


Modeling of groundwater resources in Sirjan Basin using the dynamics systems method

Mohsen Pourkhosravani^{1*} , Fatemeh Jamshidi Gohari², Nasrin sayari³, Saeedeh.Abedzadeh⁴

1. *Corresponding Author*, Associate Professor Department of Geography Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. MA student of natural hazard, Department of Geography Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Assistant Pprofessor Department of Water engineering. Faculty of Agriculture. Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
4. Master scientist of Water Resources Engineering, graduated from Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>Due to the scarcity of surface water resources, groundwater plays an important role in human life, especially in arid and semi-arid regions. Since more than 60% of Iran is arid and semi-arid regions, the water supply in these areas, and especially the study area, depends on groundwater resources, so over-extraction of these valuable resources causes many crises. Therefore, modeling of these sources was considered by many researchers as well as the present study. This study tries to evaluate the stability of the aquifer in the future. Also, investigate the factors affecting the instability of groundwater resources in the study area. For this purpose, the study area was modeled using the dynamics method of systems, resources, and water consumption. Then, the results of model validation were presented using limit condition tests and sensitivity analysis. After determining the degree of reliability of the model, the scenarios were explained and the model was implemented to predict the groundwater level in the coming years. In the end, the sustainability index was calculated in each scenario, to examine the status of water sustainability in the coming years. The results of limit condition tests and sensitivity analysis showed that the model was in good agreement with reality. Also, after applying the scenarios, the results showed that the aquifer will become more unstable as the current situation continues. Agricultural consumption is one of the variables affecting the resource and consumption model, so by reducing this variable, the amount of sustainability will improve.</p>
Article history:	
Received: 10 April 2022	
Revised: 12 October 2022	
Accepted: 28 October 2022	
Keywords: System Dynamics, Sustainable Development, Modeling, Water Resources Management, Sirjan Basin.	
Cite this article: Pourkhosravani, M., Jamshidi Gohari, F., Sayari, N., & Abedzadeh, S. (2023). Modeling of groundwater resources in Sirjan Basin using the dynamics systems method. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i> , 12(36), 99-114. DOI: 10.22111/jneh.2022.42067.1893	
	© Mohsen Pourkhosravani. Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2022.42067.1893

* Corresponding Author Email: pourkhosravani@uk.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۶، تیر ۱۴۰۲

ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز سیرجان با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها

محسن پورخسروانی^{۱*}، فاطمه جمشیدی گوهری^۲، نسرين سياري^۳، سعیده عابدزاده^۴

۱. دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات طبیعی گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۴. کارشناس ارشد رشته مدیریت منابع آب، دانشکده ابوریحان، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آب‌های زیرزمینی با توجه به کمبود منابع آب سطحی نقش مهمی را در زندگی بشر امروز ایفا می‌نمایند و از آن‌جایی که بیش از ۶۰ درصد ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد، تأمین آب در این مناطق و به‌خصوص منطقه مورد مطالعه بستگی مستقیم به منابع آب زیرزمینی داشته است. بدیهی است در صورت عدم مدیریت صحیح، برداشت مداوم از این منابع ارزشمند موجب بحران‌های جدی می‌شود. بنابراین مدل‌سازی این منابع مورد توجه پژوهشگران بسیاری و نیز این پژوهش قرار گرفت. این پژوهش سعی دارد به ارزیابی وضعیت پایداری آبخوان در آینده و عوامل مؤثر بر ناپایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بپردازد. برای این منظور، با استفاده از روش پویایی سیستم (SD) و نرم‌افزار ونسیم به مدل‌سازی منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی سیرجان پرداخته شد. در ادامه، پس از مشخص شدن درجه اطمینان از مدل، به تبیین سناریوها و اجرای مدل برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در سال‌های آتی پرداخته شد. در پایان، شاخص پایداری در هر سناریو محاسبه شد تا وضعیت پایداری آب در سال‌های آتی بررسی شود. پس از اعمال سناریوها، نتایج نشان داد که با ادامه وضعیت موجود وضعیت آبخوان ناپایدارتر خواهد شد و از جمله متغیرهای برون‌زای مؤثر، مصارف کشاورزی می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶	
واژه‌های کلیدی:	
پویایی سیستم، توسعه پایدار، حوضه سیرجان، مدل‌سازی، ونسیم.	

استناد: پورخسروانی، محسن، جمشیدی گوهری، فاطمه، سیاری، نسرين، عابدزاده، سعیده. (۱۴۰۲). ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز

سیرجان با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۶)، ۹۹-۱۱۴.

DOI: 10.22111/jneh.2022.42067.1893



ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان © محسن پورخسروانی*، فاطمه جمشیدی گوهری، نسرين سياري، سعیده عابدزاده.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسئله آب به‌عنوان یک موضوع مهم در مباحث مذاکرات بین‌المللی قرار گرفته است. به تدریج با مشاهده پدیده‌های ناشی از نحوه بهره‌برداری، بحث مدیریت منابع آب به بالاترین رده‌های تصمیم‌گیری در سطوح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی رسیده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۴). اختلاف بین مقدار تأمین و تقاضای آب و رقابت رو به رشد بین بخش‌های مختلف اقتصادی بحران آفرین است. هنگامی که این عدم تعادل با سناریوهای مدیریتی قابل مهار نباشند، پیامدهای عدیده‌ای را می‌تواند ایجاد نماید که ساختار توسعه انسانی، محیطی، منطقه‌ای و جهانی را تحت‌الشعاع قرار دهد (گرلاک و مختاروف، ۲۰۱۵). با توجه به این که بخش عمده‌ای عدم تعادل در منابع آب ناشی از چرخه‌ی آب‌شناسی و محدودیت‌های طبیعی و فیزیکی آن است، بخش دیگر عواقب ناشی از فعالیت‌ها و اقدامات بشری با بهره‌گیری بی‌رویه، غیراصولی و نامناسب از فناوری‌ها در عرصه‌ی استحصال منابع آب و عدم حضور نگرش سیستمی، پیامدهای منفی و مخربی را بر منابع محدود آبی تحمیل نموده است (مارستون و کای^۱، ۲۰۱۶). با توجه مسائل بالا، جامعه منابع آب بر اهمیت مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی تأکید کرده است. بنابراین یافتن راه‌حلهایی برای تحقق پایداری آب‌های زیرزمینی در مقیاس‌های چندگانه بسیار مهم است (استوکستاد^۲، ۲۰۲۰). روش پویایی سیستم در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه، یکپارچه دیدن سیستم و در نظر گرفتن روابط و اندرکنش‌های میان اجزای مختلف آن می‌باشد. این روش یک ابزار مدیریتی است که علاوه بر تشریح سیستم‌های پیچیده‌ی منابع آب بر اساس واقعیت، امکان دخالت کاربر در توسعه مدل را نیز فراهم می‌کند. همچنین، نگرش پویایی سیستم بهترین راه جهت برنامه‌ریزی پایدار در سطح حوضه آبریز با در نظر گرفتن اصول و مبانی آن است (میثاقی، ۱۳۸۹). در حوضه آبریز سیرجان با توجه به افت شدید سطح آب آبخوان طی سال‌های اخیر و بحران آبی شکل گرفته، اگر تدبیری اندیشیده نشود فاجعه عمیق اتفاق خواهد افتاد. بنابراین نیاز شدید به یک مدل پویا از منابع آب در این حوضه آبریز احساس می‌شود. طی سال‌های گذشته، پژوهشگرانی در زمینه‌های متنوع مرتبط با آب، از این روش پویایی سیستم در مطالعاتشان استفاده نموده‌اند. پژوهشی از مدل ونسیم با توجه به پویایی بالای سیستم‌های مدیریت منابع آب برای مدل‌سازی سیستم منابع آب پایین دست سد کرخه استفاده کرد. پس از اعتبارسنجی مدل، شاخص‌های پایداری آب-های سطحی تحت سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده و بسته‌های مختلف سیاست‌گذاری مورد بررسی قرار گرفت. در پایان، بسته‌های سیاست مربوط به هر سناریو بر اساس فرایند سلسه‌مراتب تحلیلی رتبه‌بندی شدند (عبادی و همکارانش، ۲۰۱۵). در پژوهش دیگری در چین، با استفاده از شاخص کمبود آب به بررسی مدیریت پایدار آینده آب در این منطقه و مدل‌سازی کمی و تجزیه و تحلیل توسعه آب پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل‌سازی مدیریت آب بر اساس تئوری پویایی سیستم، بهره‌برداری پایدار از منابع آب را به دنبال خواهد داشت (هوان هوان و همکاران^۳، ۲۰۱۶). در پژوهشی سه سناریوی گسترش کشت گندم، توسعه زیرساخت‌ها، مدیریت منابع آب و توسعه کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه ولتا با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم‌ها مطالعه گردیدند. نتایج این مطالعه نشان داد که سناریوی توسعه زیرساخت‌ها گام مهمی در جهت بهبود کشاورزی منطقه و همچنین حفظ منابع آب

1-Marston and Cai
2-Stokstad
3-Huanhuan et al

می‌باشد (کوتیر و همکاران^۱، ۲۰۱۶). در پژوهشی، ضمن مدل‌سازی سیستم سد مخزنی یا مچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره‌برداری، از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار ونسیم استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که اعمال سیاست الگوی کشت بهینه پیشنهادی، سبب کاهش مصرف آب بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه می‌گردد (فوتوکیان و همکاران^۲، ۲۰۱۷). گروه دیگری ضمن بررسی بهره‌برداری از منابع آب در چین، شرایط عرضه و تقاضای آب را از سال ۲۰۰۵ تا سال ۲۰۲۰ با رویکرد پویایی سیستم شبیه‌سازی نموده‌اند. آن‌ها دریافتند راه اساسی برای پر کردن شکاف بین عرضه و تقاضای منابع آبی، بهبود شرایط تأمین آب است که بیشتر از کنترل تقاضای آن حائز اهمیت می‌باشد (سان و همکاران^۳، ۲۰۱۷). در مطالعه دیگری، جهت شبیه‌سازی و ارزیابی شاخص تکاپوی آب سد مخزنی شهید یعقوبی، با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم نشان داد که با توجه به آب-دهی رودخانه و مقدار تقاضا برخی از ماه‌ها قادر به پاسخگویی مقدار نیاز کشاورزی پایین‌دست نمی‌باشد؛ اما در سایر مواقع علاوه بر تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست قادر به کمک در تأمین بخشی از نیاز کشاورزی دشت جنگل نیز می‌باشد (صبافی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین گروهی به مدل‌سازی پویایی نظام آب‌های زیرزمینی در آبخوان همدان-بهار پرداختند. نتایج نشان داد که با کنترل تقاضا و اتخاذ شیوه‌هایی چون افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان و رشد تصفیه‌ی پساب‌های شهری و صنعتی تعادل آبخوان را می‌توان احیاء نمود (اسدآبادی و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهشگرانی در آفریقای جنوبی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم به ارزیابی چهار سناریو تقاضای آب پرداختند و از شاخص عملکرد پایداری بهینه برای اولویت‌بندی سناریوها استفاده گردید (آمو و همکاران^۴، ۲۰۲۰). کاربرد دیگر ونسیم در زمینه آب، ارزیابی ریسک طرح‌های توسعه منابع با شبیه‌سازی منابع و مصارف سواحل مکران و بندرعباس می‌باشد. در این پژوهش، پژوهشگران با استفاده از نتایج خروجی ونسیم و رویکرد نوین تحلیل درخت خطا به ارزیابی ریسک طرح‌های توسعه منابع آب در چارچوب توسعه پایدار پرداختند (عابدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین در پژوهشی ضمن شبیه‌سازی تخصیص آب‌های سطحی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم و شناسایی الگوهای رفتاری حوضه آبریز قروه دهگلان با توجه به بازخوردهای موجود در مدل و طبیعی نمودن تمام دبی‌ها و آمار کشاورزی، مقدار و محل حداکثر و حداقل برداشت را مشخص کردند (پایمزد، ۱۴۰۰). گروهی به منظور مدل‌سازی سیستم‌های یکپارچه منابع آب حوضه بزرگ کارون ایران با رویکرد دینامیک سیستم از ونسیم استفاده کردند که تعاملات بین اجزای مختلف سیستم از جمله پروژه‌های انتقال آب، سدها، شهری، صنعت، کشاورزی و پرورش ماهی و تقاضاهای زیست‌محیطی را در بر داشته است. شاخص‌های عملکرد مانند تنش آب کمی و کیفی، درآمد، هزینه و بهره‌وری در اینجا برای نشان‌دادن جنبه‌های مختلف اهداف پایداری استفاده شده‌اند (دهکردی و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعه دیگری با توجه به کمبود منابع آب در حوضه کرخه، یک مدل دینامیک سیستم برای ظرفیت حمل منابع آب توسعه داده و تعادل بین عرضه و تقاضای آب را تحلیل می‌کند. نتایج نشان داد که ظرفیت حمل منابع آبی در حوزه هراز نمی‌تواند پاسخگوی تقاضای توسعه اجتماعی-اقتصادی در سال‌های آینده باشد (خلیلی و همکاران، ۲۰۲۱). گروهی به منظور ارزیابی تأثیر مخزن بر سفره آب زیرزمینی از مدل شبیه‌سازی ونسیم استفاده کردند. در این مطالعه سناریوها بر مبنای شرایط تغییر اقلیم

1-Kotir et al

2-Fotookian et al

3-Sun et al

4-Amoo et al

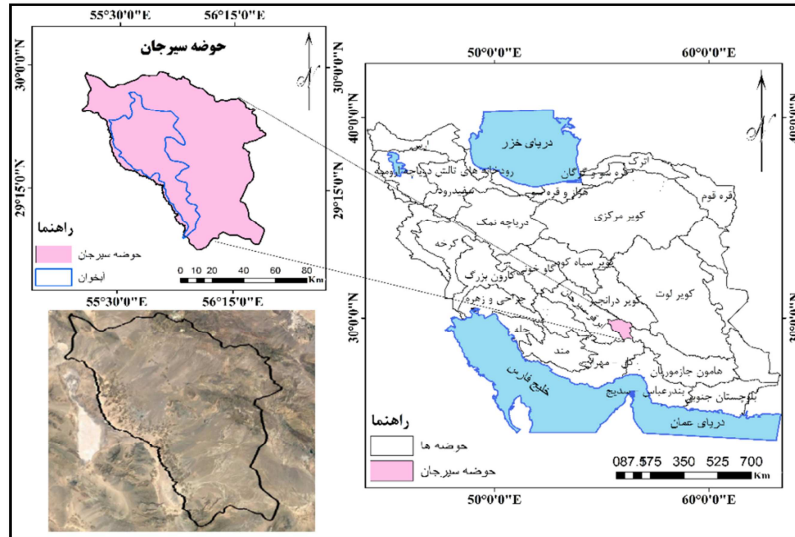
اتخاذ گردید (سردو و جلال‌کمالی، ۲۰۲۲). گروه مطالعاتی به منظور داشتن چشم‌اندازی جامع برای تأمین نیازهای آبی، ابتدا به تجزیه و تحلیل اثرات اقلیم، سپس پیش‌بینی رواناب با شبکه عصبی مصنوعی و در نهایت به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف برای ارزیابی تعادل آب با استفاده از ونسیم پرداختند (باغنام و همکاران، ۲۰۲۲).

جمع‌بندی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای، مدل‌سازی منابع و مصارف در سه زیرسیستم منابع سطحی، منابع زیرزمینی و مصارف و استفاده از شاخص پایداری "نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر واقعی" به‌طور هم‌زمان صورت نگرفته است. بنابراین این پژوهش قصد دارد با در نظر گرفتن فاکتورهای بالا به‌صورت توأمان به پیش‌بینی پایداری منابع زیرزمینی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی بپردازد.

داده‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سیرجان واقع در استان کرمان با مساحت حدود $7942/9$ کیلومتر مربع در بین 55 درجه 15 دقیقه تا 56 درجه 27 دقیقه طول شرقی و همچنین بین 28 درجه 52 دقیقه تا 29 درجه 57 دقیقه عرض شمالی واقع شده است که دارای 4 ایستگاه هیدرومتری می‌باشد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است. در بالادست محدوده مطالعاتی سیرجان، هیچ محدوده مطالعاتی واقع نشده است. بنابراین هیچ جریانی وارد منطقه مورد مطالعه نمی‌شود؛ اما با توجه به مطالعات بهنگام‌سازی بیلان منابع آب در محدوده مطالعاتی از سال $1345-46$ آبی تا $1389-90$ متوسط سالانه خروجی از حوضه آبریز سیرجان معادل $15/1$ میلیون مترمکعب می‌باشد. جریان‌های سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی سیرجان وارد محدوده مطالعاتی کویر سیرجان می‌شوند. سدهای تنگ‌کوه و شمس‌آباد از جمله سدهای موجود در محدوده مطالعاتی مورد مطالعه می‌باشند که متوسط سالانه برداشت از این سدها جهت مصارف مختلف معادل $28/83$ میلیون مترمکعب می‌باشد (گزارشات بیلان منابع آب، 1390). محدوده مطالعاتی سیرجان با 4419 که دارای وسعت $7942/9$ کیلومتر مربع می‌باشد، دارای آبخوانی آبرفتی آزاد با وسعت 2009 کیلومتر مربع و ضریب ذخیره 7% می‌باشد. اولین دوره آماربرداری از منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی سیرجان مربوط به سال 1347 می‌باشد. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از گزارشات بیلان منابع آب، مقدار حجم آب ورودی و خروجی به آبخوان سیرجان از حوضه‌های مجاور به ترتیب $21/2$ و $2/01$ میلیون مترمکعب می‌باشد (گزارشات بیلان منابع آب، 1390).



شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه. منبع: نگارندگان ۱۴۰۰

هدف کلی در پژوهش پیش رو، پیش‌بینی پایداری منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز سیرجان و اولویت‌بندی سیاست‌های مدیریتی با استفاده از روش پویایی سیستم در محیط نرم‌افزاری ونسیم می‌باشد. این پژوهش مبتنی بر روش‌های توصیفی و تحلیلی است. در این پژوهش کلیه داده‌ها مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان اخذ شد و جهت تحلیل داده‌ها از روش پویایی سیستم‌ها و نرم‌افزار ونسیم استفاده شد.

براساس روش‌های پویایی سیستم، مدل‌سازی به‌صورت گام به گام انجام می‌گیرد. پس از طی کردن گام‌های پژوهش با استفاده از خروجی مدل و شاخص پایداری، اولویت‌بندی سناریوها و تعیین پارامتر مؤثر بر ناپایداری صورت می‌گیرد. گام‌های پژوهش عبارتند از:

الف- تعریف مسئله: مدل پویایی سیستم، درصدد تحلیل مسئله به‌صورت پویا می‌باشد. به عبارتی دیگر مسئله به صورت یک الگوی رفتاری طی زمان در نظر گرفته می‌شود. این الگو بیانگر چگونگی به‌وجود آمدن مسئله و نحوه بروز آن در آینده می‌باشد. بنابراین، بایستی الگویی به‌عنوان الگوی مرجع تعیین نمود و آنقدر سیستم را تغییر داد تا نتایج با الگوی مرجع تطابق یابد. در این مطالعه الگوی مرجع افت‌وخیز تراز آب زیرزمینی می‌باشد.

ب- محدوده زمانی: محدوده زمانی برای نشان دادن چگونگی طرح مسئله و توصیف نشانه‌های آن، بایستی به اندازه کافی در تاریخ بسط داده شود. دوره زمانی مورد استفاده در این مطالعه به منظور آموزش سیستم پویا از سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ شروع شده و تا سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ ادامه دارد. سال ۱۳۹۷ و سال ۱۴۱۴ به ترتیب به‌عنوان سال مبنا و افق طرح برای اجرای سناریوهای مدیریتی انتخاب شده‌اند.

ج- مدل‌سازی زیرسیستم منابع آب سطحی: این زیرسیستم شامل متغیرهای ورودی و خروجی به منابع سطحی می‌باشد.

- متغیر تبخیر از سدها

- متغیر حجم خروجی از سدها
- متغیر میزان خروجی آب سطحی به حوضه مجاور
- متغیر میزان ورودی آب سطحی از حوضه مجاور
- متغیر حجم رواناب: با داشتن مساحت حوضه آبریز و با ضرب آن در متوسط بارش سالیانه، میزان حجم بارش (V_p) محاسبه می‌شود. بنابراین، برای محاسبه میزان حجم رواناب حوضه (V_R) بایستی از ضریب رواناب (C_R) و رابطه ذیل استفاده گردد.

$$V_R = V_p \times C_R \quad (1)$$

د- مدل‌سازی زیرسیستم منابع آب زیرزمینی: به منظور مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی بایستی از معادله کلی بیلان آب آبخوان مطابق ذیل عمل کرد (گزارش بیلان آب مهندسین مشاور آبخوان، ۱۳۹۲).

$$\Delta V = Q_{pi} + Q_{si} + Q_{us} + Q_r - ET - Q_{uo} - Q_d - Q_{dr} \quad (2)$$

ضریب نفوذ بارش \times حجم بارش = Q_{pi} (حجم نفوذ عمقی به آبخوان)

Q_{si} = (حجم نفوذ از رواناب به آبخوان) = (حجم رواناب خروجی - حجم بهره‌برداری از رواناب - حجم کل رواناب) \times ضریب رواناب

Q_{us} (حجم جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان)

Q_r (حجم آب برگشتی) = ضریب کاهنده آب برگشتی \times (حجم آب مصرفی - حجم آب بهره‌برداری)

Q_{uo} (حجم جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان)

ET (تبخیر) \sim عمق سطح آب، درجه حرارت، شرایط خاک = هنگامی که سطح آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر باشد صرف نظر می‌شود.

Q_d (حجم بهره‌برداری از آبخوان)

Q_{dr} (حجم زهکشی آبخوان) = هنگامی که ناچیز باشد یا زهکشی به رودخانه‌ها وجود نداشته باشد صرف نظر می‌شود.

ه- مدل‌سازی زیرسیستم مصارف: این زیرسیستم از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت تشکیل می‌شود که محاسبه هریک از مصارف در ادامه به تفکیک شرح داده می‌شود.

- مصارف کشاورزی: مصارف کشاورزی از حاصل ضرب نیاز خالص آبی دشت در سطح زیرکشت کل به دست می‌آید که به الگوی کشت بستگی دارد. همچنین با ضرب نیاز خالص آبی الگوی کشت در ضریب بازدهی کشاورزی مقدار ناخالص آب مصرفی کشاورزی به دست می‌آید.

- مصارف شرب: برای مدل‌سازی این بخش از دو زیرسیستم جمعیت و مصرف سرانه آب در روز استفاده می‌گردد که به صورت ذیل شرح داده خواهند شد.

- جمعیت: با اعمال نرخ متوسط رشد سالانه در جمعیت حوضه آبریز و در سال پایه، مقدار رشد خالص جمعیت و به تبع آن جمعیت به ازای سال‌های مختلف به دست خواهد آمد.

- متوسط مصرف سرانه آب: با اعمال نرخ رشد متوسط مصرف سرانه در متغیر مصرف سرانه آب در روز در سال پایه، رشد متوسط مصرف سرانه به دست خواهد آمد و به دنبال آن مصرف سرانه آب در روز در سال‌های آتی به دست می‌آید. با داشتن مصرف سرانه آب در روز می‌توان مصرف سرانه آب در سال را نیز محاسبه کرد. ولی برای به دست آوردن مصرف خالص شرب بایستی از ضریبی به نام ضریب مصرف خالص استفاده کرد.

- مصارف صنعت: میزان بهره‌برداری شده در بخش صنعت به ازای سال‌های مختلف در آب منطقه‌ای موجود است. با داشتن اطلاعات مصرفی صنعت و اعمال فاکتور مصرف خالص، مقدار مصرف صنعت به دست می‌آید و در مدل لحاظ می‌گردد.

و- **آزمون مدل:** به مقایسه رفتار شبیه‌سازی شده با رفتار واقعی سیستمی، آزمون مدل می‌گویند. بدین منظور روش‌های مختلفی وجود دارند که به کمک آنها به ارزیابی عدم قطعیت فرضیه‌ها، هم‌پارامتری و هم‌ساختاری مدل پرداخته می‌شود. از جمله این روش‌ها، می‌توان به آزمون شرایط حدی و آنالیز حساسیت اشاره کرد.

- آزمون شرایط حدی: هدف در این روش، کنترل مقادیر خروجی یا متغیر مرجع تحت شرایط حدی می‌باشد. برای مثال، هنگامی که مقدار تغذیه به آبخوان به صفر تقلیل یابد بایستی مقدار تراز آبخوان در صورت ثابت بودن سایر پارامترها کاهش یابد.

- آنالیز حساسیت: در این روش می‌توان اثر هر متغیر که دارای عدم قطعیت می‌باشد را بر تغییرات متغیرهای مرجع بررسی و اثرات بازخوردی آن‌ها را مشاهده کرد.

ز- **سناریوها و سیاست‌ها:** سناریوهای مدیریتی مبتنی بر پارامترهای برون‌زای مدل که قابل تغییر توسط سیاست‌گذار در منطقه می‌باشد، تولید می‌گردد. یکی از پارامترهای برون‌زا در مدل بالا مصارف کشاورزی می‌باشد که با رویکرد نیل به توسعه پایدار منابع آب، اثرات خود را بر مدل وارد می‌نمایند. بنابراین در این پژوهش با فرض ثابت بودن شرایط معمول بارش و سایر مصارف شرب و صنعت و همچنین اتخاذ سیاست‌های مختلف مدیریتی به بررسی ۴ سناریو پرداخته شده است.

- سناریوی اول: ادامه وضع موجود

- سناریوی دوم: کاهش ۱۰ درصدی مصارف کشاورزی

- سناریوی سوم: کاهش ۲۰ درصدی مصارف کشاورزی

- سناریوی چهارم: کاهش ۷۰ درصدی مصارف کشاورزی

ح- **شاخص توسعه پایدار:** گفتنی است که جهت نیل به هدف توسعه پایدار از یکی از شاخص‌های سنجش پایداری منابع آب با نام نسبت "آب مصرفی به آب تجدیدپذیر واقعی" در هر سناریو بهره خواهیم برد. به مقدار آبی که حوضه طی چرخه آبی سالانه توانایی بازآیی آن را داشته باشد، آب تجدیدپذیر می‌گویند. گفتنی است تمامی این مقادیر آب تجدیدپذیر قابلیت دسترسی ندارند. بنابراین متغیری به نام منابع آب قابل بهره‌برداری وجود دارد که به فاکتورهایی مثل امکان اقتصادی و فیزیکی ذخیره سیلاب، امکان استخراج آب زیرزمینی، امکان جذب آب جاری قبل از خروج آن از حوضه و یا آزادسازی حداقل جریان لازم برای پایین دست (حقابه) بستگی دارد (میثاقی و همکاران، ۱۳۹۳).

$$Rw = (R+I) + (R_i + G_i) - (R_o + G_o) \quad (۳)$$

که:

Rw : آب تجدیدپذیر واقعی (میلیون متر مکعب)

R : میزان رواناب حاصل از بارش در حوضه آبریز (میلیون متر مکعب)

I : میزان نفوذ حاصل از بارش در حوضه آبریز (میلیون متر مکعب)

R_i : رواناب ورودی از حوضه‌های مجاور (میلیون متر مکعب)

G_i : آب زیرزمینی ورودی از حوضه‌های مجاور (میلیون متر مکعب)

R_o : رواناب خروجی به حوضه‌های مجاور (میلیون متر مکعب)

G_o : آب زیرزمینی خروجی به حوضه‌های مجاور (میلیون متر مکعب)

یافته‌های پژوهش

الف- وضعیت آب‌وهوایی و اقلیمی

با استفاده از آمار و اطلاعات سالانه پردازش شده در ایستگاه‌های هواشناسی کشور و ایستگاه‌های تبخیرسنجی وزارت نیرو، مقدار متوسط بارش در محدوده مطالعاتی و تبخیر از سدهای محدوده مطالعاتی به ترتیب ۱۴۳۰ و ۲/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است.

ب- مدل‌سازی زیرسیستم منابع آب سطحی:

براساس اطلاعات به دست آمده از گزارشات بیلان آب، مقدار آب سطحی خروجی از حوضه، حجم خروجی از سدها و تبخیر از سدها به ترتیب ۱۵/۱، ۲۸/۸۳ و ۲/۳ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد که این مقدار در طول دوره زمانی کالیبراسیون مدل و پیش‌بینی مدل به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل عدم وجود حوضه در بالادست، جریانی وارد حوضه نمی‌شود، پس متغیر ورودی آب سطحی از حوضه مجاور در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. همچنین براساس اطلاعات گرفته شده از گزارشات بیلان، مساحت حوضه آبریز سیرجان ۷۹۴۲ کیلومتر مربع می‌باشد و ضریب رواناب (نسبت مقدار حجم رواناب تولیدی به کل بارش) با توجه به اطلاعات گزارشات بیلان آب برابر ۰/۰۵۳ در نظر گرفته شد. براساس این اطلاعات و رابطه ۱ متوسط رواناب سالانه حوضه برابر ۷۴/۰۴ میلیون مترمکعب می‌باشد.

ج- مدل‌سازی زیرسیستم منابع آب زیرزمینی:

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد مدل‌سازی زیرسیستم منابع آب زیرزمینی براساس معادله بیلان کلی آب آبخوان (رابطه ۲) انجام می‌گردد. در ادامه مقادیر مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای معادله بیلان براساس گزارشات بیلان منطقه مورد مطالعه ارائه گردیده است.

برای محاسبه متغیرهای تغذیه آب زیرزمینی، پارامترهایی چون مقدار آب زیرزمینی ورودی به حوضه (Q_{us})، مقدار ضریب نفوذ عمقی (نسبت مقدار نفوذ بارش به کل حجم بارش) و مقدار ضریب نفوذ رواناب به آب زیرزمینی (نسبت

مقدار نفوذ رواناب به کل رواناب) مورد نیاز است که براساس اطلاعات بیلان آب و معادلات ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، این مقادیر به ترتیب معادل ۲۱/۲ میلیون مترمکعب، ۰/۰۳۷ و ۰/۳۹ برآورد گردیده‌اند. لازم به یادآوری است که متغیر Qus در طول دوره زمانی کالیبراسیون مدل و پیش‌بینی مدل به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه متغیر میزان آب برگشتی به آبخوان (Qt)، به منظور دستیابی به ضریب کاهنده از روش مهندسی معکوس رابطه ۴ استفاده شده است. به عبارتی دیگر با داشتن مقدار آب برگشتی، مقدار کل آب مصرفی و مقدار کل آب بهره‌برداری شده در سال پایه دوره شبیه‌سازی (سال ۱۳۹۷)، مقدار ضریب کاهنده آب برگشتی معادل ۱/۲۵ به دست آمد. با داشتن مقدار ضریب کاهنده، پس از محاسبه مقدار آب خالص مصرفی و آب بهره‌برداری شده در مدل ونسیم به ازای سال‌های مختلف، مقدار آب برگشتی در هر سال برآورد شد.

براساس اطلاعات به دست آمده از گزارشات بیلان آب، مقدار آب زیرزمینی خروجی از حوضه معادل ۲/۰۱ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد که این مقدار در طول دوره زمانی کالیبراسیون مدل و پیش‌بینی مدل به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین نحوه محاسبه متغیر بهره‌برداری سالانه (برداشت چاه و چشمه و قنات) در مدل منابع و مصارف آب به گونه‌ای است که ابتدا نیازها از منابع سطحی تأمین گردیده و سپس از منابع زیرزمینی تأمین می‌گردند. گفتنی است مقادیر بهره‌برداری از منابع سطحی در این مطالعه ثابت فرض شده‌اند. از دیگر متغیرهای تخلیه آب زیرزمینی می‌توان به تبخیر و تعرق و حجم زهکشی آبخوان اشاره کرد که در این مطالعه به ترتیب به دلیل پایین بودن سطح آب و ناچیز بودن در محاسبه بیلان لحاظ نگردیدند.

د- زیرسیستم مصارف مختلف

مقدار بازدهی کشاورزی، نیاز ناخالص کشاورزی و میزان بهره‌برداری صنعت طبق گزارشات بیلان به ترتیب معادل ۶۶٪، ۳۵۴/۹۷ و ۱۱/۱۴ میلیون مترمکعب می‌باشد که این مقادیر در طول دوره زمانی کالیبراسیون مدل و پیش-بینی مدل به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی ثابت در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در بخش قبلی شرح گردید، برای مدل‌سازی مصارف شرب از دو زیرسیستم جمعیت و مصرف سرانه آب در روز استفاده گردید. برای اجرای زیرسیستم جمعیت مقدار نرخ رشد متوسط معادل ۰/۰۱ و جمعیت در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۷ به ترتیب معادل ۱۹۳۶۷۵ و ۳۲۴۱۰۳ نفر به دست آمد. همچنین اطلاعات پایه زیرسیستم مصرف سرانه آب در روز برای متغیر نرخ رشد متوسط مصرف سرانه و مقدار سرانه مصرف روزانه آب شهری در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۷ به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۱۴۵ و ۱۷۰ می‌باشد. با داشتن مصرف سرانه آب در روز، مصرف سرانه آب در سال محاسبه شد. همچنین برای به دست آوردن مصرف خالص شرب از ضریبی به نام ضریب مصرف خالص استفاده شد. مقدار این ضریب از روش سعی و خطا معادل ۰/۱۸ به دست آمد.

ه- متغیرهای مدل به همراه فرض‌های لحاظ شده

متغیرهای حالت و ثابت در ونسیم به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه گردیده‌اند و فرض‌های مدل عبارتند از:

- از برداشت‌های احتمالی غیرمجاز در مدل‌سازی چشم‌پوشی شده است و کاهش منابع آب زیرزمینی براساس میزان تقاضا در نظر گرفته شده است.

- از متغیرهای کیفی جهت ساده‌سازی و فعالیت‌های اقتصادی به دلیل عدم وجود سیاست‌های اقتصادی در مدل منابع و مصارف صرف نظر شده است.
- مقدار آب‌های زیرزمینی و سطحی ورودی و خروجی از حوضه در طول دوره زمانی ثابت فرض شده است.
- مساحت آبخوان ثابت فرض شده است، به عبارتی دیگر اثر کاهش سطح آبخوان به علت پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در مدل لحاظ نشده است.
- در تدوین سناریوها مصارف شرب و صنعت به دلیل ساده‌سازی و کاهش تعداد زیاد سناریوها ناشی از حالت‌های مختلف قابل بررسی، ثابت فرض شده است.

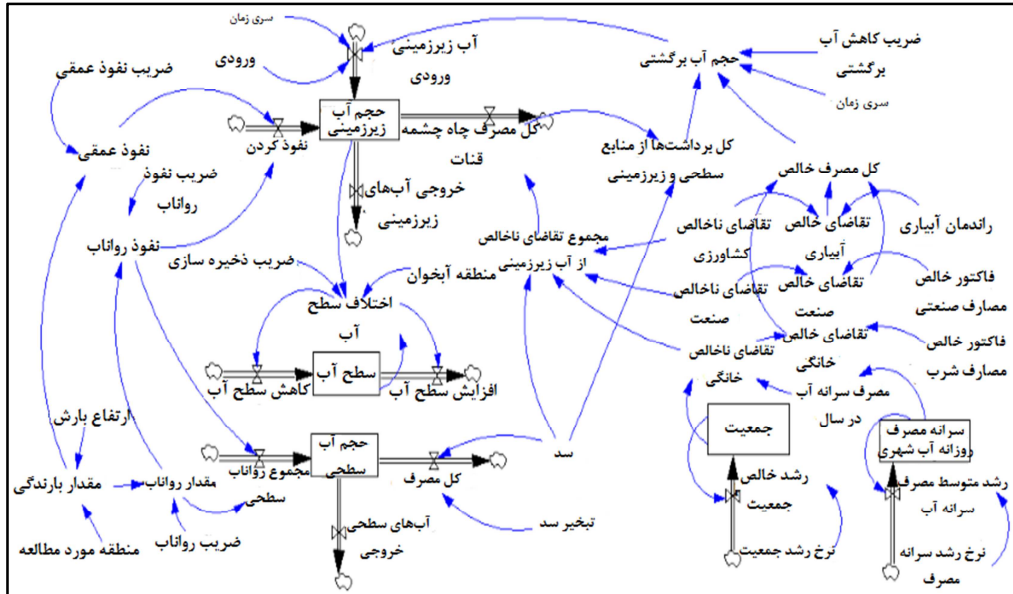
جدول ۱: مقادیر اولیه متغیرهای حالت در مدل منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی سیرجان

متغیر حالت	معادل انگلیسی در مدل ونسیم	سال ۱۳۸۱	سال ۱۳۹۷	مأخذ
حجم آب سطحی	surface water	۴/۴۳	۴/۴۳	گزارش بیلان
سرانه مصرف روزانه آب شهری	water per capita consumption	۱۴۵	۱۷۰	آب و فاضلاب کرمان
حجم آب زیرزمینی	GW volume	۲۴۱۴۶۷	۲۳۹۴۶۲	گزارش بیلان
جمعیت	Population	۱۹۳۶۷۵	۳۲۴۱۰۳	سالنامه
تراز آب زیرزمینی	Gw level	۱۷۱۷/۰۳۵	۱۷۰۴/۹۱۴	گزارش بیلان

جدول ۲: مقادیر ثابت در مدل منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی سیرجان

متغیر ثابت	معادل انگلیسی در مدل ونسیم	مقدار	مأخذ
ضریب رواناب	runoff coefficient	۰/۰۵۳	گزارش بیلان آب
ضریب نفوذ رواناب	runoff infiltrate C	۰/۳۹	گزارش بیلان آب
ضریب نفوذ عمقی	deep infiltrate C	۰/۰۰۳۷	گزارش بیلان آب
ضریب کاهش آب برگشتی	decreasing coefficient for return water	۱/۲۵	آزمون سعی و خطا
فاکتور خالص مصارف صنعتی	industry uses pure factor(ind)	۰/۳	آزمون سعی و خطا
نرخ رشد سرانه مصرف	water per capita consumption rate	۰/۰۰۵	آزمون سعی و خطا
فاکتور خالص مصارف شرب	domestic uses pure factor	۰/۱۸	آزمون سعی و خطا
راندمان آبیاری	irrigation efficiency	۰/۶۶	گزارش بیلان آب

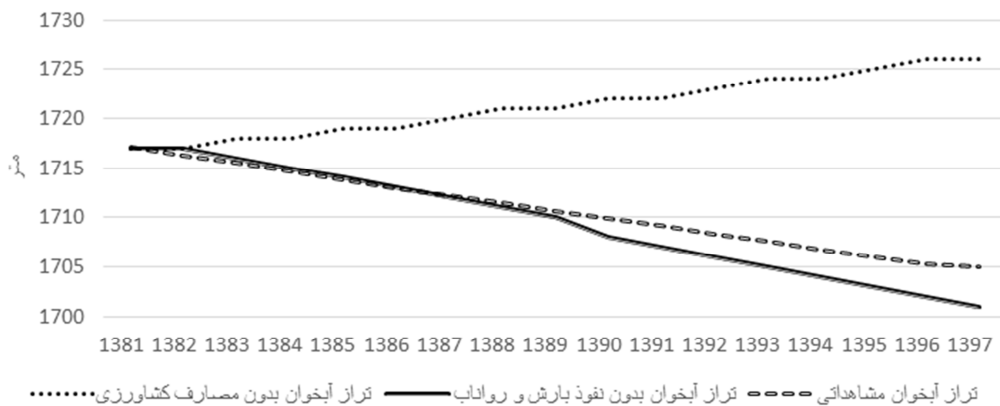
پس از مدل‌سازی زیرسیستم‌ها، مدل منابع و مصارف آب سیرجان نهایی شد و شکل ۲ شمایی از مدل منابع و مصارف آب حوضه آبریز سیرجان را نشان می‌دهد.



شکل ۲: شمایی از مدل منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی سیرجان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰

و- نتایج آزمون مدل

نتایج صحت‌سنجی مدل منابع و مصارف حوضه سیرجان، تحت دو آزمون شرایط حدی و آنالیز حساسیت در شکل ۳ و جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از روند تغییرات تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی، مقدار $RMSE^1$ بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر $0/56$ برآورد گردید (شکل ۴).

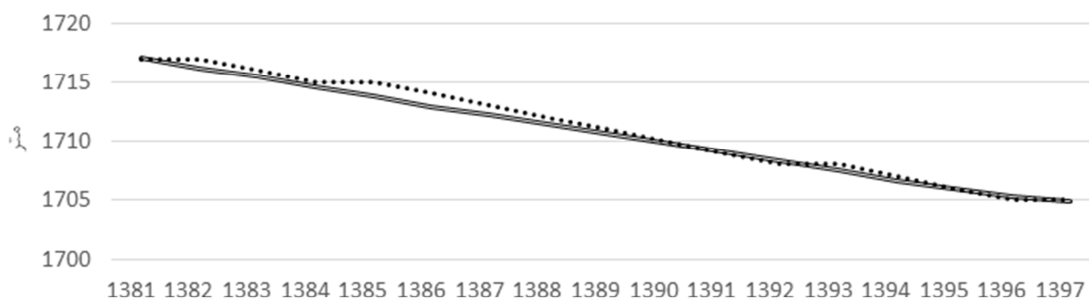


شکل ۳: روند تراز آبخوان مشاهداتی و تراز آبخوان در سناریوهای مختلف آزمون شرایط حدی

¹ جذر میانگین مربعات خطا= Root-Mean-Square Error

جدول ۳: نتایج آزمون‌های آماری آنالیز حساسیت مدل نسبت به متغیرهای ثابت

متغیر ثابت	معادل انگلیسی در مدل ونسیم	پارامتر		
		مقدارمتغیر	RMSE	مقدارمتغیر
ضریب نفوذ رواناب	runoff infiltrate C	۰/۳۸۰	۰/۳۹۰	۰/۴۰۰
		۰/۵۷۸	۰/۵۶۱	۰/۵۷۸
ضریب نفوذ عمقی	deep infiltrate C	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
		۰/۶۰۳	۰/۵۶۱	۰/۵۷۸
ضریب رواناب	runoff coefficient	۰/۰۵۰	۰/۰۵۳	۰/۰۵۴
		۰/۶۰۳	۰/۵۶۱	۰/۵۷۸
ضریب کاهشنده آب برگشتی	decreasing C for return water	۱/۲۰۰	۱/۲۵۰	۱/۳۰۰
		۰/۶۲۰	۰/۵۷۸	۰/۸۰۲
فاکتور خالص مصارف شرب	domestic uses pure factor	۰/۱۵۰	۰/۱۸۰	۰/۲۵۰
		۰/۵۷۸	۰/۵۶۱	۰/۶۰۳
فاکتور خالص مصارف صنعتی	industry uses pure factor	۰/۲۰۰	۰/۳۰۰	۰/۴۰۰
		۰/۵۷۸	۰/۵۶۱	۰/۶۰۳
راندمان آبیاری	irrigation efficiency	۰/۶۴۰	۰/۶۶۰	۰/۷۰۰
		۰/۹۵۶	۰/۵۶۱	۱/۰۹۳
نرخ رشد سرانه مصرف	water per capita uses rate	۰/۰۰۵	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰
		۰/۵۶۱	۰/۵۶۱	۰/۵۶۱

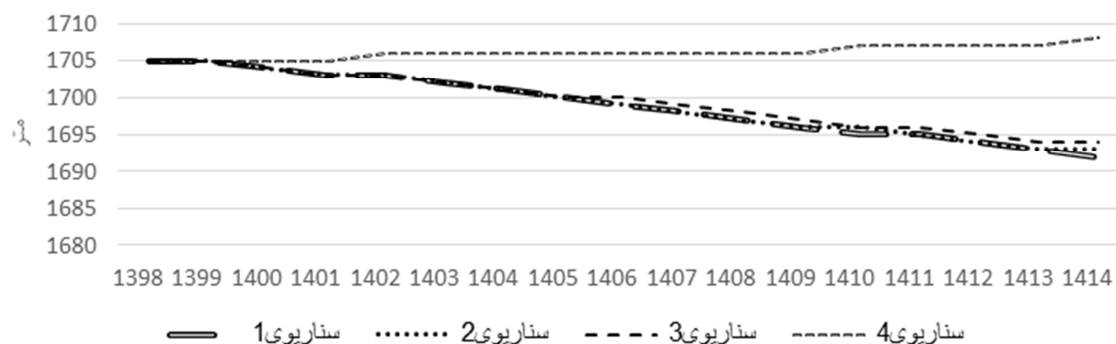


تراز آب زیرزمینی مشاهداتی ————— تراز آب زیرزمینی شبیه سازی

شکل ۴: تراز آبخوان مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۷

ز- نتایج سناریوها و سیاست ها

پس از کالیبره کردن مدل و تعیین اعتبار مدل، سیاست‌ها تحت سناریوهای مختلف برای دوره زمانی ۱۷ ساله از سال ۱۳۹۷ تا ۱۴۱۴ اعمال شد و نتایج تراز آبخوان به ازای هر سناریو در شکل ۵ ارائه گردیده است.



شکل ۵: تراز آبخوان شبیه سازی شده تحت سناریوهای مختلف

ح- نتایج شاخص توسعه پایدار

در بخش‌های قبلی چگونگی محاسبه شاخص پایداری به کلی شرح داده شد، نتایج بدست آمده در هر سناریو در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. شاخص سنجش پایداری تحت سناریوهای مختلف و شرایط موجود

زمان	آب تجدید شونده زیر زمینی	آب سطحی تجدید شونده	کل آب تجدید شونده	کل برداشته‌ها	شاخص پایداری
۱۳۹۷ در سال مینا	۲۷۸/۷۵	۲۳/۴	۳۰۲/۱۵	۳۹۵/۸	۱/۳۱
سال ۱۴۱۴ در سناریوی ۱	۲۷۸/۷۵	۲۳/۴	۳۰۲/۱۵	۴۱۴/۹	۱/۳۷
سال ۱۴۱۴ در سناریوی ۲	۲۷۸/۷۵	۲۳/۴	۳۰۲/۱۵	۴۱۱/۲	۱/۳۶
سال ۱۴۱۴ در سناریوی ۳	۲۷۸/۷۵	۲۳/۴	۳۰۲/۱۵	۳۹۶/۸	۱/۳۱
سال ۱۴۱۴ در سناریوی ۴	۲۷۸/۷۵	۲۳/۴	۳۰۲/۱۵	۱۵۹/۶	۰/۵۳

نتایج و بحث

اعتبارسنجی یکی از مهم‌ترین گام‌ها پس از مدلسازی می‌باشد. بنابراین در این مطالعه در بخش آزمون شرایط حدی بر روی متغیرهای نفوذ (متغیر تغذیه به آبخوان) و مصارف کشاورزی انجام شد و رفتار متغیر افت و خیز سطح آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. به‌گونه‌ای که مقدار افت و خیز سطح آبخوان را به ازای صفر شدن مقادیر نفوذ به آبخوان (سناریوی اول) و صفر شدن مصارف کشاورزی (سناریوی دوم) به‌دست آمد. انتظار می‌رود نتایج به‌گونه‌ای باشد که با صفر شدن مقدار نفوذ و مصارف کشاورزی به ترتیب مقدار تراز آبخوان کاهش و افزایش یابد که با توجه به شکل ۳ این انتظار برآورده شده است. به‌عبارتی دیگر، در سناریوی فرض صفر بودن مقادیر نفوذی به آبخوان، تراز آبخوان از ۱۷۱۷ متر در ابتدای دوره به ۱۷۰۱ متر در انتهای دوره رسید (کاهش) و با فرض صفر بودن مصارف کشاورزی، تراز آبخوان از ۱۷۱۷ به ۱۷۲۶ افزایش یافته است.

همچنین در آزمون آنالیز حساسیت مدل، مقدار متغیر ضریب کاهنده آب برگشتی، ضریب مصرف خالص آب شرب، ضریب مصرف خالص صنعت، راندمان آبیاری، نرخ رشد جمعیت، نرخ رشد سرانه مصرف روزانه شرب، ضریب رواناب، ضریب نفوذ رواناب و ضریب نفوذ عمقی بنابر تخمین خبره و سعی و خطا و انجام آزمون‌های آماری بین مقادیر

مختلف و با تطبیق با واقعیت تعیین گردید. به صورتی که مدل تحت ضرایب مختلف اجرا شده و در نهایت بهترین ضریب که تطابق خوبی با واقعیت داشت، در مدل اتخاذ گردید. نتایج آنالیز حساسیت مدل در جدول ۳ آمده است و مقدار وسط در تمامی متغیرها به عنوان بهترین ضریب با کمترین RMSE مشخص گردید. برای مثال، مقدار ضریب نفوذ رواناب براساس گزارشات ۰/۳۹ گزارش شده است که به منظور تحلیل حساسیت، به مقدار ۰/۱ افزایش و کاهش داده شد و خطای شبیه سازی در هر دو حالت تقریباً به مقدار ۰/۲ افزایش یافت (۰/۵۶ به ۰/۵۸). بنابراین همان مقدار ۰/۳۹ گزارشات منابع آب در مدل لحاظ گردید. به همین ترتیب برای سایر ضرایب، متغیری که کمترین خطا را نشان دهد به عنوان متغیر ثابت مدل اتخاذ گردید.

با توجه به نتایج دو روش آزمون مدل بالا و شکل ۴ که RMSE (میانگین مربعات خطا بین تراز آبخوان مشاهداتی و شبیه سازی) برابر ۰/۵۶ را نشان می دهد، می توان نتیجه گرفت که مدل قابل استفاده برای ارزیابی سناریوهای مختلف می باشد. نتایج به دست آمده از اجرای مدل به ازای سناریوهای مختلف (شکل ۵)، بیانگر آن است که سناریوی اول (حفظ شرایط موجود) با ۱۳ متر افت (۱۷۰۵ متر به ۱۶۹۲ متر) در طول دوره شبیه سازی بیشترین افت را به خود اختصاص داده اند؛ اما تراز آب زیرزمینی در سناریوی چهارم که کاهش ۷۰٪ مصارف کشاورزی بوده است به مقدار ۳ متر (۱۷۰۵ به ۱۷۰۸) افزایش یافته است. به عبارتی دیگر سناریوی چهارم سبب بهبود وضعیت آبخوان و فراهم سازی آمادگی های لازم برای شرایط بحرانی شده است؛ در حالی که سناریوی اول (حفظ شرایط موجود) بدترین نتیجه و بیشترین افت را در آبخوان نشان می دهد. سناریوی دوم و سوم به ترتیب ۱۲ و ۱۱ متر افت تراز را در طول دوره زمانی شبیه سازی به خود اختصاص داده اند و تفاوت چندانی با سناریوی حفظ شرایط موجود نداشته اند. براساس نتایج به دست آمده بهترین و بدترین سناریو به ترتیب سناریوی چهارم و سناریوی اول می باشد.

جدول ۴، شاخص پایداری تحت سناریوهای مختلف و شرایط موجود را نشان می دهد. براساس نتایج به دست آمده، در سال مینا (۱۳۹۷) مقدار شاخص پایداری ۱/۳۱ می باشد (مقدار استاندارد شاخص پایداری آبخوان ۰/۵ می باشد) که نشان از ناپایداری منابع آبی در منطقه است. با اعمال سناریوی اول (حفظ شرایط موجود) و افزایش نیازها در سال ۱۴۱۴ این شاخص به ۱/۳۷ رسیده و وضعیت آبخوان را ناپایدارتر می کند؛ در حالی که با کاهش مصارف کشاورزی در سناریوهای دوم و سوم و چهارم، شاخص پایداری بهبود یافته و به ترتیب به مقدار ۱/۳۶، ۱/۳۱ و ۰/۵۳ در سال ۱۴۱۴ رسیده اند. به طور کلی، سناریوی اول و سناریوی چهارم به ترتیب بدترین و بهترین شاخص پایداری آبخوان را نشان می دهند.

نتیجه گیری

در کشور ایران به دلیل پراکنده بودن و نابرابر بودن بارش در فصول مختلف سال، منابع آب زیرزمینی به دلیل دسترسی در تمامی فصول از اهمیت بالایی برخوردارند. بنابراین پایداری این منبع با ارزش بایستی همیشه مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مطالعه به دلیل ناپایداری آبخوان سیرجان، وضعیت پایداری ادامه شرایط موجود و سناریوهای مدیریتی طی ۱۶ سال آتی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور مدل پویای منابع و مصارف آب طراحی شد. پس از اعمال سناریوها، نتایج نشان داد که با ادامه وضعیت موجود به دلیل افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش تقاضای آب، وضعیت آبخوان ناپایدارتر خواهد شد. بنابراین مدیران زیربسط بایستی اقداماتی در خصوص پایداری

منابع آب زیرزمینی مبدول فرمایند. از جمله متغیرهای برونزای مؤثر بر مدل منابع و مصارف منطقه مورد مطالعه مصارف کشاورزی می‌باشد. به عبارتی دیگر با کاهش ۷۰٪ مصارف کشاورزی تراز آب زیرزمینی افزایش می‌یابد، پس با کاهش این متغیر مقدار پایداری بهبود خواهد یافت. بدین منظور مصارف کشاورزی کاهش داده شد تا شاخص پایداری آبخوان منطقه مورد مطالعه به مقدار استاندارد پایداری (۰/۵) رسید. پیشنهاد می‌گردد مدیران با اقداماتی چون تغییر کاربری اراضی، تغییر الگوی کشت، تغییر روش آبیاری سنتی به مدرن، تبدیل اراضی کشاورزی به گلخانه‌های هیدروپونیک و توسعه صنعت گردشگری و صنایع دستی در منطقه مورد مطالعه به کاهش مصارف آب در بخش کشاورزی بپردازند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مطالعه از سازمان آب منطقه‌ای استان کرمان به جهت همکاری در جمع‌آوری داده تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

پایمزد، شهلا (۱۴۰۰)؛ شبیه‌سازی تخصیص آب‌های سطحی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم و شناسایی الگوهای رفتاری (منطقه‌ی مطالعاتی: حوضه‌ی آبریز قروه دهگلان)، نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، جلد ۱۰، شماره ۳۱، صص: ۱۴۱-۱۲۳.
صباغی، میلاد؛ شاه‌نظری، علی؛ ضیاعی، علی‌نقی (۱۳۹۶)؛ شبیه‌سازی و ارزیابی شاخص تکاپوی آب سد مخزنی شهید یعقوبی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۸، شماره ۱۶، صص: ۱۹۹-۱۸۸.
عزیزی، قاسم، نظیف، سارا، عباسی، فائزه (۱۳۹۵)؛ ارزیابی عملکرد بهره‌برداری از سدهای حوضه آبریز ارومیه با رویکرد پویایی سیستم‌ها، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، جلد ۷، شماره ۲۵، صص: ۶۳-۴۸.
میثاقی، علی (۱۳۸۹)؛ مدلسازی منابع آب در حوضه آبریز با استفاده از روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، مشهد، اساتید راهنما: کامران داوری - سید مجید هاشمی نیا، دانشگاه فردوسی، دانشکده کشاورزی.

میثاقی، علی؛ داوری، کامران؛ قهرمان، بیژن؛ هاشمی نیا، سید مجید (۱۳۹۳)؛ مدلسازی منابع آب با استفاده از روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)، مجله علمی کشاورزی، جلد ۳۷، شماره ۳، صص: ۹۴-۸۳.

Abadi, L., Sadeghi, Kh., Shamsai, A., Goharnejad, H. (2015); An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model, KSCE Journal of civil engineering, 19(6), 1941-1949.

Abdi-Dehkordi, M., Bozorg-Haddad, O., Salavitarbar, A., Goharian, E. (2021); Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches Environ Dev Sustain 23, 16246-16282.

Abedzadeh, S., Roozbahani, A., Heidari, A. (2020); Risk assessment of water resources development plans using fuzzy fault tree analysis, Water Resources Management, Vol. 34, 2549-2569.

Amoo, O. T., Nakin, M. D. V., Abayomi, A., Ojubele, H. O., Salami, A.W. (2020); System Dynamics Approach for Evaluating Existing and Future Water Allocation Planning Among Conflicting Users, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 4, No. 3, pp 44-51.

Asadabadi, E., Asadi, A., Kalantari, K. (2020); Dynamic Modeling of the Groundwater System in Hamedan-Bahar Aquifer, Iranian Journal of Soil and Water Research, Vol. 50, No. 9, 2323-2340.

Fotookian, M. R., Safari, N., Zarghami, M. (2017); Using System Dynamics Modeling to Develop the Operation Policy for Yamchi Reservoir (Iran) by Applying Optimum Cropping Pattern, Iran - Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, pp 1-16.

Gerlak, A. K. and Mukhtarov, F. (2015); 'Ways of knowing' water: Integrated water resources management and water security as complementary discourses, Int. Environ. Agreements: Politics Law Econ, Vol. 15, No. 3, pp 257-272.

- Hosseini Baghanam, A., Seifi, A. J., Sheikhabaei, A., Hassanzadeh, Y., Besharat, M., Asadi, E. (2022); Policy-Making toward Integrated Water Resources Management of Zarrine River Basin via System Dynamics Approach under Climate Change Impact. *Sustainability*, 14(6), 3376.
- Huanhuan, Q., Baoxiang, Z., Fanhai, M. (2016); System Dynamics Modeling for Sustainable Water Management of a Coastal Area in Shandong Province, China. *Journal of Earth Science and Engineering*, Vol. 4, pp 226-234.
- Khalili, R., Montaseri, H., Motaghi, H., Zali, A. (2021); Evaluation of water supply and demand in Haraz basin with system dynamics model approach (Vensim). *Journal of Environmental Science Studies*, 6(2), 3518-3524.
- Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., 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*, Vol. 573, pp 444-457.
- Marston, L., and Cai, X. (2016); An overview of water reallocation and the barriers to its implementation. *WIREs Water*, Vol. 3, No. 5, pp 658-677.
- Sardo, M. S., and Jalalkamali, N. (2022); A system dynamic approach for a reservoir impact assessment on groundwater aquifer considering climate change scenario. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100754.
- Stokstad, E. (2020); Deep deficit. *Science*, 368(6488), pp 230-233.
- Sun, Y., Liu, N., Shang, J., Zhang, J. (2017); Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, No.2, pp 613-625.

References

References (in Persian)

- Azizi, Qa., Nazif, S., Abbasi, F. (2016); Assessment of performance of Urmia basin dams using system dynamic approach. *Arid Regions Geographic Studies*, Vol. 7, No. 25, pp 48-63 [In Persian].
- Misaghi, A. (2010); Water resources in Basin modeling by using system dynamic (Case Study: Neyshabur basin), Master Thesis in Irrigation and Drainage Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, p 96 [In Persian].
- Misaghi, A., Davari, K., Ghahraman, B., Hashemi Nia, S. M. (2014); Modeling Water Resources in Using the dynamic system method Case study: Nishabur watershed, *Scientific Journal of Agriculture*, Vol. 37, No. 3, pp 83-94 [In Persian].
- Paimozd, Sh. (2021); Simulating Surface Water Allocation and Identifying Systemic Archetype Using Vensim Software: A Case Study of Qorveh Dehgolan's Basin, *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, Vol. 10, No. 31, pp 123-141 [In Persian].
- Sabbaghi, M., Shahnazary, A., Ziaei, A. N. (2017); Simulation and Operation Evaluation of Shahid Yaghoobi Dam by using System Dynamic (Case study: Dam Shahid Yaghoobi), *Journal of Watershed Management Research*, Vol. 8, No.16, pp 188-199 [In Persian].

References (in English)

- Abadi, L., Sadeghi, Kh., Shamsai, A., Goharnejad, H. (2015); An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model, *KSCE Journal of civil engineering*, 19(6), 1941-1949.
- Abdi-Dehkordi, M., Bozorg-Haddad, O., Salavitarab, A., Goharian, E. (2021); Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches *Environ Dev Sustain* 23, 16246–16282.
- Abedzadeh, S., Roozbahani, A., Heidari, A. (2020); Risk assessment of water resources development plans using fuzzy fault tree analysis, *Water Resources Management*, Vol. 34, 2549-2569.
- Amoo, O. T., Nakin, M. D. V., Abayomi, A., Ojubele, H. O., Salami, A.W. (2020); System Dynamics Approach for Evaluating Existing and Future Water Allocation Planning Among Conflicting Users, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 4, No. 3, pp 44-51.
- Asadabadi, E., Asadi, A., Kalantari, K. (2020); Dynamic Modeling of the Groundwater System in Hamedan–Bahar Aquifer, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, Vol. 50, No. 9, 2323-2340.
- Fotookian, M. R., Safari, N., Zarghami, M. (2017); Using System Dynamics Modeling to Develop the Operation Policy for Yamchi Reservoir (Iran) by Applying Optimum Cropping Pattern, *Iran - Water Resources Research*, Vol. 13, No. 3, pp 1-16.
- Gerlak, A. K. and Mukhtarov, F. (2015); 'Ways of knowing' water: Integrated water resources management and water security as complementary discourses, *Int. Environ. Agreements: Politics Law Econ*, Vol. 15, No. 3, pp 257-272.
- Hosseini Baghanam, A., Seifi, A. J., Sheikhababaei, A., Hassanzadeh, Y., Besharat, M., Asadi, E. (2022); Policy-Making toward Integrated Water Resources Management of Zarrine River Basin via System Dynamics Approach under Climate Change Impact. *Sustainability*, 14(6), 3376.
- Huanhuan, Q., Baoxiang, Z., Fanhai, M. (2016); System Dynamics Modeling for Sustainable Water Management of a Coastal Area in Shandong Province, China, *Journal of Earth Science and Engineering*, Vol. 4, pp 226-234.
- Khalili, R., Montaseri, H., Motaghi, H., Zali, A. (2021); Evaluation of water supply and demand in Haraz basin with system dynamics model approach (Vensim), *Journal of Environmental Science Studies*, 6(2), 3518-3524.
- Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., 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*, Vol. 573, pp 444-457.
- Marston, L., and Cai, X. (2016); An overview of water reallocation and the barriers to its implementation, *WIREs Water*, Vol. 3, No. 5, pp 658-677.
- Sardo, M. S., and Jalalkamali, N. (2022); A system dynamic approach for a reservoir impact assessment on groundwater aquifer considering climate change scenario. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100754.
- Stokstad, E. (2020); Deep deficit. *Science*, 368(6488), pp 230–233.
- Sun, Y., Liu, N., Shang, J., Zhang, J. (2017); Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, No.2, pp 613-625.