعاتی در شهرستان خوی، شمال غرب استان آذربایجان غربی در محدودهٔ جغرافیایی ۴۷۵۰۰۰ تا ۵۲۰۰۰۰ طول شرقی و ۴۲۴۰۰۰۰ تا ۴۲۹۶۰۰۰ عرض شمالی واقع است (شکل ۱). دشت خوی یکی از مراکز مهم تولیدات کشاورزی در استان و سطح کشور و بخشی از حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ الند است، که با کوهستان‌های مرتفع محصور شده است. شیب عمومی منطقه از غرب به شرق و ارتفاع متوسط آن ۱۱۵۰ متر است. منابع آب‌های سطحی دشت خوی از رودخانه‌های قطور، الند، قره‌سو و قودوغ بوغان و همچنین چشمه‌های موجود در مرکز دشت تشکیل شده است. رودخانهٔ قطور مهم‌ترین رودخانهٔ این دشت است، به‌طوری که سایر رودخانه‌ها در نهایت به آن جاری می‌شوند. رودخانهٔ الند از شاخه‌های مهم رودخانهٔ قطور است که از کوه‌های مرزی ایران و ترکیه به نام کانی‌زیارت، نظربیگ و حاجی‌بیگ سرچشمه می‌گیرد. همچنین، زیرحوضهٔ آبخیز رودخانهٔ الند بخشی از حوضهٔ آبخیز بزرگ قطورچای است. منابع آب زیرزمینی این منطقه شامل آبخوان دشت خوی می‌شود. خشکسالی‌های اخیر و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی سبب تخلیهٔ منابع آب زیرزمینی دشت‌های استان آذربایجان غربی از جمله دشت خوی شده است. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت خوی درخور توجه بوده و سالانه بیش از ۲۴۰ میلیون‌متر مکعب است. بنا به گزارش‌های موجود، بیلان منابع زیرزمینی این دشت طی سال‌های اخیر منفی بوده است، به طوری که سطح آب زیرزمینی در آبخوان خوی ۶/۷۱- متر کاهش یافته است [۱۷]. افت شدید آبخوان و تغذیهٔ مصنوعی دشت در دهه‌های اخیر، شرایط پیچیدهٔ هیدرولوژیک را به‌لحاظ مدیریت منابع آب، برای این دشت به‌وجود آورده است. بنابراین، نیاز به اعمال سیاست‌های مناسب برای مدیریت منابع محدود و ارزشمند این منطقه است.

اقلیم منطقهٔ یادشده، نیمه‌خشک و سرد با متوسط بارندگی ۳۴۴ میلی‌متر و میانگین تبخیر ماهانه در ایستگاه خوی ۱۴۳۴ میلی‌متر است. از نظر تقسیم‌های واحدهای زمین‌ساختی ایران، منطقهٔ خوی جزء زون خوی-مهاباد بوده و در این زون با توجه به واحدهای چینه‌شناسی و محیط تشکیل آنها، فعالیت‌های ماگمایی زیاد است. بنابراین، رخساره‌های متامورفیک نیز در آن فراوان یافت می‌شود. به‌طور کلی، رسوبات آبرفتی دشت خوی حاصل فعالیت رودخانه‌های الند و قطور است. رسوبات این دوره به‌دلیل منفصل‌بودن دانه‌ها و گسترش زیاد در سطح دشت و نواحی بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها، از نظر هیدروژئولوژی اهمیت فراوانی دارند. جنس غالب رسوبات از ذرات شن و ماسه و رس تشکیل شده است. بخشی از این تراس‌ها قدیمی است و ذرات با خمیری از رس به هم متصل شده‌اند و از نفوذپذیری آنها کاسته شده است. تراس‌های جدید که از دانه‌های شن و ماسه تشکیل شده و در مسیر رودخانه واقع شده‌اند، از دانه‌های منفصل به وجود آمده‌اند و نفوذپذیری بسیار خوبی دارند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مطالعه‌شده و ایستگاه‌های هیدرومتری موجود

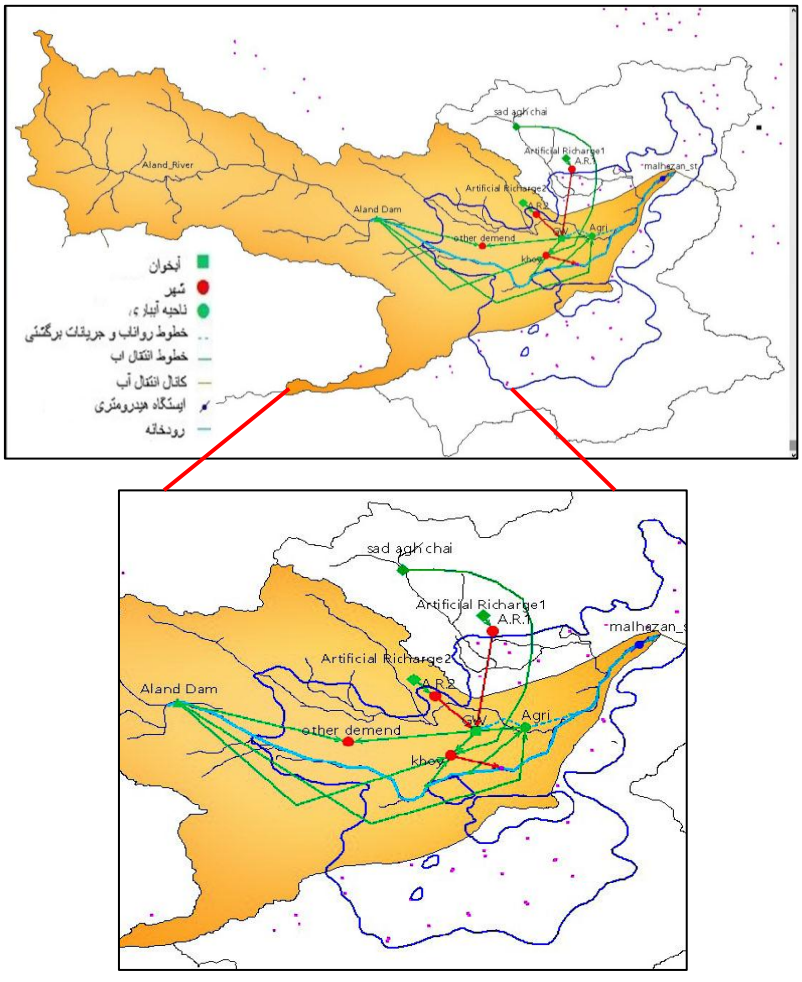
اسلوب‌شناسی مدل WEAP

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) نوعی بستهٔ مدل‌سازی بوده که قادر به ارزیابی یکپارچه‌ای از اقلیم، هیدرولوژی، کاربری اراضی، تأسیسات آبیاری و اولویت‌های مدیریت آب حوضهٔ آبخیز است. در مدل WEAP، تأمین تمامی محدودیت‌ها به‌طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت عرضه و تقاضا تعریف می‌شود. مدل WEAP در هر گام زمانی معادلهٔ تعادل جرمی آب را برای هر گره و شاخه محاسبه می‌کند [۷، ۹ و ۱۰]. با استفاده از سری‌های زمانی اقلیم، مدل WEAP مؤلفه‌های چرخهٔ هیدرولوژیک را با شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در سطح حوضهٔ آبخیز محاسبه می‌کند [۱۱]. در فرایند شبیه‌سازی، رفتار هیدرولوژیک حوضهٔ آبخیز توسط مدل WEAP، ابتدا در مرحلهٔ نخست، مؤلفه‌های زمانی و مکانی سامانهٔ آبخیز تعریف شده و سپس در مرحلهٔ دوم وضعیت فعلی آبخیز بر اساس منابع و مصارف شبیه‌سازی می‌شود. برای واسنجی مدل یا به بیانی، تعیین پارامترهای بهینهٔ آن، از ابزار PEST[1] (پیوست‌شده در مدل WEAP) استفاده می‌شود. PEST ابزار کارآمدی است که از طریق فراهم‌سازی مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی مدل، واسنجی یک یا چند متغیر به‌صورت هم‌زمان را میسر می‌کند. واسنجی مدل با مقایسهٔ دبی شبیه‌سازی‌شدهٔ ماهیانه با دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری منتخب در منطقه انجام شد. پس از واسنجی، بدون تغییر در متغیرهای ثابت و پارامترهای واسنجی‌شده، نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌شده ایستگاه منتخب در حوضه برای دورهٔ شبیه‌سازی مقایسه و اعتبارسنجی شد. تبیین و تدوین سناریوها (گزینه‌ها) گام سوم بود که مجموعه‌ای از فرضیه‌های مربوط به تأثیرات تغییر سیاست‌ها، هزینه‌ها و شرایط اقلیمی در آینده را در بر گرفت. در نهایت، ارزیابی مدل به‌عنوان گام چهارم در کاربرد مدل بود که در آن گزینه‌ها با توجه به کفایت آب، هزینه‌ها و سودها، سازگاری با اهداف محیط زیستی و حساسیت نسبت به عدم قطعیت‌ها در متغیرهای کلیدی مد نظر ارزیابی شد [۱۸]. اگرچه در مدل WEAP روش‌های متعددی مانند نیازهای آبیاری (رویکرد ضرایب ساده‌شده)، بارش-رواناب، رطوبت خاک، MABIA و مدل رشد گیاه (PGM) در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی آبخیز از جمله تبخیر و تعرق، رواناب، نفوذ و آبیاری استفاده می‌شوند [۱۹]، در پژوهش حاضر به‌دلیل کمبود اطلاعات خاک منطقه، صرفاً از روش بارش-رواناب (ضرایب ساده) برای مدل‌سازی هیدرولوژی منطقهٔ مطالعه‌شده استفاده شد. روش بارش-رواناب مدل WEAP بر پایهٔ توابع تجربی استوار است. از این‌رو، در پژوهش حاضر نیاز آبی محصولات موجود در آبخیز مطالعه‌شده با استفاده از فرایندهای هیدرولوژیک و آگروهیدرولوژیک مانند بارش، تبخیر و تعرق، رشد محصولات بر مبنای آبیاری و بارش محاسبه شدند. از طرفی، اطلاعات کاربری اراضی، اقلیم منطقهٔ مطالعه‌شده (میزان بارندگی: ماه/ میلی‌متر)، بارش مؤثر و در نهایت مقادیر تبخیر استخراج شدند.

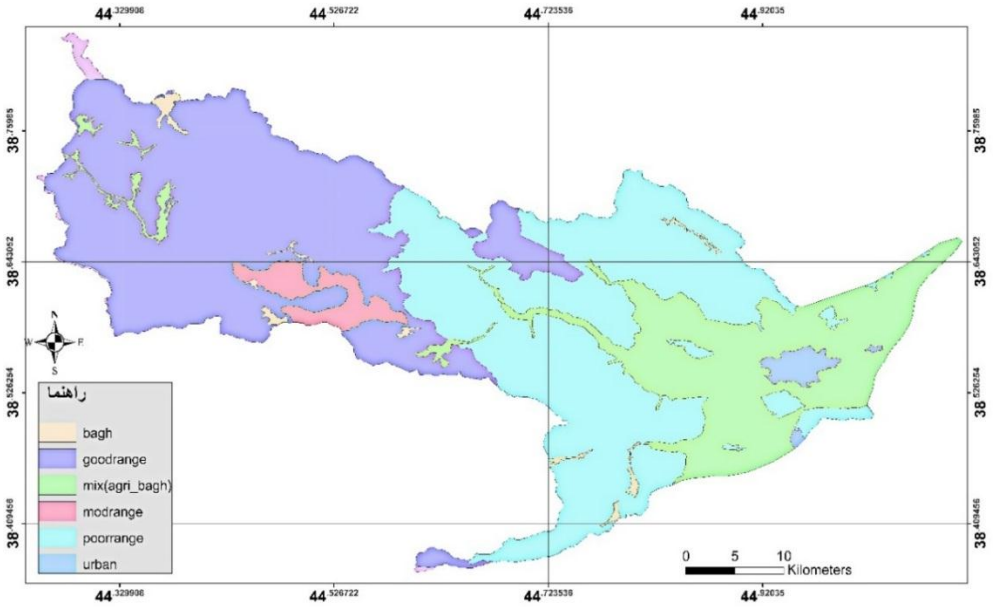
1. Parameter Eestimation

ساختار مدل WEAP برای منطقهٔ مطالعه‌شده و اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی

در تحقیق حاضر، مدل WEAP21 برای دشت خوی توسعه داده شد (شکل ۲). این مدل‌سازی شامل یک رودخانهٔ الند به‌عنوان واحد هیدرولوژیک اصلی دشت، یک ناحیهٔ کشاورزی (زراعی و غیرزراعی)، دو نقطهٔ برداشت نیاز آب شهر خوی، یک آبخوان دشت خوی، پنج خط انتقال آب به نقاط نیاز، دو خط رواناب و نفوذ، یک خط جریان آب بازگشتی و یک ایستگاه هیدرومتری می‌شود. برای انجام پژوهش حاضر، از یک دورهٔ آماری ۱۶ ساله (سال‌های آبی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵) استفاده شد. داده‌های هواشناسی بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و کسر ابرناکی مورد نیاز از ۲۸ ایستگاه هواشناسی موجود در داخل و نزدیک محدودهٔ حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده (چهار ایستگاه سینوپتیک، ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی و ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی) استخراج شد. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده در جدول ۱ ارائه شده است. به این منظور، متوسط مقادیر هر یک از متغیرهای هواشناسی یادشده برای کل آبخیز با استفاده از روش تیسن برآورد شد. در نهایت، اطلاعات پوشش گیاهی منطقه از لایهٔ کاربری اراضی منطقهٔ مطالعه‌شده استخراج شد (شکل ۳) [۲۰ و ۲۱]. همچنین، درصد مساحت تحت پوشش هر یک از کاربری‌های اراضی موجود در آبخیز مطالعه‌شده در جدول ۲ ارائه شده است. آمار و اطلاعات چاه‌های پیزومتری (۷۳ عدد) نیز از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی تهیه شده است. از طرفی، مقادیر مصارف آب در بخش‌های مختلف کشاورزی و شرب برای طول دورهٔ مطالعه‌شده از سازمان‌های مربوطه تهیه شد. سپس، سطح زیر کشت و ترکیب کشت محصولات غالب زراعی و باغی در سال‌های مختلف و همچنین سامانه‌های آبیاری موجود در منطقه (آبیاری‌های سطحی، بارانی و قطره‌ای) نیز استخراج شد. مدل‌سازی در گام زمانی ماهانه برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک جریان انجام شد.



شکل ۲. شکل کلی مدل توسعه‌یافتهٔ WEAP در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی



شکل ۳. نقشهٔ کاربری اراضی در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده

ایستگاه	ارتفاع (M)	موقعیت جغرافیایی		سال تأسیس	متوسط سالانه آبدهی (m^3/s)	مساحت حوضه (KM^2)
		طول	عرض			
ملهذان	۱۰۲۰	۴۵^0,۰۶′	۳۸^0,۳۹′	۱۳۵۷	۰/۷۶	۱۷۵۶
بدلان	۱۵۰۰	۴۴^0,۴۳′	۳۸^0,۳۶′	۱۳۵۳	۴	۷۰۵

جدول ۲. درصد پوشش کاربری‌های اراضی در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

نوع کاربری	شهر	مرتع	سطحی (۴۹/۸۱)		تحت فشار (۰/۱۸)	
			باغی	زراعی	باغی	زراعی
درصد	۰/۵۷	۴۹/۴۴	۹/۵	۹۰/۵	۵/۷	۹۴/۳

در پژوهش حاضر بارش مؤثر به‌عنوان یکی از متغیرهای ورودی مدل از طریق روش درصدی محاسبه شد [۲۲]. نیاز آبی محصولات نیز به‌عنوان متغیر ورودی دیگر مدل مطابق با روش پیشنهادی FAO [۱۹] طی مراحل ارائه‌شده در روابط ۱ تا ۳ محاسبه شد.

$$\text{Runoff} = \text{MAX}(0: \text{Precipitation Available For ET} - \text{ET Potential}) + (\text{Precipitation} * (1 - \text{Precipitation Effective})) + (1 - \text{Irrigation Fraction}) * \text{Supply} \quad (۱)$$

$$\text{Runoff to GW} = (\text{Runoff} * \text{Runoff to GW Fraction}) \quad (۲)$$

$$\text{Runoff to Surface water} = (\text{Runoff} * (1 - \text{Runoff to GW Fraction})) \quad (۳)$$

که در آن، Precipitation بارش (میلی‌متر)، Precipitation Effective بارش مؤثر (درصد)، Precipitation Available For ET مقدار آب موجود برای تبخیر و تعرق (میلیون مترمکعب)، ET Potential تبخیر تعرق بالقوه (میلیون مترمکعب)، Irrigation Fraction درصدی از آب آبیاری (درصد)، Supply مقدار آب مورد نیاز آبیاری (میلیون مترمکعب)، Runoff to GW Fraction ضریب رواناب جریان‌یافته به آب زیرزمینی، Runoff to GW رواناب خروجی به آب‌های زیرزمینی (میلیون مترمکعب)، Runoff to Surface Water رواناب خروجی به آب‌های سطحی (میلیون مترمکعب) هستند.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

واسنجی و اعتبارسنجی یک مدل برای به حداقل رساندن خطاها و مطمئن شدن از اعتبار و قابل اطمینان بودن نتایج مدل ضروری است [۶، ۷ و ۱۶]. در پژوهش حاضر، بازهٔ زمانی (سال آبی) ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ به‌ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مد نظر قرار گرفتند. به این منظور، مقادیر دبی مشاهده‌ای در ایستگاه هیدرومتری ملهذان برای واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. به‌منظور کاهش حداکثری خطاها و در نهایت دست‌یابی به نتایج قابل اطمینان، متغیرهای ورودی مدل با استفاده از روش تهیهٔ رگرسیون غیرخطی (الگوریتم گاوس-مارکوارت-لونبرگ) در ابزار PEST (افزوده‌شده به مدل WEAP) واسنجی شدند [۲۳]. پس از واسنجی متغیرهای مدل و دست‌یابی به مناسب‌ترین کارایی، اعتبار مدل نیز ارزیابی شد. برای ارزیابی کمّی نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)[1]، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)[2] و ضریب نش-ساتکلیف (NSE)[3] استفاده شد (جدول ۴). شاخص‌های آماری ضریب تعیین و نش-ساتکلیف بین صفر و یک متغیرند و مقادیر زیاد آن‌ها، کارایی زیادشان را نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر شاخص جذر میانگین مربعات خطا نیز بیش از صفر متغیرند و مقادیر حداقل آن، کارایی زیاد مدل را نشان می‌دهند [۶، ۱۶ و ۲۴ـ ۲۷].

کاربرد مدل WEAP در تحلیل سناریوهای مدیریت آب

به‌طور کلی، مدل‌های هیدرولوژی برای درک چگونگی جریان آب درون یک حوضهٔ آبخیز در پاسخ به رویدادهای هیدرولوژیک، کاربرد دارند. در حالی که مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب در درجهٔ نخست روی مدیریت تخصیص آب به‌ویژه در شرایط دخالت‌های انسانی متمرکزند (برای مثال: تصمیم‌گیری دربارهٔ عرضه و تقاضا). ادغام این دو مؤلفه از طریق یک چارچوب تحلیلی واحد، امکان‌پذیر است. به این منظور، مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب WEAP، پلی بین هیدرولوژی حوضه و مدیریت آب با ترکیب فرایند هیدرولوژیک- فیزیکی در چارچوب مدیریت آب عمل می‌کند [۹ و ۱۰] و قابلیت آن در تجزیه و تحلیل سناریوهای مدیریت منابع آب به اثبات رسیده است. در پژوهش حاضر نیز سناریوهای با هدف کمّی‌سازی تغییرات هیدرولوژی حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده ناشی از تأثیر تغییر شرایط محیطی و عوامل انسانی بر منابع آب با استفاده از مدل WEAP ارائه شد [۲۸]. از این‌رو، پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل در تولید دبی جریان و تعیین شرایط پایهٔ حوضه، گام‌های مشابه برای تولید دبی جریان بر اساس راه‌کارهای مدیریتی تدوین شد. به سبب دخالت‌های انسانی در برداشت از منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی با هدف تأمین آب شرب منطقه و تهدید جدّی منابع آب این آبخیز، شبیه‌سازی و ارزیابی تأثیرات راه‌کارهای جایگزین بر رفتار هیدرولوژیک آبخیز در آینده از طریق تدوین و بررسی سناریوهای کاربردی ضروری است. از این‌رو، در پژوهش حاضر دو سناریو تدوین شد که عبارت‌اند از: ۱. سناریوی پایه یا مرجع (S۰) براساس شرایط اقلیمی منطقه و وضع موجود و ۲. سناریوی ۱ (S۱) با تأکید بر سناریوی پایه و شرایط احداث سد آق‌چای. در سناریوی پایه، به شبیه‌سازی شرایط واقعی با هدف برنامه‌ریزی برای وضعیت موجود و پیش‌بینی برای آینده اقدام شد. همچنین، سناریوی S۱ با فرض احداث یک سد در خارج از حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ الند با هدف تأمین آب شرب منطقه به میزان ۳۶/۵ میلیون مترمکعب در سال شبیه‌سازی شد. به بیانی دیگر، در این سناریو برای تأمین آب شرب منطقه، با انتقال آب از آبخوان دشت خوی به حوضهٔ آبخیز الند، امکان احیای مجدد منابع آب زیرزمینی منطقه ارزیابی شد.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، ابتدا پارامترهای ضریب گیاهی کاربری‌های غیرزراعی و بارش مؤثر برای ایستگاه هیدرومتری ملهذان با ابزار PEST واسنجی شد. نتایج مقادیر بهینه‌شده در جدول ۳ ارائه شده است. ابزار PEST برای برآورد مقادیر متوسط دبی ماهانه برای ایستگاه هیدرومتری منتخب، با روش سعی و خطا مقادیر ضریب تعیین و ضریب نش- ساتکلیف را بیشینه و جذر میانگین مربعات خطا را کمینه کرده است. مقادیر آماری و شاخص‌های مربوط به ارزیابی کمّی نتایج واسنجی و

1. Coefficient of Determination (R^2)
2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

اعتبارسنجی مدل برای ایستگاه هیدرومتری مطالعه‌شده در جدول ۴ ارائه شده است. براساس جدول ۴، مقدار ضریب نش- ساتکلیف برای جریان ماهانه، ۰/۷۸ در دورهٔ واسنجی و ۰/۸۵ طی دورهٔ اعتبارسنجی بود.

در حالت کلی، انطباق بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی با توجه به حدود شاخص‌ها، در حد مطلوبی بود. این نتایج بیان می‌کند که می‌توان از مدل WEAP21 برای شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف در برنامه‌ریزی منابع آب استفاده کرد. دبی‌های جریان ماهانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برای دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه ملهذان و همبستگی بین آنها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود؛ داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی تطابق خوبی داشتند. بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد تجمع نقاط در بخش پایین نمودارهای واسنجی و اعتبارسنجی بیشتر است، به این دلیل که بخش درخور توجهی از دبی‌های مشاهداتی در ایستگاه یادشده در محدودهٔ کمتر از یک مترمکعب بر ثانیه بوده است.

از خروجی‌های مهم مدل WEAP پارامترهای بیلان آب بوده که نتایج سالانهٔ آن برای کل محدودهٔ مطالعه‌شده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۶ (الف و ب) ارائه شده است. پارامترهای بیلان ورودی با علامت مثبت و پارامترهای بیلان خروجی با علامت منفی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بارندگی و آبیاری پارامترهای ورودی بیلان به منطقه و تبخیر- تعرق، رواناب سطحی و جریان به آب‌های زیرزمینی پارامترهای خروجی بیلان از منطقه هستند.

همچنین، نتایج شبیه‌سازی در بخش سناریونویسی نشان داد با اجرای سناریوی ۱، شیب افت تراز آب زیرزمینی کاهش پیدا کرده و حجم آبخوان سالانه به‌طور متوسط ۵/۴ میلیون مترمکعب نسبت به شرایط موجود افزایش پیدا خواهد کرد (شکل ۷). علت این امر را می‌توان کاهش برداشت از آبخوان برای تأمین آب شرب منطقه و ذخیرهٔ آن در آبخوان دانست. نتایج این سناریو نشان داد در صورت اجرای اقدامات مدیریتی مناسب در منطقه برای تأمین نیازهای اساسی همانند تأمین آب شرب، منابع آب زیرزمینی دشت بهبود پیدا می‌کند و از حالت بحرانی خارج خواهد شد (شکل ۷).

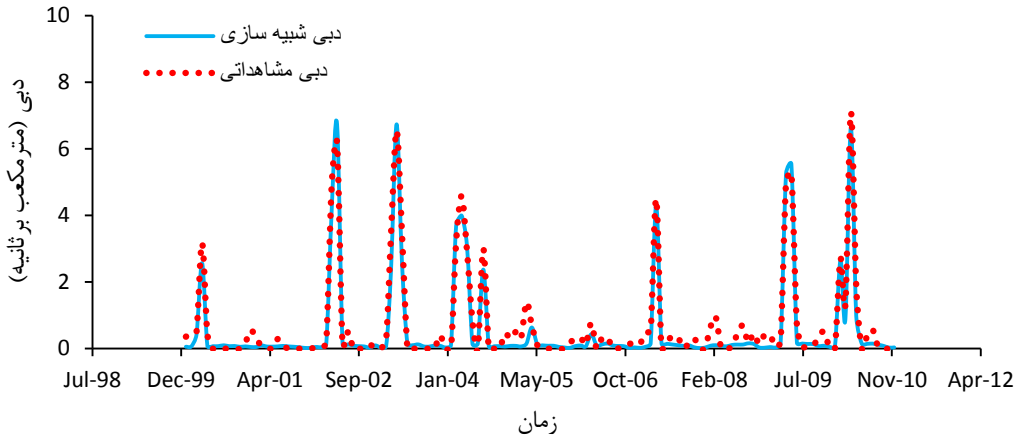
جدول ۳. پارامترهای واسنجی مدل WEAP21 در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

حوضه/ پارامتر	ضریب گیاهی کاربری‌های غیرزراعی (بدون واحد)	بارش مؤثر (درصد)
زراعت دیم	۰/۳۴	۸۰
مرتع	۰/۳۵	۸۰
زراعت آبی سطحی [۱]	-	۸۰
باغ سطحی[۱]	-	۸۰
تحت فشار (باغی)[۱]	-	۸۰
تحت فشار (زراعت آبی)[۱]	-	۸۰

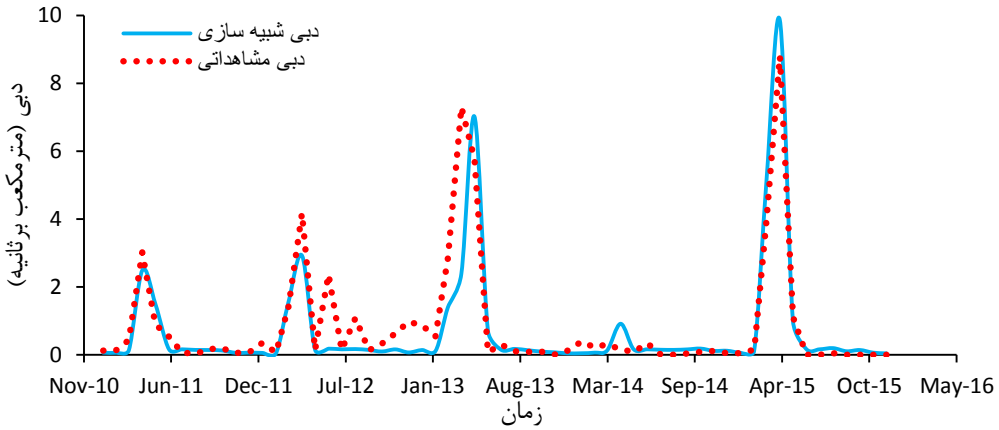
۱ مقدار ضرایب گیاهی به عنوان پارامتر واسنجی تعریف نشده است.

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های ارزیابی نتایج مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP21 در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

نام ایستگاه هیدرومتری	واسنجی			اعتبارسنجی		
	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	NSE	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	NSE
ملهذان	۰/۹۶	۰/۳۱	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۷۸

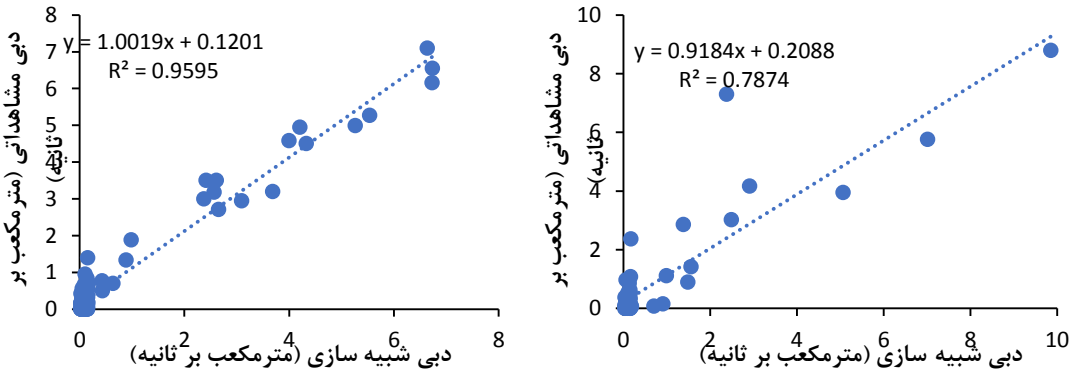


الف) واسنجی

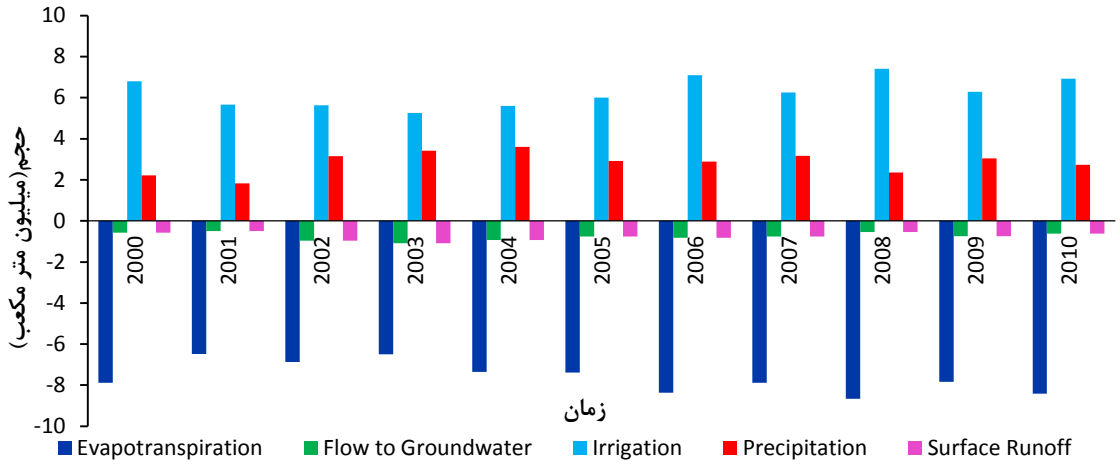


ب) اعتبارسنجی

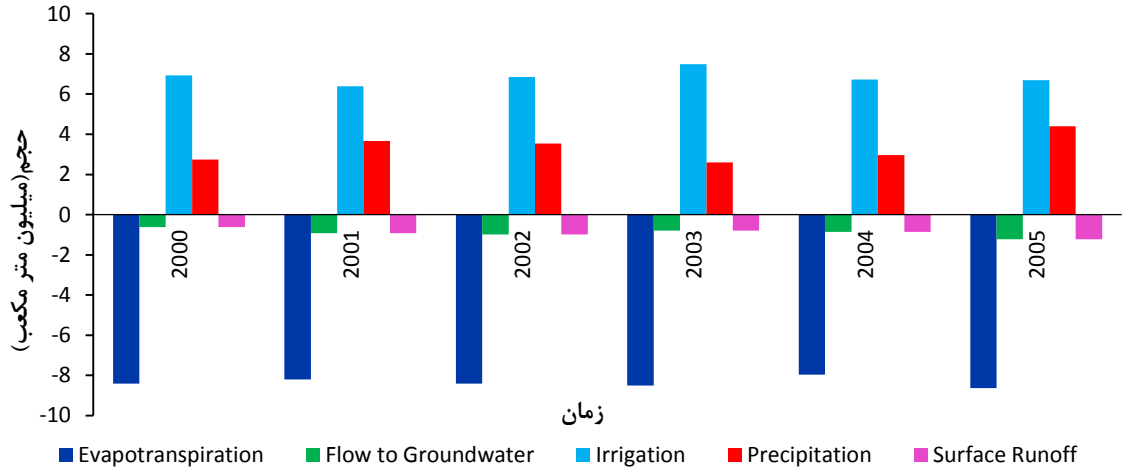
شکل ۴. دبی‌های ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی در ایستگاه هیدرومتری ملهذان برای: الف) دوره‌های واسنجی و ب) اعتبارسنجی مدل WEAP در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی



شکل ۵. نمودار همبستگی دبی‌های مشاهداتی در مقابل شبیه‌سازی در ایستگاه هیدرومتری ملهذان برای الف) دوره‌های واسنجی و ب) اعتبارسنجی مدل WEAP در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

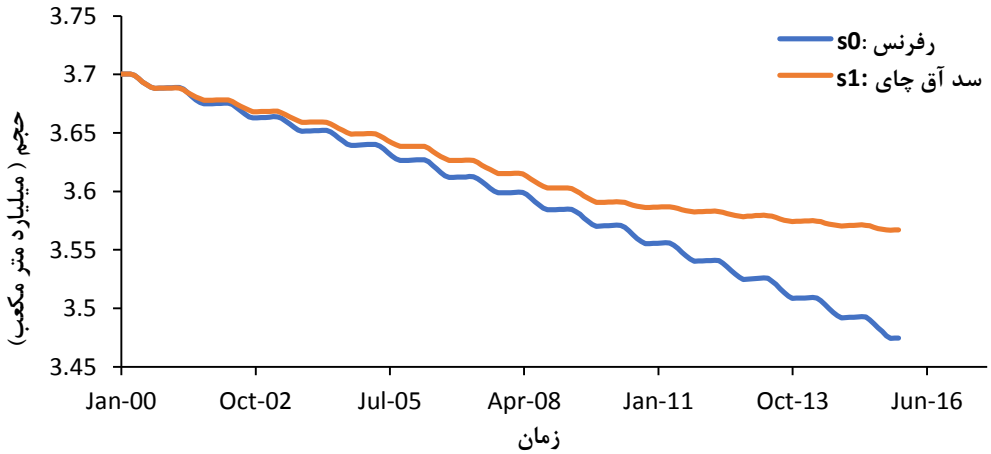


الف) واسنجی



ب) اعتبارسنجی

شکل ۶. تغییرات سالانهٔ پارامترهای بیلان آب برای محدودهٔ مطالعه‌شده در: الف) دورهٔ واسنجی و ب) اعتبارسنجی مدل WEAP21 در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی



شکل ۷. تغییرات سالانهٔ حجم آب زیرزمینی برای محدودهٔ مطالعه‌شده با اعمال سناریوی حذف برداشت برای آب شرب در حوضهٔ آبخیز الند، آذربایجان غربی

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل WEAP با هدف آگاهی از رفتار هیدرولوژیک دشت خوی واقع در زیرحوضهٔ آبخیز الندچای توسعه و سپس، واسنجی و اعتبارسنجی شد. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در دو دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی بیان‌کنندهٔ عملکرد خوب مدل WEAP در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده بود. همچنین، در راستای پیش‌بینی پاسخ‌های هیدرولوژیکی منطقهٔ مطالعه‌شده نسبت به رفتارهای انسانی، سناریوی احداث سد آق‌چای با هدف تأمین آب شرب منطقه به‌جای برداشت از منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی، به‌عنوان نوعی راه‌کار مدیریتی برای حفاظت از آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP اجرا شد. نتایج نشان داد با اجرای این سناریو، روند نزولی حجم و تراز آبخوان تعدیل یافته و حجم آبخوان (سالانه به‌طور متوسط ۵/۴ میلیون مترمکعب) نسبت به شرایط کنونی افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین، یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد با اعمال اقدامات مدیریتی مناسب در منطقه، احیای مجدد منابع آب زیرزمینی و خروج از حالت بحرانی امکان‌پذیر خواهد شد. در غیر این‌صورت، منابع ارزشمند آب زیرزمینی منطقهٔ مطالعه‌شده تهدید جدّی شده و تبعات جبران‌ناپذیری از جمله تنزل کیفیت آب زیرزمینی، فرونشست زمین، خشک‌شدن و یا کاهش آبدهی چاه‌ها و به‌تبع آن توسعهٔ کف‌شکنی و افزایش هزینهٔ پمپاژ آب خواهد داشت. بنابراین، تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی منطقه امری ضروری است. بر این اساس، به منظور توسعهٔ منابع آب کشور و ارائهٔ راه‌کارهای عملی برای مدیریت صحیح منابع آب با توجه به خشکسالی دهه‌های اخیر و کم‌آبی‌های منطقه، بررسی تأثیرات هیدرولوژیک طرح‌های توسعهٔ منابع آب با مدل‌سازی، همواره باید مورد توجه محققان، مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب کشور قرار بگیرد.

منابع

[1].Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P. and Villars, M.T., Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications. Paris: Unesco. 2005.

[2].Stockholm Environment Institute (SEI), Water evaluation and planning system, WEAP. Stockholm Environment Institute, Boston, USA, 2016. HYPERLINK "http://www.weap21.org" http://www.weap21.org

[3].Momblanch, A., Papadimitriou, L., Jain, S. K., Kulkarni, A., Ojha, C. S., Adeloye, A. J., & Holman, I. P., Untangling the water-food-energy-environment nexus for global change adaptation in a complex Himalayan water resource system. Science of the Total Environment, 2019; 655, 35-47.

[4].Rezayan, A., Rezayan, A.H, Future studies of water crisis in Iran based on processing scenario. Iranian Journal of Ecohydrology, 2016; 3(1), 1-17.

[5].Gharechaei, H., Moghaddam Nia, A., Malekian, A., Ahmadi, A., Separation of the effects of climate variability and human activities on runoff of Bakhtegan Basin. Iranian Journal of Ecohydrology, 2016; 2(4), 445-454.

[6].Mohammadpour, M., Zeinalzadeh, K., Rezaverdinejad, V., and Hessari, B., WEAP model calibration and validation in simulating the impact of irrigation systems change on the Ahar-Chai basin hydrological response. Iranian Journal of Ecohydrology, 2016; 3(3), 477-490.

[7].Ahmadaali, J., Barani, G-A., Qaderi, K., and Hessari, B., assessment of Water Management Scenarios and the Impact of Climate Change on Environmental and Agricultural Sustainability (Case Study: Zarrinehrud and Siminehrud River Basins). Iranian Journal of Ecohydrology, 2017; 5(4), 1203-1217.

[8].Sieber, J., Purkey, D., Water Evaluation and Planning System. User Guide for WEAP21; Stockholm Environment Institute, U.S. Center: Somerville, MA, USA, 2011; Available online: http://www.weap21.org/ (accessed on 1 April 2014).

[9].Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A., WEAP21: A Demand-, Priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. Water International, 2005a; 30(4), 487-500.

[10]. Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A. and Galbraith, H., WEAP21: A Demand-, Priority-, and preference-driven water planning model. Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation. Water International, 2005b; 30(4), 501-512.

[11]. Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T. E., A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics, 2015; 120, 49-58.

[12]. Karmaoui, A., Minucci, G., Messouli, M., Khebiza, M. Y., Ifaadassan, I., & Babqiqi, A., Climate Change Impacts on Water Supply System of the Middle Draa Valley in South Morocco. In Climate Change, Food Security and Natural Resource Management, Springer, Cham. 2019; 163-178.

[13]. Gao, J., Christensen, P., and Li, W., Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China. Journal of Environmental Management, 2017; 198, 363-371.

[14]. Singh, M., Singh, R., Bhodoriya, PBS., Shinde, V., Mishra, A., Narwade, A.V., and Pradhan, S., Integration with Remote sensing and GIS Catchment Scale Hydrological Modeling in Middle Reach of Mahanadi River Basin using Simplified Coefficient Model. International Journal of Tropical Agriculture © Serials Publications, 2016; 34 (7), 2011-2018.

[15]. Ingol-Blanco, E. and McKinney, D. C., Development of a hydrological model for the Rio Conchos Basin. Journal of Hydrologic Engineering, 2012; 18(3), 340-351.

[16]. Blanco-Gutiérrez, I., Varela-Ortega, C. and Purkey, D. R., Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. Journal of environmental management, 2013; 128, 144-160.

[17]. Water Balance Report of Regional Water Company of West Azarbaijan, 1394.

[18]. Najafi-Jilani, A., Zakeri-Niri, M., and Hosseini, S.H., Applications of WEAP software in water resources planning. International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development.2013. Tabriz Islamic Azad University, Tabriz. https://www.civilica.com/Paper-ICCAU01-ICCAU01_0871.html.

[19]. Pirnia, T., Zainalzadeh, K., Hessari, B., Hydrological Model for Agh Chai Basin: Calibration and Validation, Master's thesis, Urmia University, Urmia, Iran, 2013.

[20]. Gholipour H., Jalili, Fa., Evaluation of the Efficiency of Experimental Methods for Estimating Erosion and Sediment in Aland River sub-basin, Master thesis, Khoy Azad University, 2017.

[21]. Irrigation status reports on the studies plan of feasibility of the Iranian-Turkish border rivers, Regional Water Company of West Azerbaijan, 1985.

[22]. Khaleghi N., Comparison of effective rainfall estimation methods in agriculture. Iranian Journal of Water and Sustainable Development, 2016; 2(2), 51-58.

[23]. Doherty, J., Brebber, L., Whyte, P., PEST: Model-Independent Parameter Estimation. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia.1995; 140 pp.

[24]. Schlote, A., Hennigs,V., and Schaffer, U., Water Balance for the Aleppo Basin, Syria Implications of Land Use on Simulated Groundwater Abstraction and Recharge. International Conference Hydrogeology of Arid Environments. Federal Institute for Geosciences, 2012.

[25]. Cai, X., McKinney, D.C., Rosegrant, M.W., Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region .Agric. Syst, 2003; 1066-1043, 76.

[26]. Vafakhah, M., Javadi, M.R., Najafi Majd, J., Effect of Land Use Changes on Runoff Depth in Chalousrud Watershed. Iranian Journal of Ecohydrology, 2015; 2(2), 211-220.

[27]. Hessari, B., Upstream/downstream hydrological interactions of supplemental irrigation development in rain-fed areas of upper Karkheh river basin. Ph. D. dissertation, University of Shaheed Chamran, Ahvaz, Iran, 2012. (Persian).

[28]. Santikayasa, I. P., Babel, M. S., Shrestha, S., Assessment of the impact of climate change on water availability in the Citarum river basin, Indonesia: The use of statistical downscaling and water planning tools. In Managing Water Resources under Climate Uncertainty, Springer International Publishing. 2015; 45-64.