Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۲/ شماره ۴/ پیاپی ۳۱/ زمستان ۱۳۹۷ (۱۱-۲۴)

ارزیابی اثرهای سناریوهای توسعه‌ای و اقلیمی بر آیندهٔ منابع و مصارف آبی حوضه بهشت‌آباد با استفاده از رویکرد پویایی سیستم

فاطمه مهرشاد[۱]، مجید اسماعیلیان[۲*] و داریوش رحیمی[۳]

چکیده

در حوضه‌های رودخانه، زیرسیستم‌های اجتماعی، اقتصادی و طبیعی گوناگونی با هم در ارتباط هستند و بر یکدیگر اثر می‌گذارند. اطلاع از برهم‌کنش‌های این زیرسیستم‌ها و در نظر داشتن سناریوهای آیندهٔ آنها در اتخاذ تصمیم‌های کارآمدترِ سیاست‌گذاران مؤثر است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن شرایط توسعه، نیازهای آینده و پارامترهای هیدرولوژیکی در افقِ آیندهٔ حوضه بهشت‌آباد، چشم‌انداز منابع و مصارف آب این حوضه تخمین زده شد. برای این منظور، ابتدا با مرور ادبیات و مصاحبه با متخصصان و کارشناسان، اطلاعات مورد نیاز جمع‌آوری و به‌روش دلفی تلفیق، سپس با بهره‌گیری از تکنیک مدل‌سازی پویایی سیستم، مدلی از منابع و مصارف آبی آن حوضه طراحی شد. شبیه‌سازی‌های مدل برای سناریوهای گوناگون توسعه‌ای و اقلیمی، برای بررسی گزینه‌های مختلف سیاست‌گذاری و اثرهای آن، اجرا شد. نتایج نشان داد که روند توسعه باعث افت سطح آبخوان‌های حوضه در طول دوره شبیه‌سازی و قرارگیری دشت‌ها در وضعیت بحرانی شد که این امر، در شرایط تغییرات اقلیمی با سرعت و شتاب بیشتری رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پویایی سیستم، حوضه بهشت‌آباد، رویکرد دلفی، سناریو، منابع آب، مدیریت منابع آب، مصارف آب.

ارجاع: مهرشاد ف. اسماعیلیان م. و رحیمی د. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرهای سناریوهای توسعه‌ای و اقلیمی بر آیندهٔ منابع و مصارف آبی حوضه بهشت‌آباد با استفاده از رویکرد پویایی سیستم. مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۱۱-۲۴.

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی راهبرد دانش و فناوری، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان.
۲- استادیار گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان.
۳- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.
* **نویسنده مسئول**: M.Esmaelian@ase.ui.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

پیچیدگی مسائل مدیریت منابع آب از یک‌سو و ارتباط مستقیم آن با سایر علوم از طرف دیگر باعث شده است، یک تصمیم‌گیر به‌تنهایی نتواند تمام جوانب لازم را برای مدیریت و برنامه‌ریزی جامع منابع آب در نظر بگیرد (روفی و همکاران، ۱۳۹۲). مدیریت مؤثر منابع آبی نیازمند درک بَرهم‌کُنش‌های موجود بین فرایندهای پیچیدهٔ اجتماعی، اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اهداف مرتبط با آن است و لازم است، نتایجِ پیش‌بینی‌شده با توجه به بازخوردها، اثرهای جانبی و در صورت امکان، مبادلات میان اهداف مختلف و مغایر، ارزیابی شود (کلی و همکاران، ۲۰۱۳). رویکرد سنتی با نگاه بخشی به مدیریت منابع آبی، این ویژگی‌های پایه‌ای آب را در نظر نمی‌گیرد (جونچ و فوگل، ۲۰۰۱). با توجه به اینکه بحران آب، یک بحران مدیریتی است، لازم است راه‌های مناسبی برای هماهنگ‌کردن سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و اجرا به‌صورت یکپارچه، تلفیقی، میان‌بخشی، میان‌سازمانی، میان‌تخصصی و میان‌مرزی در حوضه‌ها مدّنظر قرار گیرد (جونچ و فوگل، ۲۰۰۱). در حوضه‌های رودخانه، زیرسیستم‌های اجتماعی، اقتصادی و طبیعی گوناگونی با هم در ارتباط هستند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. برای تعیینِ مناسب‌بودن یک تصمیم مدیریتی خاص، مطالعه‌ای منسجم دربارهٔ سیستمِ پیچیدهٔ مدیریت منابع آبی در آن حوضه نیاز است. این مطالعات باید جنبه‌های مهم طبیعی، اجتماعی و اقتصادی را در نظر بگیرند (مدنی و مارینو، ۲۰۰۹)؛ همچنین، لازم است با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای وضعیت‌های گوناگون و لحاظ‌کردن پویایی‌های مکانی و زمانی آنها شرایط احتمالی آیندهٔ منابع آبی در حوضه، تحلیل شود. در مدیریت آب، سناریوها برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به شرایط اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی و شرایط مدیریتی مؤثر بر عملکرد سیستم‌های منابع آبی، استفاده می‌شوند؛ این عدم قطعیت‌ها بر آیندهٔ تأمین آب، تقاضای آب و استراتژی مدیریت تأثیرگذار هستند (دونگ و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط توسعه، نیازهای آیندهٔ حوضه بهشت‌آباد و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مانند بارش، چشم‌انداز آیندهٔ منابع و مصارف آب این حوضه، تخمین زده می‌شود. با توجه به اینکه طیف وسیعی از اطلاعات گوناگون در زمینه‌های تخصصی مرتبط با منابع آبی برای طراحی یک مدل جامع نیاز است، ابتدا از طریق مصاحبه با متخصصان و کارشناسان، اطلاعات جمع‌آوری می‌شود. سپس، این اطلاعات به روش دلفی تلفیق و با بهره‌گیری از تکنیک پویایی سیستم، مدل جامعی از منابع آبی آن حوضه طراحی می‌شود. در ادامه، شبیه‌سازی‌های مدل برای سناریوهای مختلفِ توسعه‌ای و اقلیمی، به منظور بررسی گزینه‌های مختلفِ سیاست‌گذاری و آثار آن اجرا می‌شوند.

رویکرد مدل‌سازی پویایی سیستم

پویایی سیستم، یک روش دقیق برای توصیف سیستم است. این روش معمولاً تحلیل بازخوردی را از طریق یک مدل شبیه‌سازی از اثرهای ساختارهای جایگزین سیستم و سیاست‌های کنترلی رفتار سیستم تسهیل می‌کند. پویایی سیستم بر درک روابط پیچیدهٔ درونی بین مؤلفه‌های مختلف یک سیستم تأکید دارد (سیمونوویچ و راجاسکارام، ۲۰۰۴؛ استرمن، ۲۰۰۰). مراحل مدل‌سازی در این روش، شامل فعالیت‌هایی است؛ از جمله: چارچوب‌بندی مسئله، فرموله‌کردن یک فرضیهٔ پویا یا تئوری دربارهٔ علت‌های مسئله، فرموله‌کردن یک مدل شبیه‌سازی برای آزمایش فرضیه پویا، آزمودن مدل تا وقتی که از مناسب‌بودن آن برای هدف خود اطمینان حاصل کنید، و طراحی و ارزیابی سیاست‌هایی برای بهبود است (استرمن، ۲۰۰۰).

در ادبیات تحلیل پویایی سیستم‌ها در حوضه مدیریت منابع آبی، مدل‌هایی وجود دارند؛ از جمله، گوهری و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ای میزان اعتبار طرح‌های انتقال آب به حوضهٔ زاینده‌رود را ارزیابی کرده‌اند. این پژوهش برای برآورد نیاز روزافزون حوضه رودخانه زاینده‌رود انجام گرفته است. با توجه به اینکه آب اساساً موتور توسعه یک سیستم محسوب می‌شود، نتایج این پژوهش نشان داد، تأمین آب بیشتر برای یک حوضه، بدون در نظر داشتن پویایی‌های مسائل مرتبط با هم، باعث افزایش تقاضاها در حوضه می‌شود. سیمونوویچ و راجاسکارام (۲۰۰۴)، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم، یک مدل منسجم برای مدیریت منابع آبی در کانادا ایجاد کرده‌اند. این مدل، بَرهم‌کُنش‌های پویا بین ویژگی‌های کمّی منابع آب موجود و میزان مصرف آب را در نظر می‌گیرد. آنها معتقدند، میزان آب مصرفی، با توجه به میزان رشد اقتصادی- اجتماعی جمعیت و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه کانادا مشخص می‌شود. در این پژوهش،

www.SID.ir

Archive of SID

شبیه‌سازی‌های مدل برای ۱۲ سناریو با هدف بررسی گزینه‌های مختلف سیاست‌گذاری اجرا شده است. نتایج حاکی از وابستگی شدید بین توسعه کانادا در آینده و میزان حفظ کیفیت مطلوبِ منابع آبی و کنترل میزان مصرف آب در حوضه‌های مختلف است. مدنی و مارینو (۲۰۰۹)، در پژوهشی، با اشاره به زیر سیستم‌های گوناگون اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و طبیعی تأثیرگذار بر حوضه‌ها، آگاهی سیاست‌گذاران را از این برهم‌کنش‌ها در هنگام تصمیم‌گیری لازم می‌دانند. میرچی و همکاران (۲۰۱۲)، نقش ابزارهای پویایی‌شناسی سیستم را در ایجاد فهم جامع و همه‌جانبه از مسائل مدیریت منابع آب بررسی کرده‌اند. در این مقاله، یک مدل شبیه‌سازی بر اساس دیاگرام‌های حلقه علّی مسئله ایجاد شد. این مدل نشان داد، انتقال آب از دیگر حوضه‌ها تنها راه و بهترین راه‌حلِ مشکل کمبود آب در حوضهٔ زاینده‌رود نیست. کوتیر و همکاران (۲۰۱۷) بیان می‌کنند، اگرچه در سال‌های اخیر درک ما از مشکلات منابع آب افزایش یافته است، توانایی ما برای بهبود تصمیم‌گیری هنوز محدود است. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های پویا و نمودارهای حلقه‌های علی، فرایندهای مشارکتی در ایجاد یک مدل مفهومی برای مدیریت یکپارچه منابع آب و توسعه پایدار کشاورزی در حوزهٔ رودخانه ولتا، بررسی شده‌اند. در پژوهش دیگری کوتیر و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌های پویا را برای مدیریت پایدار منابع آب و توسعهٔ کشاورزی در حوضه روخانه ولتا در کشور غنا ارائه کرده‌اند. در تمامی این مطالعات، بر اهمیت پویایی‌ها و برهم‌کنش‌های زیرسیستم‌های گوناگون بر آیندهٔ منابع آبی حوضه تأکید شد. در پژوهش حاضر، تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی و توسعه‌ای بر آیندهٔ منابع آبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه حوضه بهشت‌آباد در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است، این حوضه به عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شده و با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم به مدل‌سازی منابع آبی آن پراخته شده است. به منظور پیش‌بینی پارامترهای مؤثر بر مدل در سال‌های آتی، از سیستم استنتاج فازی سوجینو[1] و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی[2] (ANFIS) استفاده شده است.

1- Sugeno-Type Fuzzy Inference System
2- Adaptive Network Fuzzy Inference System

سیمای عمومی منطقهٔ مطالعه شده

زیرحوضهٔ مطالعه‌شده در این پژوهش، زیرحوضه بهشت‌آباد، از جمله سرشاخه‌های حوضه کارون است. حوضه آبریز بهشت‌آباد با مساحتی حدود ۳۹۶۰ کیلومتر مربع، یکی از منابع مهم تأمین آب رودخانه‌های کیار و جونقان است. رودخانه‌های کیار و جونقان در محلی به‌نام بهشت‌آباد به یکدیگر می‌پیوندند و رودخانه بهشت‌آباد را تشکیل می‌دهند. رودخانه بهشت‌آباد، شاخه‌هایی دیگر را دریافت می‌کند و در نهایت، کارون را تشکیل می‌دهد (رئیسی و همکاران، ۱۳۸۸). این زیرحوضه در شمال شرقی حوضه آبریز کارون شمالی قرار دارد و وسیع‌ترین زیرحوضه در حوضه آبریز کارون شمالی محسوب می‌شود. این حوضه بین عرض شمالی ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه قرار دارد (استانداری چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۴) و از شمال به شهر بن، از شمال غرب به شهر سامان، از شرق و جنوب شرق به استان اصفهان، از شمال غرب به حوضه کوهرنگ، از غرب به حوضه کوهرنگ و حوضه کارون میانی و از جنوب غرب به حوضه ونک محدود می‌شود (جزایری رستمی، ۱۳۹۳). حداکثر ارتفاع آن در ارتفاعات سالداران برابر با ۳۶۵۰ متر و حداقل آن در محل روستای بهشت‌آباد برابر با ۱۶۵۰ متر است. میانگین دمای سالانه حوضه بین ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه بهشت‌آباد تا ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد در بخش‌های شمالی حوضه ایستگاه‌های شهرکرد و بروجن در نوسان است. همچنین، میزان بارندگی سالانهٔ حوضه، از ۸۲۰ میلی‌متر در ایستگاه امیدآبادِ بابا حیدر تا ۲۵۰ میلی‌متر در ایستگاه بروجن در نوسان است. میزان آب‌دهی سالانهٔ رودخانه بهشت‌آباد برابر با ۱۲/۵ مترمکعب است؛ این میزان از ۳۴/۵ مترمکعب در فروردین تا ۲/۵ مترمکعب در شهریورماه نوسان دارد. بیشتر شهرهای استان چهارمحال و بختیاری در این حوضه قرار دارند و بیشترین جمعیت استان نیز در این حوضه ساکن است (دانشگاه شهرکرد، ۱۳۸۶).

توسعه مدل

این پژوهش در محدودهٔ زمانی گذشته به مدت ۹ سال (از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳) و افق زمانی آینده برابر ۲۲ سال (از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۱۵) در نظر گرفته شده است. مرزهای

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم از طریق مصاحبه با خبرگان حوزه‌های مرتبط و به‌کارگیری روش دلفی برای تلفیق نظرهای منابع و مصارف آب حوضه بهشت‌آباد و عوامل مؤثر بر آن‌ها تعیین شده‌اند. منابع آبی حوضه، شامل منابع آبی سطحی و زیرزمینی است و مصارف آبی حوضه، دربردارندهٔ مصارف آب شهری (آب شرب و بهداشتی، کشاورزی و صنعتی) است. همچنین، مرزهای مکانی سیستم، شامل منابع و مصارف حوضه بهشت‌آباد است. مدل منابع و مصارف آبی حوضه متشکل از زیرسیستم‌های بارش، منابع آب سطحی، منابع آب زیرزمینی، نیازهای آبی، مصارف آب، آب برگشتی و سد بهشت‌آباد بوده و در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. اطلاعات مربوط به هریک از زیرسیستم‌ها و متغیرهای مربوطه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. جزئیات مدل پژوهش و پارامترهای استفاده‌شده در پژوهش مهرشاد (۱۳۹۴)، وجود دارد.

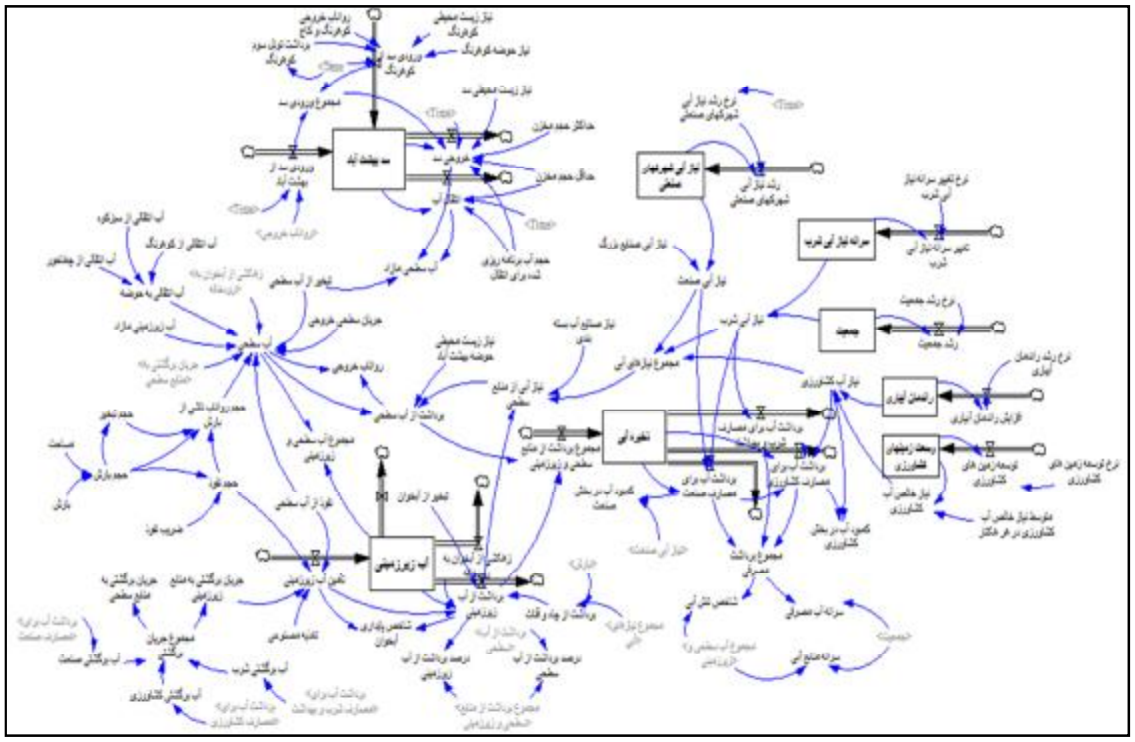
جدول ۱- معرفی زیر سیستم‌ها و متغیرهای مرتبط با هریک از آنها

زیرسیستم	متغیرهای هر زیرسیستم
متغیرهای بارش	بارش، حجم بارش، حجم تبخیر، حجم رَواناب ناشی از بارش، مساحت، ضریب نفوذ
متغیرهای آب زیرزمینی	حجم نفوذ، نفوذ از منابع سطحی، آب برگشتی به منابع زیرزمینی، آب برگشتی به منابع زیرزمینی، آب برگشتی به منابع زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، تأمین آب زیرزمینی، آب زیرزمینی، برداشت از آب زیرزمینی، درصد برداشت از آب زیرزمینی، تخلیه چاه و قنات، زهکشی از آبخوان به رودخانه، تبخیر از آبخوان، شاخص پایداری آبخوان
متغیرهای آب سطحی	آب سطحی، رَواناب ناشی از بارش، آب انتقالی به حوضه، آب برگشتی به منابع سطحی، زهکشی از آبخوان به رودخانه، آب زیرزمینی اضافی، برداشت از آب سطحی، نفوذ به آب زیرزمینی، تبخیر از دریاچه‌ها و کفه‌ها و تلفات، نیاز زیست‌محیطی حوضه بهشت‌آباد، جریان سطحی خروجی، رَواناب خروجی حوضه بهشت‌آباد، آب سطحی اضافی، نیاز صنعت بسته‌بندی آب، آب سطحی مورد نیاز برای مصارف، مجموع آب سطحی و زیرزمینی
متغیرهای آب انتقالی	انتقال آب از کوهرنگ، انتقال آب از چغاخور، انتقال آب از سبزکوه
متغیرهای ذخیره آب	ذخیره آب، آب برداشتی صنعت، آب برداشتی کشاورزی، آب برداشتی شرب و بهداشت، مجموع آب برداشتی سطحی و زیرزمینی، مجموع آب برداشت‌شده برای مصرف، سرانه منابع آبی، سرانه آب مصرفی، مجموع نیاز آبی، شاخص تنش آبی، کمبود آب کشاورزی، کمبود آب صنعت
متغیرهای نیاز آبی بخش صنعت	نیاز آبی صنعت، نیاز آبی صنایع بزرگ، نرخ تغییر نیاز آبی شهرک‌های صنعتی، تغییرات نیاز آبی شهرک‌های صنعتی، نیاز آبی شهرک‌های صنعتی
متغیرهای نیاز آبی بخش کشاورزی	نیاز آبی کشاورزی، وسعت زمین‌های کشاورزی، توسعه یا فرسایش زمین‌های کشاورزی، نرخ توسعه یا فرسایش زمین‌های کشاورزی، نیاز آبی خالص متوسط در هر هکتار زمین‌های کشاورزی، نیاز آبی خالص کل زمین‌های کشاورزی، راندمان آبیاری، افزایش راندمان آبیاری، نرخ افزایش راندمان آبیاری
متغیرهای نیاز آبی بخش شرب و بهداشت	نیاز آبی شرب و بهداشت، جمعیت، تغییرات جمعیت، نرخ تغییر جمعیت، سرانه نیاز آبی، تغییر در سرانه نیاز آبی، نرخ تغییر در سرانه نیاز آبی
متغیرهای آب برگشتی	درصد آب برگشتی صنعت، درصد آب برگشتی کشاورزی، درصد آب برگشتی شرب، صنعت و کشاورزی، کل آب برگشتی شرب و بهداشت، آب برگشتی به منابع سطحی، آب برگشتی به آب زیرزمینی
متغیرهای سد بهشت‌آباد	سد بهشت‌آباد، ورودی حوضه بهشت‌آباد، ورودی حوضه کوهرنگ، برداشتی تونل سوم کوهرنگ، نیاز مصرفی حوضه کوهرنگ، نیاز زیست‌محیطی حوضه کوهرنگ، رَواناب خروجی حوضه کوهرنگ، نیاز زیست‌محیطی سد بهشت‌آباد، خروجی سد، آب انتقالی از تونل بهشت‌آباد، حجم آب برنامه‌ریزی‌شده برای انتقال، حداقل و حداکثر حجم سد

در ضمن، برخی از متغیرها که باعث گسترش بیش از حد و بی‌فایدهٔ مدل می‌شوند، مانند پارامترهای تبخیر از آبخوان، زهکشی از آبخوان به رودخانه، آب زیرزمینی اضافی و متوسط نیاز خالص آب کشاورزی به‌صورت برون‌زا، در نظر گرفته نشده‌اند. منظور از پارامترِ برون‌زا، پارامتری است که متغیرهای مدل روی آن اثرگذار نیست. در ادامه، زیرسیستم‌های مدل تشریح می‌شوند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- مدل حالت و جریان منابع و مصارف حوضه بهشت‌آباد

زیرسیستم بارش: شامل متغیرهای بارش، حجم بارش، تبخیر، نفوذ، رَواناب ناشی از بارش و مساحت حوضه است. متغیر بارش، شامل سری زمانی داده‌های تاریخی بارش و داده‌های پیش‌بینی شده است. برای برآورد بارش از تکنیک ANFIS و نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. برای محاسبهٔ میزان نفوذ در سطح حوضه از ضریبی به‌نام ضریب نفوذ استفاده و همچنین، میزان تبخیر در حوضه بهشت‌آباد، بر اساس میانگین درازمدتِ ۴۰ سالهٔ ارائه‌شده در طرح جامع آب، در نظر گرفته شد. همچنین، حجم رَواناب سطحی ناشی از بارش، از کسر میزان حجم تبخیر و حجم نفوذ از حجم بارش به‌دست آمده است.

زیرسیستم منابع آب سطحی: عوامل مؤثر بر منابع آب سطحی حوضه بهشت‌آباد، شامل حجم رَواناب ناشی از بارش؛ آب زیرزمینی اضافی؛ زهکشی از آبخوان به رودخانه؛ آب انتقالی به حوضه و آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت، هستند. تبخیر از آب سطحی، نفوذ به منابع زیرزمینی و جریان خروجی از آب سطحی نیز از عوامل تخلیه آب سطحی محسوب می‌شوند (شکل ۲).

زیرسیستم منابع آب زیرزمینی: سطح منابع زیرزمینی با نفوذ آبِ بارش، نفوذ از منابع سطحی، تغذیه مصنوعی و آب برگشتی افزایش می‌یابد. تخلیهٔ آب زیرزمینی از طریق چاه و قنات و بر اساس نیازهای آبی بخش‌های گوناگون، با در نظر گرفتن حداکثر ظرفیت برداشت از آب زیرزمینی انجام می‌شود. این کار برای جلوگیری از برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و قرارگرفتن دشت‌های حوضه در حالت بحرانی است. به‌علاوه، در این مدل مقدار زهکشی از آبخوان به رودخانه و تبخیر از آب زیرزمینی در نظر گرفته شد (شکل ۳).

در این مدل، شاخص پایداری آبخوان برای بررسی وضعیت آب زیرزمینی حوضه در نظر گرفته شده است. مقدار این شاخص از تقسیم حجم کل تخلیه آبخوان بر کل حجم تغذیه آبخوان به‌دست آمد و نشان می‌دهد، با توجه به شرایط هیدرولیکی و ساختاری سفرهٔ آب زیرزمینی، آبخوان دشت بررسی‌شده در چه وضعیتی از نظر پایداری است. مقدار کمتر از ۰/۴ برای این شاخص، نشان‌دهندهٔ وضعیت پایدار آبخوان و مقدار بیشتر از ۱ نشان‌دهندهٔ وضعیت بحرانی دشت‌های حوضه است (وزارت نیرو، ۱۳۹۲). برای پیش‌بینی میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌ها و قنات‌ها، معادله (۱) با استفاده از تحلیل رگرسیونی با $R^2=0.57$، به‌دست آمد. میزان برداشت از چاه و قنات، بر اساس دو پارمترِ مقدار بارش و

www.SID.ir

Archive of SID

مجموع نیازهای آبی برآورده می‌شود. در این معادله، P، نشان‌دهندهٔ بارش بر حسب میلی‌متر و R، نشان‌دهندهٔ مجموع نیاز آبی بر حسب MCM است.

تخلیه چاه و قنات =

$$257.4 - 2P + 0.5R + 0.002P^2 + 0.0007PR \quad (۱)$$

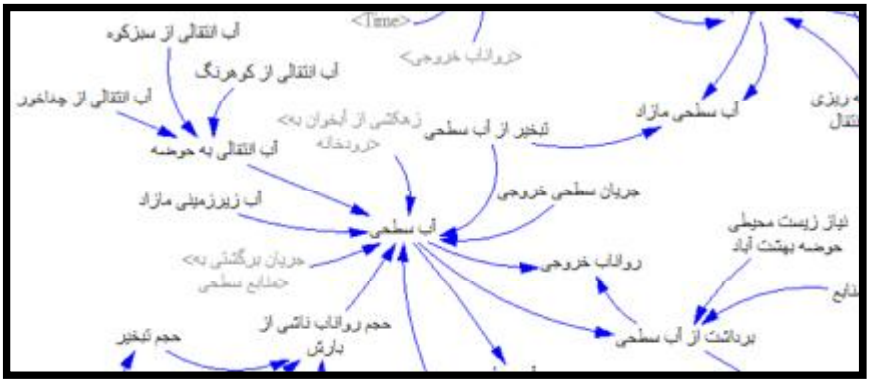
زیرسیستم نیازهای آبی: نیازهای آبی، شامل بخش‌های کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت هستند. نیاز آبی بخش کشاورزی با توجه به وسعت زمین‌های کشاورزی و میانگین مصرف آب در هر هکتار محاسبه می‌شود. مصرف آب کشاورزی با توجه به نوع الگوی کشت، میزان نیاز به آب خالص و راندمان آبیاری حوضه تعیین می‌شود. همچنین، نیاز آبی بخش صنعت در دو بخشِ نیاز آبی شهرک‌های صنعتی و نیاز آبی صنایع بزرگ حوضه مطرح است. نیاز آبی بخش شرب و بهداشت براساس جمعیتِ حوضه و سرانه مصرف آب محاسبه شد.

زیرسیستم مصارف آبی: برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی بر مبنای نیاز آبی و توجه به وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه، انجام می‌شود. در این بخش، شاخص تنش آبی نسبی در مدل لحاظ شده است؛ این شاخص نشان‌دهندهٔ میزان برداشت آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی نسبت به ذخایر آبی موجود است. مقادیر ۰/۲ تا ۰/۴ برای این شاخص نشان‌دهندهٔ مناطقی است که در معرض تنش و کمبود آب قرار می‌گیرند و بیشتر از ۰/۴ نشان‌دهندهٔ شرایط تنش شدید آبی در منطقه است (وزارت نیرو، ۱۳۹۲).

زیرسیستم آب برگشتی: به بخشی از آبِ اختصاص داده‌شده به یک نیاز که بعد از مصرف، به جریان سطحی و یا زیرزمینی باز می‌گردد، جریان برگشتی می‌گویند. مقدار این جریان را معمولاً به‌صورت ضریبی از جریانِ اختصاص داده‌شده بیان می‌کنند و به آن ضریب جریان برگشتی می‌گویند (سبززاده و همکاران، ۱۳۹۳).

زیرسیستم سد بهشت‌آباد

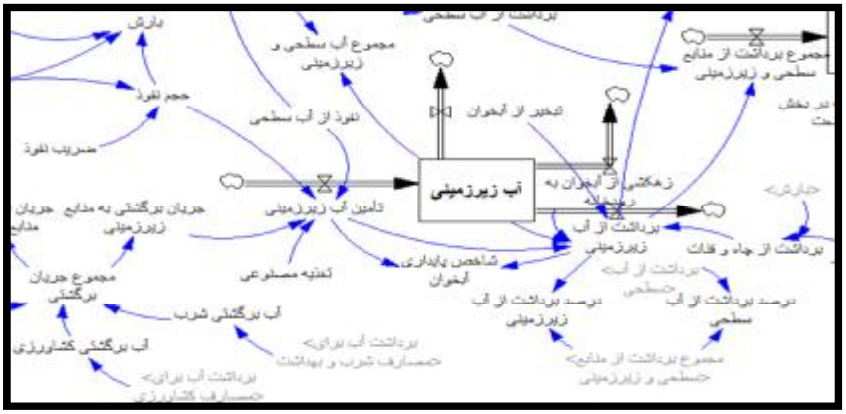
پس از برداشت‌های لازم از آب سطحی، آب باقی‌مانده به‌صورت رَواناب خروجی از حوضه خارج می‌شود. با اجرای پروژه‌های سد و نیروگاه جریانی بهشت‌آباد و احداث آنها در خروجی حوضه، این میزان رَواناب خروجی وارد مخازن سد بهشت‌آباد می‌شود و از آن برای تولید نیروی برق و نیز انتقال آب به حوضه‌های مجاور استفاده می‌کنند. علاوه بر رَواناب خروجی حوضه بهشت‌آباد، رَواناب خروجی حوضه کوهرنگ نیز پس از کسر برداشت‌های مربوط به نیاز زیست‌محیطی حوضه کوهرنگ، نیاز آبی تونل سوم و نیاز زیست‌محیطی حوضه، وارد مخزن سد بهشت‌آباد می‌شود. برای برآورد رَواناب خروجی حوضه کوهرنگ، از داده‌های تاریخی رَواناب خروجی حوضه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۰ استفاده شده است. برای این منظور، از سیستم ANFIS و نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. شکل ۴، نمودار حالت و جریان زیرسیستم سد بهشت‌آباد را نشان می‌دهد.



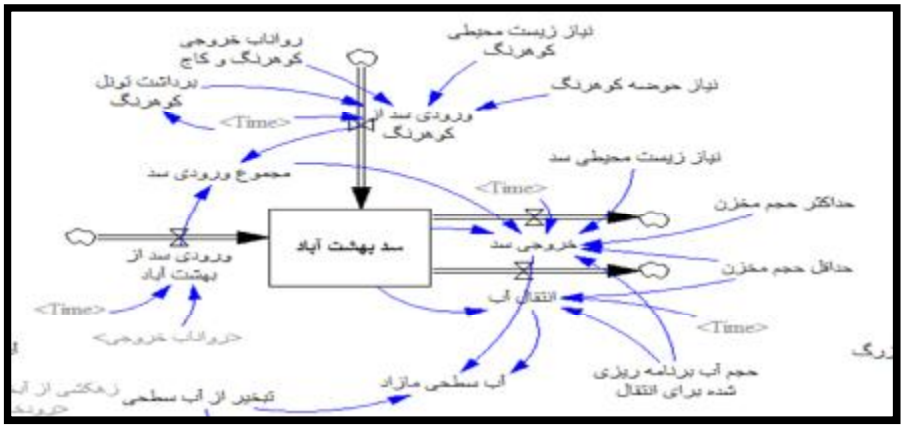
شکل ۲- نمودار حالت و جریان زیرسیستم منابع آب سطحی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- نمودار حالت و جریان زیرسیستم منابع آب زیرزمینی



شکل ۴- نمودار حالت و جریان زیرسیستم سد بهشت‌آباد

واسنجی و تصدیق مدل

اعتبار مدل، بخش مهمی از تمام رویکردهای مبتنی بر مدل‌سازی است. همچنین، اعتبار نتایجِ هر مطالعه، وابسته به اعتبار مدل آن است. اعتباربخشی مدل، به‌معنای ایجاد اطمینان در سودمندی مدل با توجه به هدف آن است (بارلاس، ۱۹۹۴). زمانی از تکنیک پویایی سیستم به‌طور مؤثر استفاده می‌شود که با این تکنیک فرایندهای مختلف بررسی و به کمک آن سناریوهای مختلف با دیدگاه سیستمی ارزیابی شوند (وندنبرگ و نیجکامپ، ۱۹۹۴). برای ارزیابی اعتبار مدل از آزمون‌های زیر استفاده شده است:

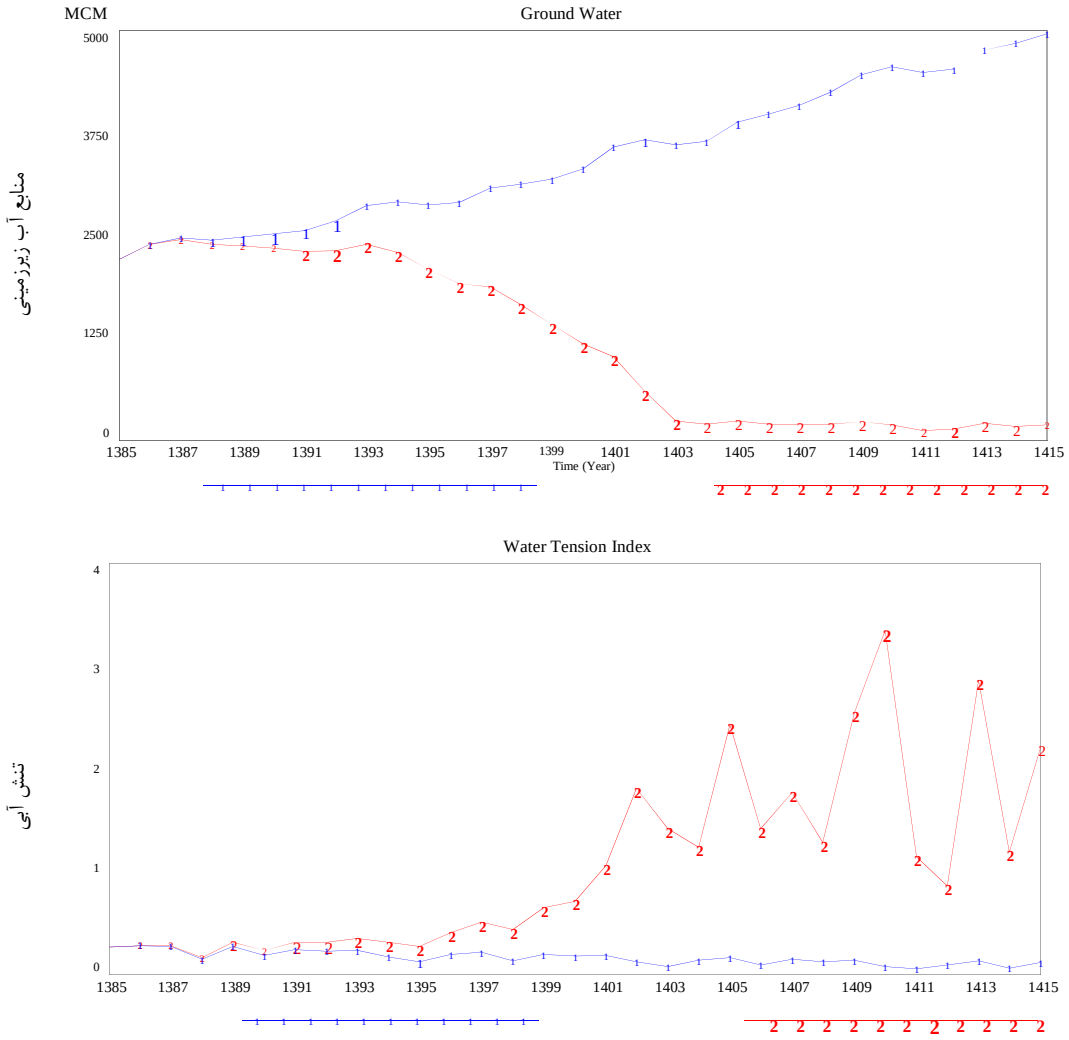
آزمون کفایت مرزها و سازگاری ابعاد مدل: از طریق مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان مرزهای مدل تعیین و بررسی شد. با توجه به هدف مدل، این بررسی‌ها تعیین می‌کنند، بازخوردهایی که در مدل لحاظ نشده‌اند اهمیت دارند یا خیر. همچنین، ساختارهای جدید به‌دست آمده، به مدل اضافه و آثار آن بررسی شده‌اند. طی فرایند مدل‌سازی، واحدهای اندازه‌گیری متغیرها مشخص و تبدیل واحدها به‌موقع انجام می‌شود. طبق خروجی ونسیم واحد متغیرها با واقعیت تطابق دارد.

آزمون حالت حدی: برای انجام آزمون حدی، شرایط حدی (یعنی مقادیر حداقلی و حداکثری پارامترها) به‌عنوان سیاست‌ها در شبیه‌سازی‌های مدل وارد می‌شوند. این آزمون به‌ازای تمام پارامترهای مدل انجام می‌شود. برای مثال، رفتار پارامترهای منابع آب زیرزمینی و تنش آبی در حالت افزایش یا کاهشِ نیاز آبی در بخش‌های گوناگون، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان‌دهندهٔ رفتار منطقی مدل و تأیید اعتبار آن است.

آزمون بازتولید رفتار مدل: در این آزمون، رفتار شبیه‌سازی‌شدهٔ پارامتر رَواناب خروجی حوضه با داده‌های واقعی مقایسه و تطابق روند داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های واقعی بررسی و تصدیق شده است. این مقایسه با استفاده از آزمون‌های آماری، مانند ضریب همبستگی و آزمون همگونی انجام شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- رفتار پارامترهای منابع آب زیرزمینی و تنش آبی در حالت‌های حدی حداقل (منحنی ۱) و حداکثر (منحنی ۲) نیاز آبی

نتایج شبیه‌سازی مدل برای سناریوهای گوناگون

شبیه‌سازی مدل برای بررسی نتایج در سه حالت انجام گرفته است: ۱. سناریوی ادامهٔ روند توسعه‌ای و اقلیمی؛ ۲. تعدیل در روند توسعه صنعتی فعلی و ۳. تغییرات اقلیمی در شرایط ادامهٔ روند توسعه.

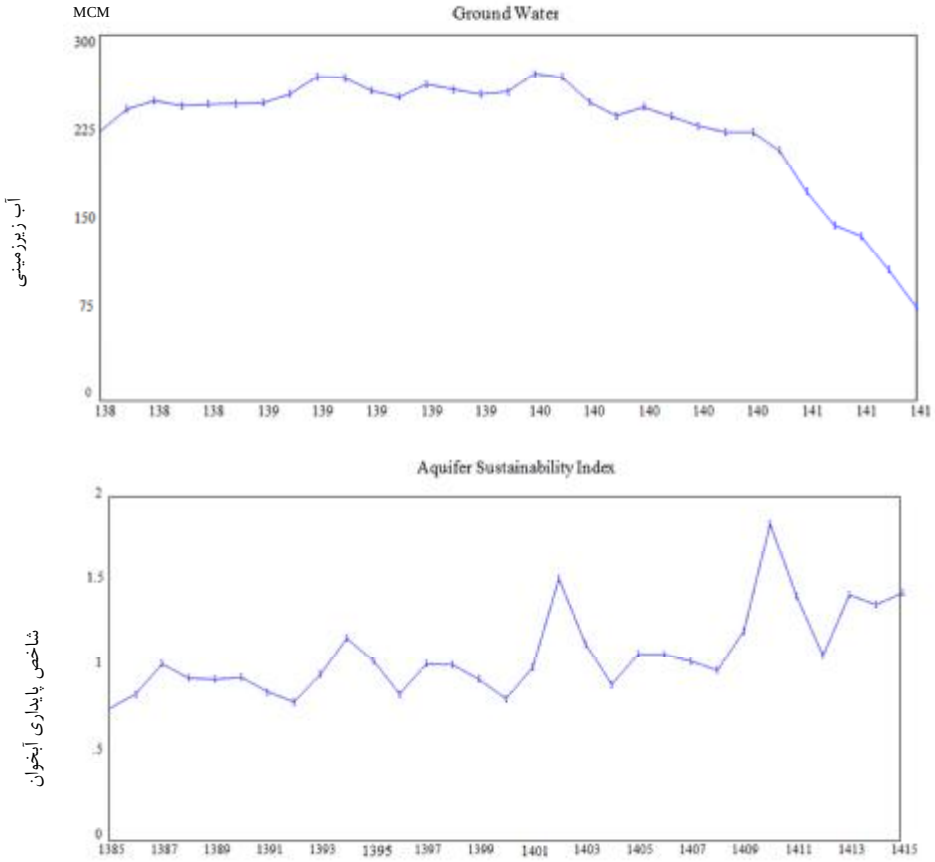
سناریوی ۱. ادامهٔ روند توسعه‌ای و اقلیمی: پارامترهای مدل، اعم از پارامترهای اقلیمی و توسعه‌ای، روند فعلی خود را حفظ می‌کنند. جدول ۲، مقادیر برخی پارامترهای مهم مدل در این سناریو را نشان می‌دهد. در شکل ۶، وضعیت منابع آب زیرزمینی و شاخص پایداری آبخوان در سناریوی ادامهٔ روند توسعه‌ای و اقلیمی، نشان داده شده‌اند. مقادیر آب زیرزمینی، شاخص‌های پایداری آبخوان و تنش آبی در ابتدا و انتهای دوره شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- مقادیر متغیرهای نرخ و مصرف سرانه در حالت ادامه روند توسعه

نرخ رشد جمعیت	سرانه مصرف آب شرب (لیتر در روز)	نرخ رشد نیاز آبی شهرک‌های صنعتی	نرخ توسعه اراضی کشاورزی	نرخ رشد راندمان آبیاری
۰/۰۰۸۶	۲۵۰	۰/۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶- وضعیت پارامترهای منابع آب زیرزمینی، شاخص پایداری آبخوان و شاخص تنش آبی در سناریوی ادامه روند توسعه‌ای و اقلیمی

جدول ۳- مقادیر آب زیرزمینی و شاخص پایداری آبخوان در ابتدا و انتهای دوره شبیه‌سازی

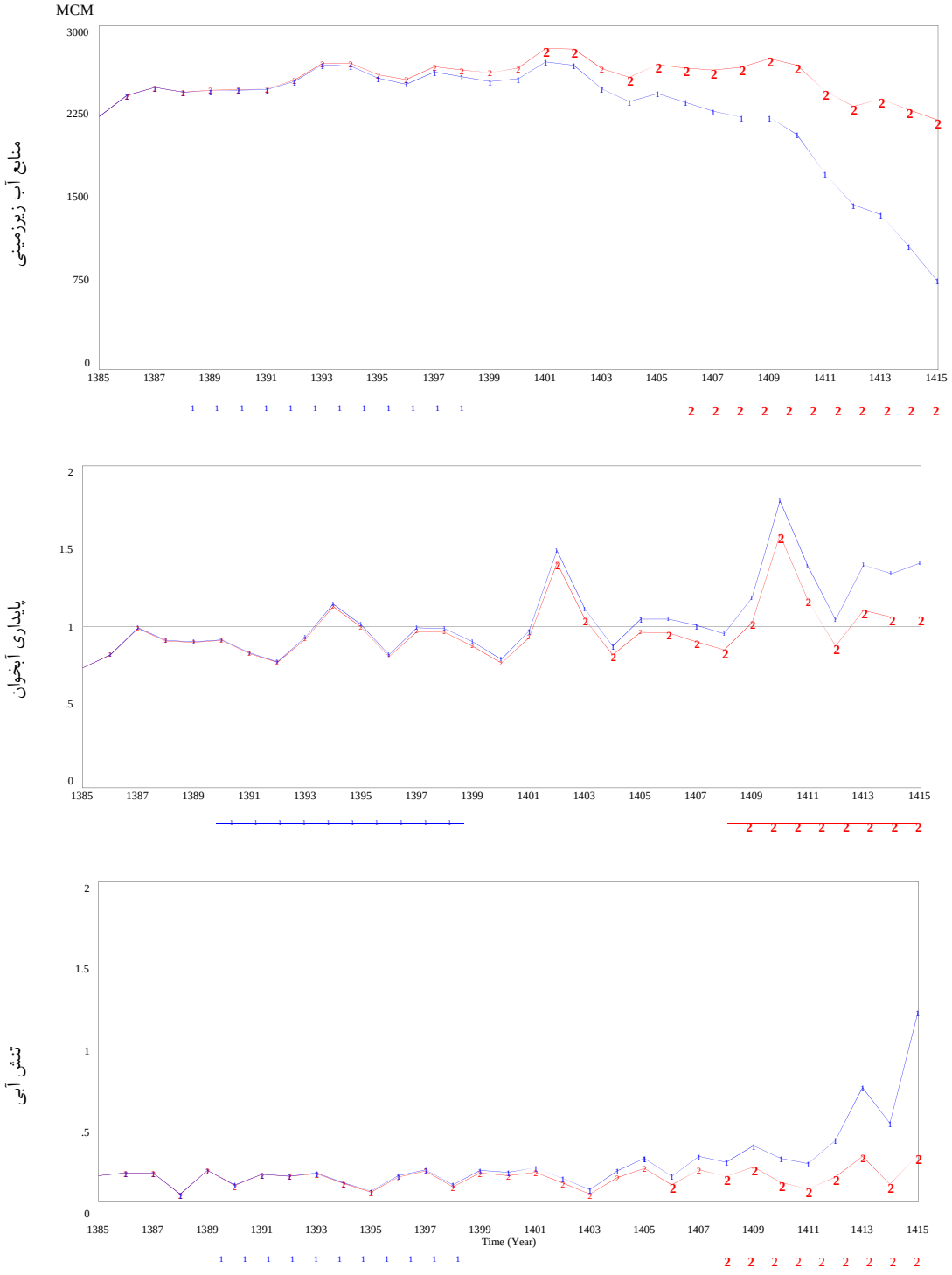
سال	حجم آب زیرزمینی موجود (MCM)	شاخص تنش آبی	شاخص پایداری آبخوان
۱۳۸۵	۲۲۰۰	۰/۲۶	۰/۷۰
۱۴۱۵	۷۶۸	۱/۲۲	۱/۴

سناریوی ۲. تعدیل در روند توسعه صنعتی فعلی: در این سناریو، نیاز آبی شهرک‌های صنعتی و بررسی آثار آن بر پارامترهای مهم مدل بررسی شده است. این بررسی‌ها، با توجه به افزایش بهره‌وری در مصرف آب در بخش صنعت، استفاده از صنایع با آب‌بری کم، استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده در بخش‌های کشاورزی و شرب و تعدیل در روند توسعهٔ صنعتی فعلی با کاهش نرخ رشد، انجام شده‌اند. مقایسهٔ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در سناریوهای یک و دو، برای پارامترهای مجموع نیازهای آبی، شاخص پایداری آبخوان و شاخص تنش آبی در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقایسهٔ مقادیر نیاز آبی بخش صنعت در سال ۱۴۱۵، در سناریوهای مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است و حاکی از کاهش نیاز آبی بخش صنعت در سناریوی دوم در سال ۱۴۱۵ است. جدول ۵، نیز مقایسه بین مقادیر حجم آب زیرزمینی، شاخص پایداری آبخوان و شاخص تنش آبی حوضه در سال ۱۴۱۵ را در سناریوهای اول و دوم نشان می‌دهد.

در مدل دینامیکی، مجموع نیاز آبی برابر با جمع کل نیاز آب کشاورزی، شرب و صنعتی در نظر گرفته شده و نیاز آب صنعتی برابر با مجموع نیاز آب شهرک‌های صنعتی و نیاز آب صنایع بزرگ است. کاهش زیاد در میزان نیاز آبی در بخش صنعت در سناریوی دوم به‌دلیل افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش صنعت، استفاده از صنایع با آب‌بری کم و تعدیل در روند توسعه صنعتی فعلی با کاهش نرخ رشد نیاز آبی شهرک‌های صنعتی ایجادشده است. این کاهش، نشان‌دهندهٔ تأثیر زیاد نوع استقرارِ صنایع بر میزان مصارف آب حوضه است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل در سناریوهای ۱ و ۲، برای پارامترهای وضعیت منابع آب زیرزمینی، شاخص پایداری آبخوان و شاخص تنش آبی (منحنی ۱ (سناریو (۱)) و منحنی ۲ (سناریو (۲))

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴- مقایسه نیاز آبی در بخش صنعت در سال ۱۴۱۵ در سناریوهای ۱ و ۲

نیاز آبی بخش صنعت در سال ۱۴۱۵ در سناریوی ۱	نیاز آبی بخش صنعت در سال ۱۴۱۵ در سناریوی ۲
۴۹۱ MCM	۶۴/۳ MCM

جدول ۵- مقایسه بین مقادیر حجم آب زیرزمینی، شاخص پایداری آبخوان و شاخص تنش آبی حوضه در سناریوهای ۱ و ۲

	حجم آب زیرزمینی در سال ۱۴۱۵	شاخص پایداری آبخوان در سال ۱۴۱۵	شاخص تنش آبی در سال ۱۴۱۵
سناریوی ۱	۷۶۸MCM	۱/۴	۱/۲
سناریوی ۲	۲۱۷۵MCM	۱/۰۶	۰/۴

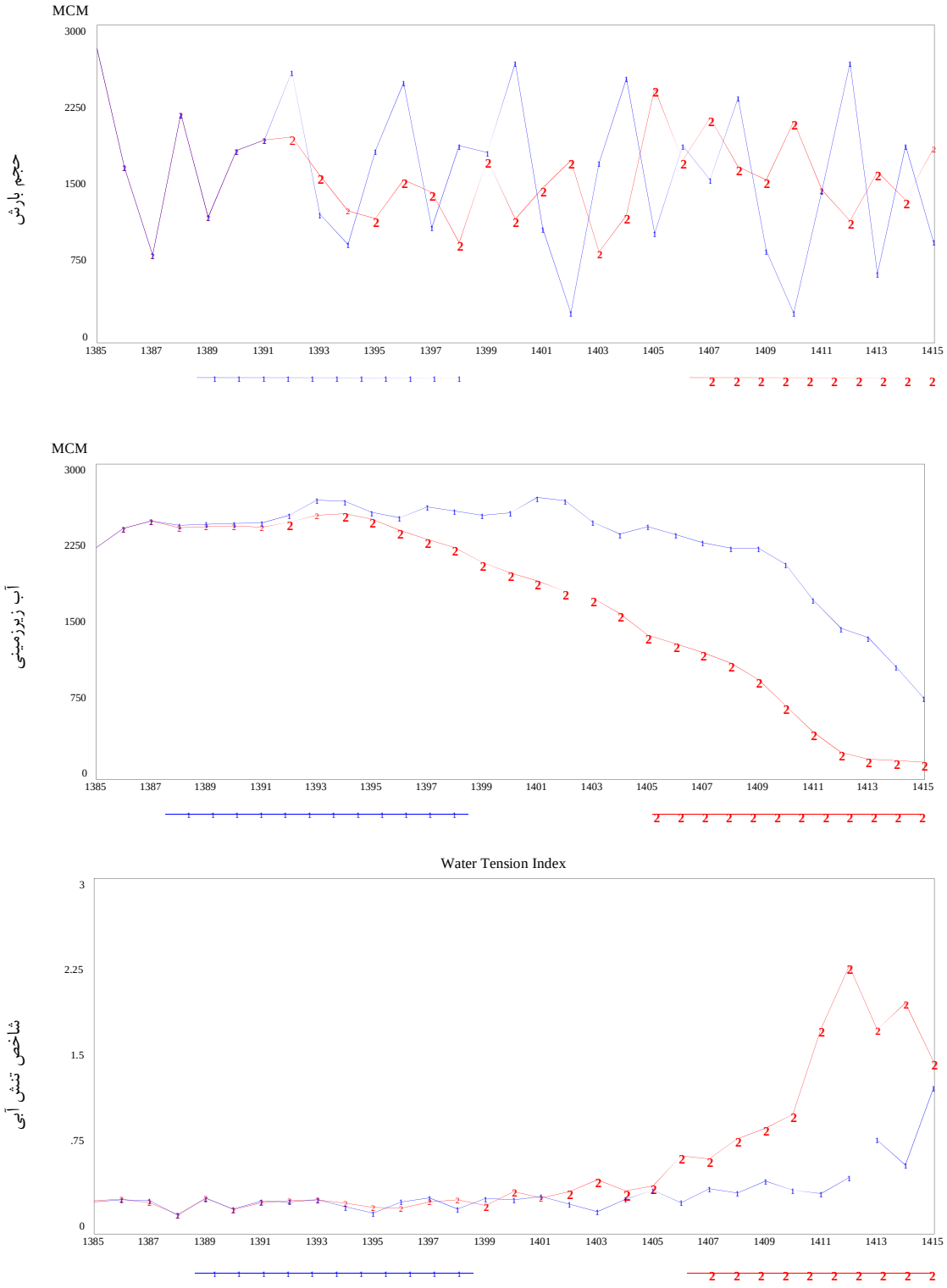
سناریوی ۳. تغییرات اقلیمی در شرایط ادامهٔ روند توسعه: برای تحلیل نتایج مدل تحت شرایط تغییر اقلیم، از داده‌های بارش و تبخیر استفاده شده است. این داده‌ها را جزایری و رستمی (۱۳۹۳)، ارائه داده‌اند و با استفاده از مدل BCM2 تحت سناریوی A1B و نرم‌افزار LARS-WG برآورد شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای حجم بارش (الف)، حجم آب زیرزمینی (ب)، شاخص تنش آبی (ج)، تحت سناریوهای یک و سه در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. گروه سناریوهای A1، جهان را به‌صورت رشد اقتصادی بسیار سریع، حداکثرشدن جمعیت جهانی در نیمه قرن و کاهش مجدد آن و فناوری‌های کارآمدتر و جدیدتر توصیف می‌کند. سناریوی A1، شامل سه گروه است که تغییرات فناورانه را در سیستم انرژی به‌طور جایگزین توصیف می‌کنند. سه گروه A1، شامل تشدید منابع فسیلی (A1F1)؛ منابع انرژی غیرفسیلی (A1T) و تعادل در تمامی منابع (A1B) (خزانه‌داری، ۱۳۹۱) هستند. در این سناریو، پارامترهای توسعه‌ای مطابق با سناریوی ۱ و جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن شرایط توسعه و نیازهای آیندهٔ حوضه بهشت‌آباد، همچنین پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مانند بارش، چشم‌انداز آیندهٔ منابع و مصارف آب این حوضه تخمین زده شد. همچنین، شبیه‌سازی‌های مدل برای سناریوهای مختلف، برای بررسی گزینه‌های مختلف سیاست‌گذاری و اثرهای آن، اجرا شد. نتایج نشان داد، درحالت ادامهٔ روند توسعه کنونی، منابع آب زیرزمینی به‌شدت افت خواهند کرد و دشت‌های حوضه در وضعیت بحرانی بعد از سال ۱۳۹۴ قرار می‌گیرند. شاخص تنش آبی، حاکی از ایجاد تنش شدید آبی در حوضه بعد از سال ۱۴۱۲ است و رَواناب خروجی حوضه بهشت‌آباد، حداقل نیاز رودخانهٔ پایین‌دست را در برخی سال‌ها تأمین نمی‌کند. از طرفی ملاحظه می‌شود، تعدیل نرخ رشدِ نیازهای آبی صرفاً در بخش صنعت اثر چشم‌گیری بر سطح منابع آب زیرزمینی و شاخص پایداری آبخوان داشته است؛ به‌طوری که حجم منابع آب زیرزمینی در سال پایانی شبیه‌سازی در سناریوی دوم حدود سه برابر این مقدار در سناریوی اول است. همچنین، مقایسهٔ مقدار شاخص تنش آبی در سناریوهای اول و دوم نشان می‌دهد، کاهش نرخ رشدِ نیاز آبی در شهرک‌های صنعتی باعث می‌شود، حوضه در سال‌های پایانی شبیه‌سازی، در وضعیت تنش شدید آبی قرار نگیرد. به‌علاوه، با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل برای سناریوی تغییرات اقلیمی، مشاهده می‌شود در این حالت به‌دلیل کاهش زیاد بارش‌های جوی و افزایش ضریب تبخیر در حوضه، حجم منابع آبی در حوضه افت خواهد داشت و مقدار شاخص تنش آبی، به‌خصوص در سال‌های انتهایی دورهٔ شبیه‌سازی، حاکی از تنش آبی شدیدتری نسبت به سناریوی ادامهٔ روند است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود سیاست‌های توسعه‌ای در بخش‌های صنعت و کشاورزی در حوضه با بررسی همهٔ جنبه‌ها و در نظر داشتن عواقبِ مطرح‌شده در این پژوهش برای منابع آبی حوضه و نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست انجام شود. در واقع، با به‌کارگیری روش‌های تعادل‌بخشی و استفاده از ظرفیت‌های قانونی، به بهبود وضعیت پایداری آبخوان‌ها در این حوضه کمک خواهد شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای حجم بارش، آب زیرزمینی و شاخص تنش آبی تحت سناریوهای ۱ و ۳ (منحنی ۱ (سناریو ۱) و منحنی ۲ (سناریو (۳))

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

۱. استانداری استان چهارمحال و بختیاری. ۱۳۸۴. برنامه‌ریزی ارزش توسعه استان چهارمحال و بختیاری با محوریت نقش آبی (تیر ماه). ۱۲۳ ص.

۲. جزایری رستمی ن. ۱۳۹۳. ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر منابع آب‌های سطحی حوضه آبخیز بهشت‌آباد (با استفاده از مدل LARS WG). پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته جغرافیا گرایش سینوپتیک. دانشگاه اصفهان. ۸۴ ص.

۳. مهرشاد ف. ۱۳۹۴. ارزیابی اثرات طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای بر آینده منابع آب حوضه‌های مبدا (مطالعه موردی: حوضه بهشت‌آباد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آینده پژوهی. دانشگاه اصفهان. ۱۳۷ ص.

۴. دانشگاه شهرکرد، مرکز تحقیقات منابع آب. ۱۳۸۶. طرح انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد. ۸۷ ص.

۵. روفی ی. عطاری ج. و شوریان م. ۱۳۹۲. ارزیابی اثرهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب بر وضعیت منابع آب در حوضه‌های آبریز مبدأ و مقصد، مطالعه موردی طرح انتقال آب بهشت‌آباد. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی. ۱۱ ص.

۶. رئیسی م. انصاری م. و جلالی ب. ۱۳۸۸. شناسایی انگل‌های سه گونه ماهی در رودخانه‌های کیار و بهشت‌آباد استان چهارمحال و بختیاری و اولین گزارش Lamproglenachinensis Yu، ۱۹۳۷ در ایران. پاتو بیولوژی دامپزشکی. ۱: ۱۸-۲۲.

۷. سبززاده ا. و محمدیس شوریانم ع. ۱۳۹۳. تخمین ضریب‌های جریان برگشتی از نیازها در سطح حمضه آبریز شیان با واسنجی خودکار مدل MODSIM. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۹-۲۷.

۸. وزارت نیرو، معاونت آب و آبفا، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. اسفندماه ۱۳۹۲. مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب، تلفیق مطالعات و تهیه و تنظیم برنامه‌های حوضه آبریز کارون بزرگ. ۴۵۸ ص.

۹. خزانه‌داری ل. کوهی م. قندهاری ش. و آسیائی م. ۱۳۹۱. تغییر اقلیم. انتشارات پاپلی، مشهد. ۳۶۶ ص.

10. Barlas Y. 1996. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society. 12(3): 183-210.
11. Dong C. Schoups G. and van de Giesen N. 2013. Scenario development for water resource planning and management: a review. Technological forecasting and Social change. 80(4): 749-761.
12. Gohari A. Eslamian S. Mirchi A. Abedi-Koupaei J. MassahBavani A. and Madani K. 2013. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. Journal of Hydrology. 491: 23-39.
13. Jonch-Clausen T. and Fugl J. 2001. Firming up the conceptual basis of integrated water resources management. International Journal of Water Resources Development. 17(4): 501-510.
14. Kelly (Letcher) R. A. Jakeman A. J. Barreteau O. Borsuk M. E. ElSawah S. Hamilton S. H. Henriksen H. J. Kuikka S. Maier H. R. Rizzoli A. E. Delden H. V. and Voinov A. A. 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling & Software. 47: 159-181.
15. Kotir J. H. Brown G. Marshall N. and Johnstone R. 2017. Systemic feedback modelling for sustainable water resources management and agricultural development: An application of participatory modelling approach in the Volta River Basin. Environmental Modelling & Software. 88: 106-118.
16. Kotir J. H. Smith C. Brown G. Marshall N. and Johnstone R. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Science of the Total Environment. 573: 444-457.
17. Madani K. and Mariño M. A. 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. Water Resources Management. 2163-2187.
18. Mirchi A. Madani K. Watkins D. and Ahmad S. 2012. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. Water resources management. 26(9): 2421-2442.
19. Simonovic S. P. and Rajasekaram V. 2004. Integrated analyses of Canada's water

www.SID.ir

Archive of SID

resources. Canadian Water Resources Journal. 223-250.
20. Sterman J. 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin/McGraw-Hill. 982 p.
21. Van den Bergh J. C. and Nijkamp P. 1994. An integrated dynamic model for economic development and natural environment: an application to the Greek Sporades Islands. Annals of Operations Research. 54(1): 143-174.

www.SID.ir