مجله علمی‌پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان

سال دهم، شماره سی‌ویکم، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۱۲۳ـ۱۴۱

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی تخصیص آب‌های سطحی با استفاده از نرم‌افزار Vensim و شناسایی الگوهای رفتاری (منطقهٔ مطالعاتی: حوضهٔ آبریز قروه دهگلان)

شهلا پایمزد[۱]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۴**

چکیده

کمبود آب‌های سطحی و برداشت مداوم از آن‌ها سبب بحران جدی در اغلب نقاط دنیا شده است. به‌گونه‌ای که در صورت عدم مدیریت صحیح، حتی در برخی مناطق، مواجهه با بیابان‌زایی و خشکی دور از ذهن نخواهد بود. لذا مدل‌سازی تخصیص این منابع به‌خصوص در بخش کشاورزی، مورد توجه محققین بسیاری و نیز تحقیق حاضر شد. شبیه‌سازی تخصیص آب‌های سطحی حوضهٔ قروه دهگلان با استفاده از Vensim و نیز شناسایی الگوهای رفتاری و کاربرد نتایج حاصل از آن در منطقهٔ حاضر انجام شد. مدل‌سازی طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۵در دو مرحله انجام گرفت. صحت نتایج مدل‌سازی در مقیاس سالانه (۱۳۶۹ـــ۱۳۹۰) با توجه به مقادیر RMSE معادل ۰/۱۰ و MAE معادل ۰/۴۰ و نیز آزمون رفتار آن تأیید شد. نتایج با توجه به بازخوردهای موجود در مدل و طبیعی نمودن تمام دبی‌ها و آمار کشاورزی، نشان داد حداکثر برداشت در ایستگاه دهگلان (۲۷/۷۹٪) و حداقل در ایستگاه گلبلاغ (۱۹/۵۳٪) خواهد بود. مدل‌سازی مقیاس ماهانه قبل از فعالیت سدها (تا سال ۱۳۹۰) با مقادیر RMSE معادل ۰/۷۴ و MAE معادل ۰/۳۹ قابل تأیید بود. نتایج با شناسایی الگوهای رفتاری در منطقه پس از فعالیت سدها (پس از سال ۱۳۹۰) نشان داد به‌رغم متوسط کاهش ۷۲ درصدی جریان در منطقه، در بازه‌هایی که احداث سد در آن‌ها صورت گرفته همچون سورال، سنگ سیاه و گلبلاغ یا بازه‌های پایین‌دست همانند حسن خان، به‌ترتیب ۲/۴۰، ۳/۵۶، ۳/۹۳ و ۴/۵ برابر نسبت به متوسط دوره در حداکثر مقدار خود افزایش و به‌طور متوسط نسبت به کل دوره تا ۱۰۰٪ افزایش داشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: الگوهای رفتاری، تخصیص آب، سیستم دینامیک، قروه دهگلان، Vensim.

---

۱. استادیار گروه علوم و مهندسی آب و عضو پژوهشکده آب، دانشگاه اراک، اراک. *نویسنده مسئول:Email:S-Paimozd@araku.ac.ir.

* این مقاله مستخرج از پژوهش مستقل دانشگاه اراک است.

DOI: 10.22052/deej.2021.10.31.61

مقدمه

مدل‌سازی تخصیص سیستم‌های منابع آب در مراجع با دیدگاه‌های مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از بارزترین تفاوت‌ها در مدل‌سازی رویکرد مورد استفاده است که به دو بخش خطی و دینامیک تقسیم می‌شود. مفهوم عبارت خطی در این رویکرد با مفاهیمی مانند برنامه‌ریزی خطی و نظیر آن کاملاً متفاوت است. منظور از عبارت خطی، نگرش معمول در مدل‌سازی‌هاست که با تصوری مکانیکی از وقایع، پدیده‌ها را با روابط علت و معلولی یک‌طرفه توجیه می‌کند. در این روش، ابتدا سیستم به اجزای کوچک‌تر تجزیه شده و هریک به‌طور مجزا مطالعه می‌شود و در نهایت ترکیب نتایج آن‌ها، عملکرد کل سیستم را تعیین می‌کند. در این نوع تفکر، تعامل بین خروجی سیستم و اثرات آن بر روی ورودی و تعاملات ممکن بین آن‌ها به‌طور پویا دیده نمی‌شود؛ درحالی‌که پایش صحیح رفتار سیستم‌ها با در نظر داشتن تعامل بین اجزا و تأثیرات متقابل از طریق روابط علت و معلولی و کنترل آن‌ها صورت می‌گیرد. رابطه‌ای که برخلاف روابط خطی، متغیرهای مورد نظر هم می‌توانند عامل و هم معلول متغیرهای دیگر باشند. به بیان بهتر در چنین تفکری تعاملات و بازخوردها[1] و تأثیر آن‌ها بر رفتار سیستم مشهود گردیده و پیچیدگی‌های درون سیستم به‌وضوح قابل درک هستند (سیمونویچ[2]، ۲۰۰۲). مطابق نظر وید[3] و اسلامیان (۲۰۱۷) سیستم‌ها دارای پنج ویژگی هستند: مرز دارند، از اجزایی تشکیل شده که خصوصیات منحصر به خود را داشته و به روش درون سیستمی با یکدیگر مرتبط هستند، اجزای سیستم به‌طور پویا در تعامل با یکدیگر بوده و با گذر زمان خصوصیات گوناگونی را به یکدیگر انتقال می‌دهند و نیز ویژگی اجزای سیستم طی زمان متحول می‌شوند.

به عقیدهٔ استرمن[4] (۱۹۹۴) و نیز سنگ[5] (۱۹۹۲) سیستم دینامیک یا پویایی سیستم‌ها شاخه‌ای از تفکر سیستمیک است که به ارائهٔ مدل مفهومی و شبیه‌سازی آن بر مبنای این تفکر، برای بررسی و مطالعهٔ رفتار سیستم‌های پیچیده همچون منابع آب می‌پردازد. مطابق تعریف ویلاچس[6] و همکاران (۲۰۰۷) در سیستم‌هایی که پیچیده بوده و دائماً در حال تغییر هستند، ساختار سیستم در طول زمان الگوهای رفتار آن را ایجاد می‌کند. این رفتارها از الگوهای پایه‌ای خاصی پیروی می‌کنند که در پویایی سیستم‌ها تحت عنوان الگوهای سیستمیک[7] نامیده می‌شوند. این الگوها نمونه‌هایی از روابط علت و معلولی معمول هستند که در اکثر موارد به‌طور مشابه تکرار می‌شوند. الگوهای سیستمی یا همان ساختارهایی که توسط الگوها به نمایش درمی‌آیند، ابزار کلیدی در درک و تجزیه‌تحلیل بسیاری از رفتارها هستند و شناخت و درک آن‌ها سادگی دل‌پذیری را در پس مشکلات پیچیدهٔ مدیریت به دست می‌دهد (پایمزد و همکاران، ۲۰۱۱). این مسئله سبب شده است محققان در بررسی سیستم‌های منابع آب در کنار تفکر خطی، از تفکر سیستمی و ابزار مورد استفادهٔ آن که نرم‌افزارهایی چون ونسیم[8] هستند، بهره بگیرند.

مدیریت منابع آب با نگرش سیستمیک در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ برای اولین بار توسط سیمونویچ و بندر[9] (۱۹۹۶) مورد توجه قرار گرفت. برنامه‌ریزی برای شرایط آتی حوضهٔ رودخانهٔ زرد در چین با استفاده از سیستم دینامیک توسط ایکسیو[10] و همکاران (۲۰۰۲) به انجام رسید. در مدل تخصیص توسعه‌یافته برای این تحقیق، ۳ بخش کشاورزی، صنعت و شرب مورد بررسی قرار گرفت و در آن مواردی مانند نرخ رشد جمعیت، سطوح زیر کشت، تولیدات صنعتی و نرخ کاهش تقاضای آبیاری به جهت افزایش راندمان و کاهش تقاضا در بخش صنعت شبیه‌سازی شد. استخراج شاخص پایداری[11]، برای تمام زیرحوضه‌ها حاکی از آن است که چهار زیر حوضهٔ طی سال‌های آتی در معرض ناپایداری منابع آب قرار خواهند گرفت. پروژهٔ آناتولی جنوب شرقی یک پروژهٔ توسعه یکپارچه در ترکیه است. این پروژه شامل ساخت ۲۱ سد و ۱۹ نیروگاه

1. Feed back
2. Simonovic
3. Wade
4. Sterman
5. Seng
6. Vlachos
7. System Archetypes
8. Vensim
9. Simonovic and bender
10. Xu
11. Sustainability Index

برقابی است. در تحقیقی که توسط سایسل[1] و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد، مشکلات زیست‌محیطی درازمدت این پروژه در ارتباط با استفاده از منابع آب در بخش شهری و کشاورزی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی شد. هدف مدل برنامه‌ریزی سیاست‌هایی است که در به‌دست‌آوردن پایداری زیست محیطی و اجتماعی بلندمدت مؤثر هستند. نتایج حاصل از سیستم شبیه‌سازی نشان می‌دهد آزمون سیاست‌ها اصلاحات مهمی نه‌فقط در رفتار اجزای خاص مورد هدف، بلکه سیستم به‌صورت کلی ایجاد خواهد کرد. تخصیص آب لاس وگاس آمریکا با استفاده از رویکرد دینامیک توسط استاو[2] (۲۰۰۳) شبیه‌سازی شد. در این تحقیق، مقایسهٔ مقدار تقاضا و ذخایر در منطقه نشان داده است که میزان تقاضا تا افق ۲۰۵۰ حدود ۲۶٪ از مقدار قابل تأمین نسبت به شرایط فعلی بیشتر خواهد شد. اورمسبی و الشوربگی[3] (۲۰۰۶) هفت گزینه را در انتخاب یک مدل موفق آبی ارائه دادند. به‌عقیدهٔ آن‌ها هر سیستم منابع آبی باید در یک محیط ساده تعریف شود، متکی به داده‌های ساده و قابل دسترس باشد، دینامیک بوده و قابلیت نشان دادن توابع خطی و غیر خطی را دارا باشد، توانایی تصویر مکانیسم بازخورد بین متغیرهای مختلف را داشته، به‌سادگی شبیه‌سازی شود و قابلیت آزمون سناریوهای جدید را داشته باشد. در این تحقیق، میزان آلودگی جریان در پایین‌دست شش زیرحوضه با تخصیص آب به مصارف گوناگون شبیه‌سازی شد. مقایسهٔ سناریوها نشان داد که طی سال‌های پرآب، هرچند مقدار آلودگی افزایش یافته، تعداد روزهایی که جریان آلوده است، کمتر اعلام شده و این بدین دلیل است که افزایش جریان سبب ترقیق بیشتر و تمرکز کمتر آلودگی می‌شوند. ناصری و همکاران (۲۰۱۰) به‌منظور مدیریت بهینهٔ بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب در پایاب سد شهر چای ارومیه، مدل پویایی سیستم توسط نرم‌افزار ونسیم طراحی شد. در این تحقیق، پارامترهای تأثیرگذار بر نوسان آب سطحی و زیرزمینی و همچنین برهم‌کنش عرضه و تقاضای آب شرب، صنعت و کشاورزی از هر دو منبع آب در محدودهٔ مورد مطالعه شناسایی شد. پس از واسنجی، نتایج اجرای مدل برای چهار سال آینده نشان داد که تأمین کل نیاز آب شرب و صنعت از مخزن سد امکان‌پذیر نیست. در تحقیقی دیگر، ضرغامی و اکبریه (۲۰۱۲) به مدیریت آب شهری تبریز پرداخته و در این مطالعه، سیستم آب شهری تبریز با استفاده از رویکرد پویایی سیستم تا سال ۲۰۲۰ مدل‌سازی شد. تأمین منابع از آب زیرزمینی، فاضلاب تصفیه‌شده و انتقال آب بین حوضه در نظر گرفته شد و در نهایت، انتقال آب و مدیریت تقاضا مد نظر قرار گرفت.

ظرفیت حمل منابع آب[4]، به‌عنوان تفاوت بین کل تأمین آب و تقاضا معیار مهمی برای توسعهٔ پایدار منطقه‌ای در چین توسط هوآن هوآن[5] و همکاران (۲۰۱۲) تعریف شده است. در این مطالعه با استفاده از سیستم دینامیک، سناریوهای مختلف استفاده از آب ارزیابی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، آنچه به‌احتمال زیاد می‌تواند بدون تأکید بیش از حد در تأمین آب، رشد اقتصادی را حفظ کند، رشد متوسط همراه با بازیافت فاضلاب است. تأمین آب شرب سنگاپور تحقیق دیگری است که با استفاده از سیستم دینامیک توسط اکسی و پوها[6] (۲۰۱۳) انجام شد. در این منطقه، استفادهٔ بیش از حد آب‌های زیرزمینی با توجه به رشد بیش از دوبرابری جمعیت طی سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ سبب بحران شدید در منابع آب خواهد شد. شبیه‌سازی نشان داد این بحران به‌حدی است که با روند کنونی این منطقه اجبار به تهیهٔ آب از سال ۲۰۳۰ خواهد شد. در تحقیق اعلمی و همکاران (۲۰۱۴)، اثرات سد مخزنی گلک در تأمین نیازهای منطقه و همچنین تغذیهٔ آبخوان آبرفتی دشت پایین‌دست بررسی شد. مطالعهٔ نتایج پس از محاسبهٔ درصد تأمین حجمی نیازهای مختلف و منبع تأمین آن‌ها، حاکی از آن است که با احداث سد تغذیه‌ای گلک و با تأمین صددرصد نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی از طریق منابع آب زیرزمینی، می‌توان بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه را به ۰/۵۷ رساند که این در نتیجه، تزریق سالانه ۲ میلیون مترمکعب از طریق پخش سیلاب است. در تحقیق دیگری که در کرهٔ جنوبی توسط پارک[7] و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد، تعیین سرمایه‌گذاری با استفاده از حلقه‌های

1. Saysel
2. Stave
3. Ormsbee and Elshorbagy
4. WRCC
5. Huanhuan
6. Xi and Poha
7. Park

علی و معلولی برای حفظ منابع آب شهری و محاسبهٔ حجم آب ورودی و خروجی در محیط ونسیم انجام شد. شبیه‌سازی نشان داد توسعهٔ یک منبع جایگزین برای آبرسانی در سیستم توزیع شهری باید استفاده شود. سلطانی و علیزاده (۲۰۱۷) با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها یک مدل جامع و پویا برای ارزیابی سیاست‌های مدیریتی مختلف و کمک به تصمیم‌سازی در سطوح کلان مدیریت منابع آب توسعه دادند. مدل ارائه‌شده با استفاده از اطلاعات اقلیمی و هیدرولوژیکی بلندمدت محدودهٔ مطالعاتی ورامین واسنجی و صحت‌سنجی و با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر است متغیرها را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند. در تحقیق فتوکیان و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد سد یامچی را با اعمال سیاست مدیریتی الگوی کشت بهینه در مدل پویایی سیستم و بر اساس سه شاخص آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که اعمال سیاست الگوی کشت بهینهٔ پیشنهادی سبب کاهش مصرف آب بخش کشاورزی در منطقهٔ مورد مطالعه می‌شود و در نتیجه موجب کاهش کمبود کلی آب، در حدود ۴۳٪ خواهد شد. شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا و تأثیر استفاده از سناریوهای مختلف از جمله سناریوهای خشکسالی، مدیریت تأمین آب و رشد جمعیت، تحقیق دیگری است که توسط تیموری و همکاران (۲۰۱۸) با دیدگاه دینامیکی صورت گرفته است. در این تحقیق، رفتار متغیرهای حجم منابع آب و سرانهٔ آب تجدیدپذیر استان خراسان جنوبی توسط نرم‌افزار ونسیم طی دورهٔ ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ نشان داد که خشکسالی‌ها تأثیر منفی بر حجم آب تجدیدپذیر استان داشته و همراه با رشد جمعیت باعث کاهش سرانهٔ آب تجدیدپذیر استان شده‌اند. کدخداحسینی و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعهٔ تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداختند؛ به این ترتیب همهٔ عوامل تأثیرگذار بر حجم آب موجود در سد و همچنین برهم‌کنش عرضه و تقاضای آب شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی در محیط برنامه‌نویسی ونسیم مدل‌سازی شد و نتایج نشان داد که در بهینه‌ترین سناریو، این سد توانایی تأمین آب ۴۳۰۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی پایین‌دست را دارد. براتی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از نرم‌افزار ونسیم به تعیین الگوی کشت مطلوب برای دشت کرمانشاه پرداختند. در این تحقیق، حداکثر سود و حداقل برداشت از آب‌های زیرزمینی مد نظر قرار گرفته است. نتایج نشان داد که نسبت سود به‌دست‌آمده به مقدار آب استخراج‌شده از چاه ها در شرایط بهینه‌شده تحت سناریوهای تعریف‌شده بیشتر بوده است. پویایی تقاضای آب در آفریقای جنوبی تحقیق دیگری است که توسط آمو[1] و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد. در این تحقیق، چهار سناریو با استفاده از سیستم دینامیک مورد بررسی قرار گرفت و برای ارزیابی سناریوها از شاخص پایداری استفاده شد. در بهترین شرایط شاخص پایداری با مقدار ۲۵٪ سناریوی ۷۰٪ تخصیص آب را بهترین گزینه معرفی می‌کند و این تحت شرایطی است که راندمان آبیاری بهبود داده شود و بارندگی بیشتر از ۱۰٪ تغییر نداشته باشد. در تحقیق دیگری، یو آن[2] و همکاران (۲۰۲۱) به پویایی تخصیص آب با دیدگاه اقتصادی زیست‌محیطی در حوضهٔ رودخانه ژانگ تحت شرایط کمبود آب پرداختند. برای عدم بی‌ثباتی در منطقه و نیز حل اختلاف بالادست و پایین‌دست در بهترین شرایط تخصیص بیشترین مقدار آب به پایین‌دست حوضه و به‌خصوص شهر آنیانگ بهترین گزینه معرفی شد.

از آنجا که در تحقیقات فوق از سیستم دینامیک به‌عنوان ابزاری کارآمد در بحث منابع آب و نیز تخصیص یاد شده است، در این تحقیق نیز چنین رویکردی مورد استفاده قرار گرفته است. آنچه در اغلب تحقیقات به چشم می‌خورد، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم بوده و کمتر تحقیقی به بررسی الگوهای رفتاری و علت پدید آمدن آن پرداخته است. شناسایی الگوهای رفتاری و به‌کاربردن آن در شبیه‌سازی مجدد در هیچ‌یک از تحقیقات به‌عنوان ابزاری برای تشخیص حل مشکل دیده نشده است. در این تحقیق، شبیه‌سازی تخصیص منابع آب‌های سطحی قروه دهگلان به کشاورزی با دیدگاه دینامیکی و بررسی الگوهای رفتاری در دو مقیاس سالانه و

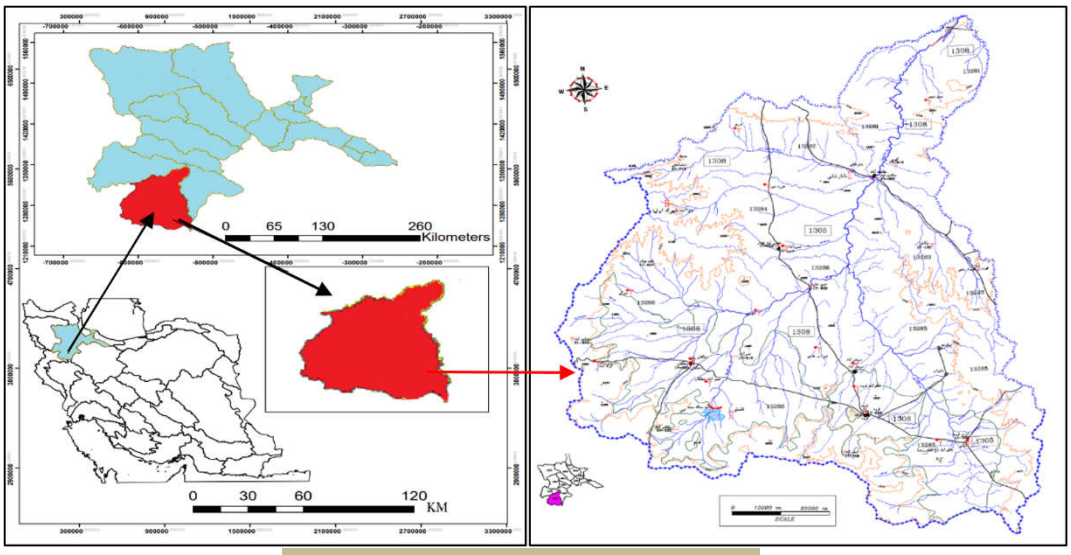
1. Amoo
2. Yuan

ماهانه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ انجام شده و نتایج حاصل از فعالیت‌های الگوهای رفتاری در شبیه‌سازی وارد شده است. شایان ذکر است مصرف شرب و صنعت و بخشی از کشاورزی از آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز سفیدرود پس از حوضهٔ دریاچهٔ نمک از نظر اراضی قابل آبیاری بزرگ‌ترین حوزهٔ آبریز کشور است. این حوزهٔ آبریز از دو سرشاخهٔ اصلی به نام‌های رودخانهٔ قزل اوزن و رودخانهٔ شاهرود سرچشمه می‌گیرد که در محل سد سفیدرود به هم پیوسته و رودخانهٔ سفیدرود را تشکیل می‌دهند. منطقهٔ مورد بررسی، محدودهٔ مطالعاتی قروه دهگلان از سرشاخه‌های رودخانهٔ قزل اوزن و در واقع حوزهٔ آبریز سفیدرود است. محدودهٔ مطالعاتی قروه دهگلان با وسعت ۷۲۳۶/۶ کیلومتر مربع با متوسط بارندگی سالانه ۳۵۲ میلی‌متر و اقلیم نیمه‌مرطوب و سرد در جنوب حوضهٔ آبریز سفیدرود واقع شده است. طی سال‌های اخیر، مطالعات و اجرای سد در این حوضه با سرعت زیادی در حال انجام است. از آنجا که ذی‌نفعان در بالادست تأکید زیادی بر اجرا و بهره‌برداری از طرح‌های آبی دارند، شبیه‌سازی و بررسی الگوهای رفتاری منابع آب‌های سطحی سرشاخهٔ بالادستی تلوار، واقع در حوضهٔ قروه دهگلان (شکل ۱)، مورد توجه قرار گرفت. آمار و اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق شامل مقادیر دبی و بارش ماهانه، محصولات زراعی، سطوح زیر کشت و نیاز آبی آن‌ها و راندمان آبیاری است. در این منطقه، ۸ ایستگاه هیدرومتری واقع شده که بر روی رودخانه‌های تلوار، چم شور و اوزون دره واقع شده‌اند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول (۱) آمده است.



شکل (۱): موقعیت قروه دهگلان در حوضهٔ آبریز سفیدرود

Figure (1): Location of Qorveh Dehgolan in Sefidrood catchment

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقهٔ مطالعاتی

Table (1): Characteristics of hydrometric stations in the study area

نام ایستگاه	سورال	سنگ سیاه	دهگلان	حسن خان	پای پل دلبران	شادی‌آباد	گلبلاغ	سلامت‌آباد
ارتفاع جغرافیایی (متر)	۱۸۰۰	۱۸۳۰	۱۸۸۰	۱۷۰۰	۱۷۷۰	۱۶۸۵	۱۶۷۰	۱۶۵۰
طول جغرافیایی (درجه)	۴۷/۴۲	۴۷/۴۳	۴۷/۴۲	۴۷/۶۸	۴۷/۶۰	۴۷/۷۷	۴۷/۸۱	۴۷/۹۰
عرض جغرافیایی (درجه)	۳۵/۲۸	۳۵/۱۸	۳۵/۲۸	۳۵/۴۳	۳۵/۲۰	۳۵/۴۷	۳۵/۶۲	۳۵/۸۵

مدل ونسیم

به‌عقیدهٔ سیمونویچ[1] (۲۰۰۲) پویایی سیستم‌ها شاخه‌ای از تفکر سیستمیک است که به مطالعهٔ رفتار دینامیک سیستم‌های پیچیده همچون سیستم‌های منابع آب می‌پردازد. درون این سیستم‌ها فرایندی است به نام بازخورد که تغییر در یک جزء را به سایر اجزای دیگر سیستم هشدار می‌دهد و در واقع بر روی اجزای اصلی سیستم اثر می‌گذارد (اسمیت و ایکر[2]، ۱۹۹۷). بازخوردها توسط ابزارهای نموداری بازنمایی و در قالب معادلات شبیه‌سازی سیستم، به‌صورت ریاضی نمادسازی و در نهایت مدل‌سازی صورت می‌گیرد. یکی از این مدل‌ها ونسیم است. این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود رفتار سیستم را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد؛ به‌طوری که بعد از اجرای مدل، رفتار تک‌تک متغیرهای موجود به‌صورت نمودارها و جداولی قابل ارائه شده‌اند. ونسیم با استفاده از نمودار حالت جریان (و همچنین بازخوردها) به بررسی وقایع درون سیستم می‌پردازد. متغیرهای جریان[3] که نسبت به زمان تغییر می‌کند و متغیرهای حالت[4] که در هر لحظه از زمان مقدار دارند. مدل ونسیم از متغیرهای حالت و جریان استفاده می‌کند، اما تصمیمات مورد نظر توسط کاربر با استفاده از معادلات نوشته و پردازش می‌شود. بازخوردهای درون سیستم منجر به تولید حلقه‌هایی به نام حلقه‌های علی و معلولی می‌شوند که ترکیب آن‌ها می‌توانند الگوهای رفتاری را ایجاد کنند که هریک تعاریف و معانی خاص خود را دارند و در نهایت منجر به تشدید، تضعیف و یا تعادل یک پدیده درون سیستم مورد نظر خواهند شد.

در این تحقیق، شبیه‌سازی تخصیص منابع آب‌های سطحی قروه دهگلان در دو مقیاس سالانه و سپس ماهانه با استفاده از آمار و اطلاعات اشاره‌شده و نرم‌افزار ونسیم انجام شد. از آنجا که سدهای موجود در منطقه از سال ۱۳۹۰ شروع به فعالیت کرده‌اند، شبیه‌سازی از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۵ طی دو دوره، در دو مقیاس انجام گرفته است. پس از بررسی فعالیت سدها، شناسایی الگوهای رفتاری منطبق بر تغییر رفتار ذی‌نفعان در بالادست و پایین‌دست سیستم منابع آب سطحی منطقهٔ مورد نظر قرار گرفت. شناسایی چنین رفتارهایی، پشتیبانی مفیدی برای راهبردهایی در چگونگی ادامهٔ راه خواهد بود. در ادامه هریک از مراحل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن به تفکیک آمده است.

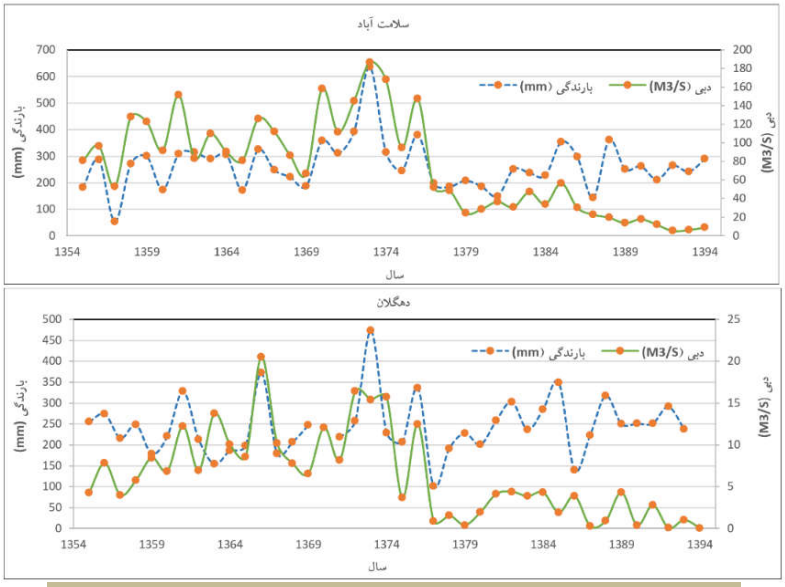
نتایج

اجرای مدل در مقیاس سالانه

در منطقهٔ مورد مطالعه، تأمین آب شرب و صنعت و بخشی از مصرف کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. لذا تعیین مقدار مصرف آب‌های سطحی، توسط بخش کشاورزی مد نظر قرار گرفت. در این بخش، با توجه به آمار و اطلاعات دریافتی ابتدا شبیه‌سازی مدل در مقیاس سالانه و پس از اطمینان از صحت مدل، در مرحلهٔ بعد اجرای مدل در مقیاس ماهانه انجام گرفت. برای بررسی دقیق‌تر، محدودهٔ مورد مطالعه، به تعدادی بازه تقسیم شد که هر بازه بین دو ایستگاه هیدرومتری قرار دارد. پس از بررسی صحت داده‌ها، روند داده‌های دبی نشان از کاهش خروجی ایستگاه‌های مورد مطالعه طی سال‌های اخیر داشت. لذا لازم بود روند داده‌های بارش در هر بازه و دبی خروجی از هر بازه مورد بررسی قرار گیرد تا اطمینان حاصل گردد. افت سطح آب خروجی از هر بازه به‌دلیل کمبود بارش نیست. برای نمونه، همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود دبی‌ها در ایستگاه‌های دهگلان و سلامت‌آباد به‌رغم عدم وجود روند کاهشی بارندگی، کاهش داشته‌اند. در این بخش، همچنین برای بررسی دقیق‌تر، لازم بود آمار طبیعی‌شدهٔ دبی ایستگاه‌ها برآورد گردد تا میزان ورودی از بازه‌های میانی نیز محاسبه شود. مطابق تحقیقات قدوسی و همکاران (۲۰۱۳) طبیعی‌سازی جریان ماهانهٔ تمامی ایستگاه‌های منطقه با استفاده از روش مبتنی بر شیب خط روند (روش وزارت نیرو) انجام و دبی بازه‌های میانی نیز استخراج شد. در مقیاس سالانه، در هر بازه میزان مصرف کشاورزی با استفاده از آمار سطوح زیر کشت، نوع کشت (تمام محصولات اعم از گندم، جو، صیفی‌جات و...) و نیاز آبی به تفکیک

1. Simonovich
2. Smith & Ackere
3. Flow
4. Level

محصولات در هر ماه و نیز راندمان آبیاری (گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، ۲۰۱۱) محاسبه شد. در این مرحله، برای تعیین میزان درصد تخصیص از آب‌های سطحی به کشاورزی، از بازخوردهای ایستگاه‌های هیدرومتری خروجی از هر بازه به بخش کشاورزی مدل استفاده شد. در شبیه‌سازی با استفاده از ونسیم، تصمیمات مورد نظر توسط کاربر با استفاده از معادلات نوشته و پردازش می‌شود. لذا بازخوردی از ایستگاه خروجی هر بازه به بالادست و مقایسهٔ آن با خروجی مدل در نظر گرفته شد. در این مرحله با داشتن ورودی‌ها، نیاز آبی، راندمان سطح زیر کشت به گونه‌ای در نظر گرفته شد که مقادیر محاسباتی و مشاهداتی خروجی هر بازه حداقل اختلاف را داشته باشند. در ابتدای محاسبات، درصد برداشت از آب‌های سطحی، مطابق نیاز آبی گیاهان منطقه در نظر گرفته شد و در نهایت با توجه به حقابهٔ پایین‌دست (خروجی مشاهداتی) و آمار اشاره‌شده، درصد برداشت از آب‌های سطحی مشخص شد. قابل توجه است که جریان برگشتی در هر بازه معادل ۱۰٪ مصارف است (گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، ۲۰۱۱). شکل (۳) شبیه‌سازی مدل در مقیاس سالانه (۱۳۹۰ـ۱۳۶۹) را نمایش می‌دهد. چینش متغیرها در مدل، به‌ترتیب از بالادست (ایستگاه سورال) تا پایین‌دست (ایستگاه سلامت‌آباد) به‌گونه‌ای است که در منطقه نیز واقع شده‌اند. شبیه‌سازی مرحلهٔ اول (مقیاس سالانه و از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰) انجام و به‌منظور ارزیابی مدل از معیارهای متداول آماری همچون جذر میانگین مربعات خطا[1] (RMSE) و میانگین خطای مطلق[2] (MAE) جهت آزمون رفتار، و نیز آزمون حدی استفاده شده است. جدول (۲) این مقادیر را در ایستگاه‌های منطقه نشان می‌دهد. مقادیر معیارهای خطا، نشان‌دهندهٔ صحت و کارایی مدل در شبیه‌سازی دبی خروجی و تخصیص آب کشاورزی قروه دهگلان است.



شکل (۲): مقایسهٔ مقادیر دبی و بارندگی سالانه در ایستگاه‌های دهگلان و سلامت‌آباد

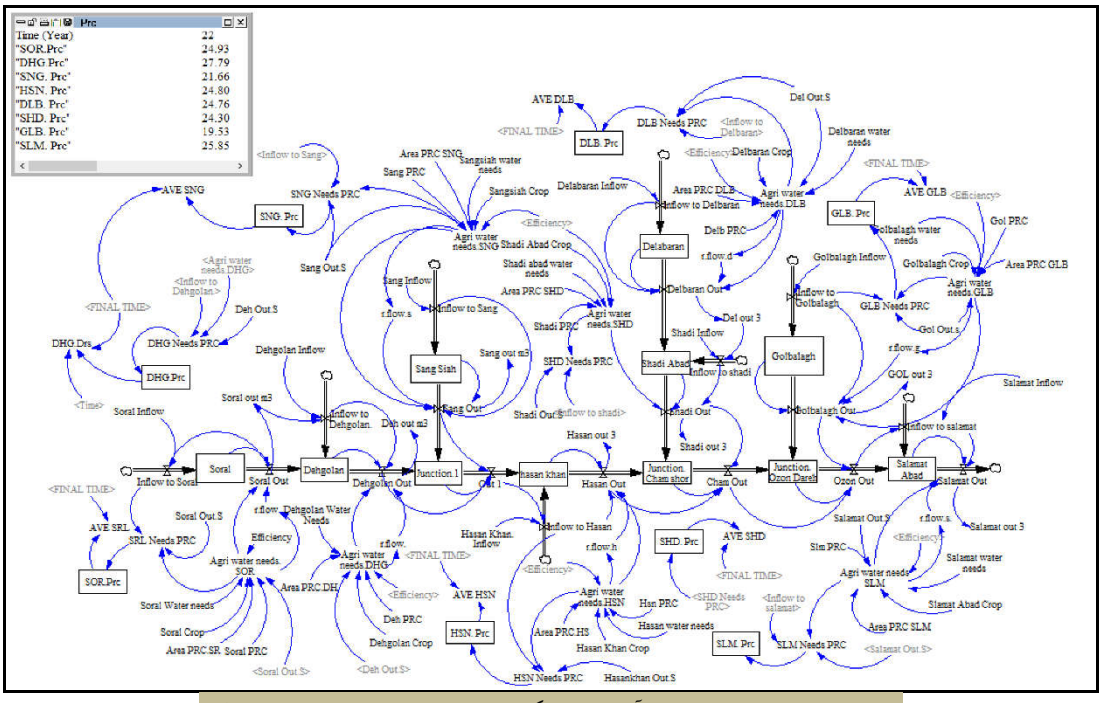
Figure (2): Comparison of annual rainfall and discharge in Dehgolan and Salamatabad stations

جدول (۲): معیارهای خطا حاصل از شبیه‌سازی دبی مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده در مقیاس سالانه

Table (2): Error criteria from simulated discharge and modeled on annual scale

ایستگاه	سورال	دهگلان	سنگ سیاه	حسن خان	دلبران	شادی‌آباد	گلبلاغ	سلامت‌آباد
RMSE	۰/۰۲۲	۰/۰۵۶	۰/۰۴۱	۰/۰۳۷	۰/۰۳۶	۰/۰۷۸	۰/۰۲۶	۰/۵۲۰
MAE	۰/۰۰۸	۰/۰۴۵	۰/۰۳۱	۰/۲۷۰	۰/۰۲۴	۰/۰۵۱	۰/۰۱۹۷	۰/۴۰۴

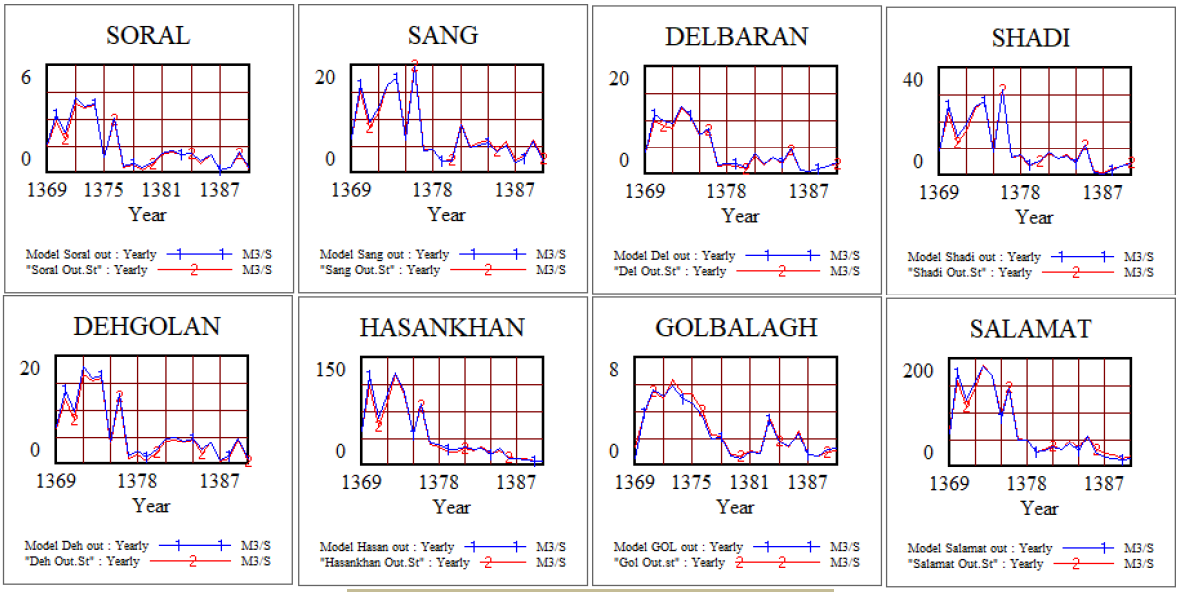
1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Error



شکل (۳): شبیه‌سازی تخصیص آب قروه دهگلان با استفاده از ونسیم در مقیاس سالانه

Figure (3): Simulation of Dehgolan Qorveh water allocation using Vensim on annual scale

علاوه بر مقادیر معیارهای خطا در جدول (۲) که نشان‌دهندهٔ صحت مدل می‌باشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و مقایسه داده‌های محاسباتی (Model) و مشاهداتی (St) در خروجی هر بازه در شکل (۴) نیز نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، خروجی‌ها در تمام ایستگاه‌ها، تطابق کافی با مقادیر مشاهداتی نشان داده و طی سال‌های اخیر مقادیر دبی کاهش چشمگیری داشته است. در شکل (۳) مقادیر نهایی درصد برداشت از آب‌های سطحی توسط بخش کشاورزی نیز نشان داده شده است. جدول (۳) این مقادیر را که برای شروع شبیه‌سازی در مقیاس ماهانه مورد استفاده قرار گرفته است، نشان می‌دهد. در این بخش، با فرض موجود بودن جریان رودخانه، سطح زیر کشت و نیاز آبی گیاهان (گزارش سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، ۲۰۱۷) متوسط درصد برداشت مطابق با نیاز آبی گیاهان، محاسبه شده است. همچنین متوسط درصد برداشت محاسباتی با توجه به میزان جریان موجود در رودخانه محاسبه شده است.



شکل (۴): نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در مقیاس سالانه

Figure (4): Results of model simulation on annual scale

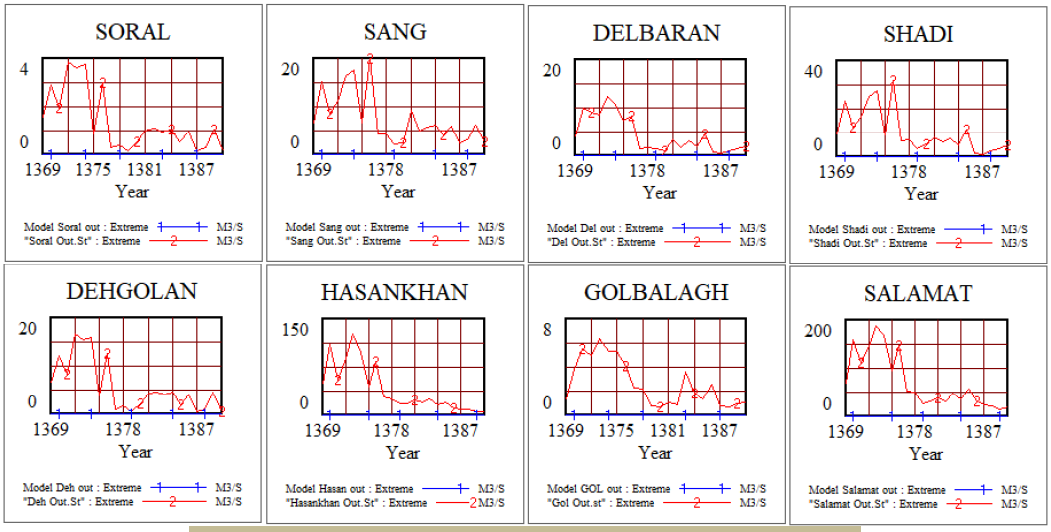
جدول (۳): مقادیر متوسط درصد برداشت از آب‌های سطحی توسط بخش کشاورزی طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰

Table (3): Average percentages of surface water abstraction by the agriculture during 1986 to 2011

ایستگاه	سورال	دهگلان	سنگ سیاه	حسن خان	دلبران	شادی‌آباد	گلبلاغ	سلامت‌آباد
متوسط درصد برداشت مطابق با نیاز آبی گیاهان	۵۲/۰۰	۴۶/۰۰	۴۲/۰۰	۵۵/۰۰	۴۵/۰۰	۴۲/۰۰	۵۰/۰۰	۵۱/۰۰
متوسط درصد برداشت محاسباتی	۲۴/۹۳	۲۷/۷۹	۲۱/۶۶	۲۴/۸۰	۲۴/۷۶	۲۴/۳۰	۱۹/۵۳	۲۵/۸۵

آزمون شرایط حدی

در شبیه سازی‌های سیستم دینامیکی علاوه بر صحت‌سنجی که در بخش قبل نیز تأیید شد، آزمون شرایط حدی نیز که از جمله آزمون‌های صحت سنجی است، برای اطمینان از نتایج تأکید شده است (پایمزد و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق حاضر نیز علاوه بر تطابق مقادیر دبی سالانه خروجی از هر ایستگاه در محدودهٔ مطالعاتی با استفاده از معیارهای خطا و صحت مدل (آزمون رفتار)، آزمون شرایط حدی نیز برای اطمینان بیشتر انجام شد. در این آزمون، مقادیر ورودی حداقل (صفر) در تمام ایستگاه‌ها به مدل وارد شده و رفتار خروجی مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵) خروجی مدل را تحت شرایط حدی نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی حاصل از آزمون شرایط حدی، مقادیر خروجی صفر در ایستگاه‌های منطقهٔ مطالعاتی بوده است.



شکل(۵): نتایج حاصل از اجرای آزمون شرایط حدی در ایستگاه‌های قروه دهگلان

Figure (5): Results of limit conditions test in Qorveh Dehgolan stations

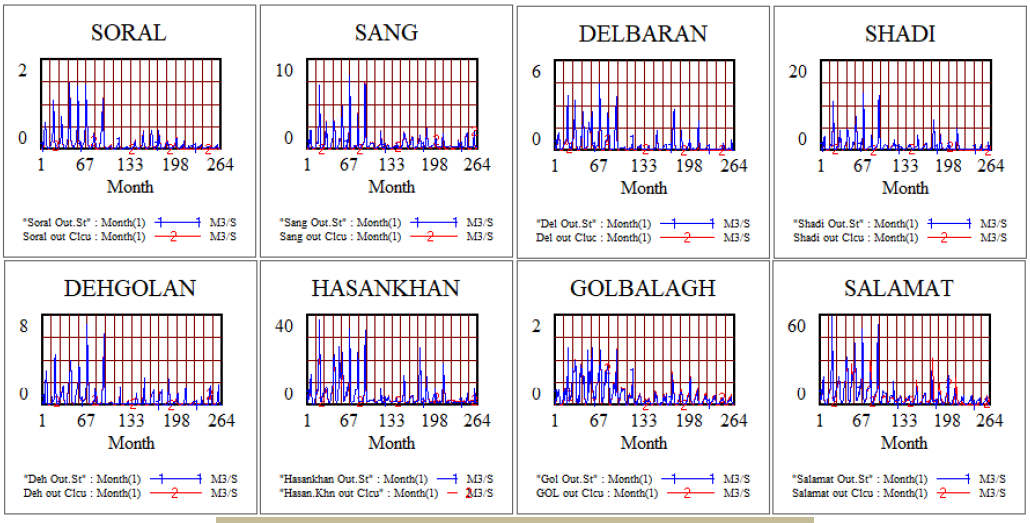
اجرای مدل در مقیاس ماهانه قبل از فعالیت سدها

در این بخش شبیه‌سازی در مقیاس ماهانه از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰ و به‌گونه‌ای صورت گرفته است که تمام محصولات به ریز نوع محصولات، نیاز آبی و سطح زیر کشت وارد مدل شده‌اند. همانند مرحلهٔ قبل، دبی‌های طبیعی‌شده در مقیاس ماهانه با استفاده از روش وزارت نیرو محاسبه شده است (قدوسی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین مقادیر دبی در سرشاخه‌ها و بازه‌های میانی نیز محاسبه شده‌اند. راندمان آبیاری همانند بخش قبل ۳۷٪ و جریان برگشتی به انتهای آخرین بازه وارد می‌شود. معیارهای خطا و نتایج حاصل از خروجی این مدل به‌ترتیب در جدول (۴) و شکل (۶) نشان‌دهندهٔ کارایی بالای مدل در مقیاس ماهانه است.

جدول (۴): معیارهای خطا حاصل از شبیه‌سازی دبی مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده در مقیاس ماهانه

Table (4): Error criteria obtained from observational flow simulations and modeled on monthly scale

ایستگاه	سورال	دهگلان	سنگ سیاه	حسن خان	دلبران	شادی‌آباد	گلبلاغ	سلامت‌آباد
RMSE	۰/۰۲۳	۰/۰۹۶	۱/۴۰۴	۱/۱۵۴	۰/۱۰۵	۰/۰۵۸	۰/۰۳۳	۳/۰۹۴
MAE	۰/۰۱۷	۰/۰۵۶	۰/۰۷۸	۰/۶۴۰	۰/۰۴۵	۰/۰۶۵	۰/۰۲۷	۱/۵۹۶



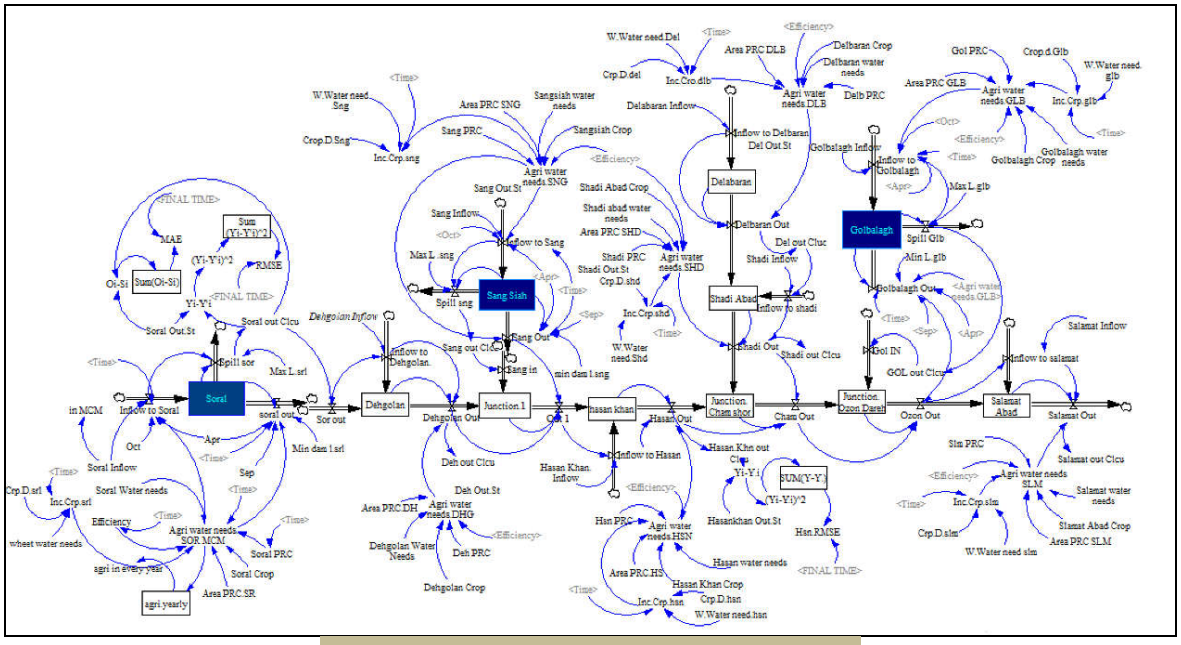
شکل (۶): نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در مقیاس ماهانه تا سال ۱۳۹۰

Figure (6): Results from model simulation on monthly scale until 2011

اجرای مدل در مقیاس ماهانه پس از فعالیت سدها

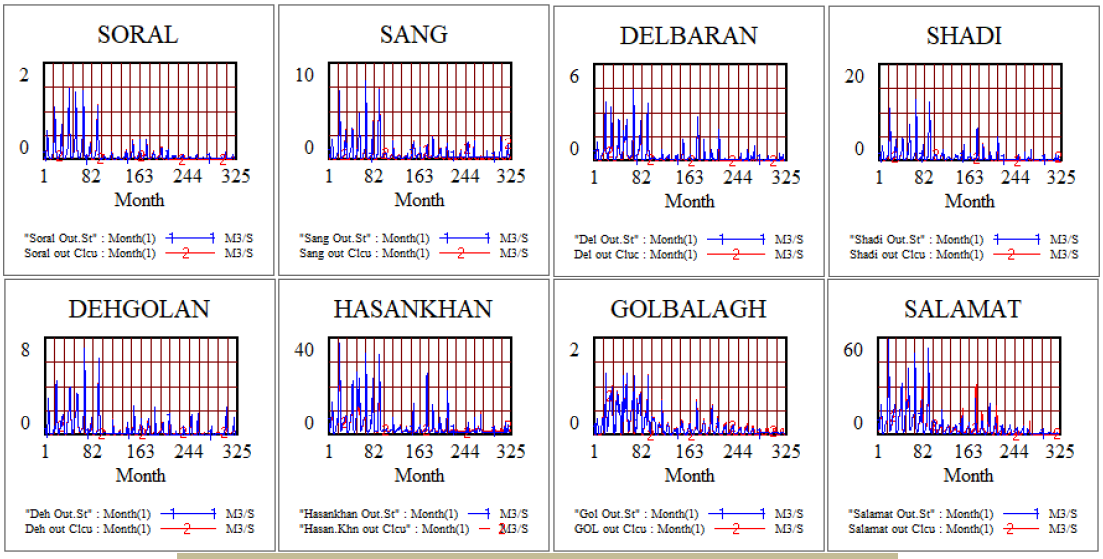
از آنجا که در این منطقه طی سال‌های منتهی به ۱۳۹۰ سدها شروع به فعایت کرده‌اند، در این مرحله برداشت‌ها تا سال ۱۳۹۰ بدون در نظر گرفتن سد و پس از آن (تا سال ۱۳۹۵) با فعالیت سدها در نظر گرفته شدند. طی شبیه‌سازی سدهای سورال، سنگ سیاه و گلبلاغ (به‌ترتیب با احجام ۱۱، ۳۳ و ۵/۷ میلیون مترمکعب) به مدل اضافه شده‌اند و در بازه‌هایی که سد احداث شده است، برداشت‌ها طی ۶ ماه اول هر سال آبی از رودخانه و ۶ ماه دوم، کاملاً از سد صورت گرفته است.

دبی‌های طبیعی‌شده در مقیاس ماهانه در سرشاخه‌ها و بازه‌های میانی محاسبه و به مدل وارد شده‌اند. راندمان آبیاری نیز مطابق تحقیقات صورت‌گرفته در این منطقه، در بازه‌هایی که احداث سد صورت گرفته است پس از احداث سد، ۴۵٪ و در دیگر بازه‌ها، در کل دوره شبیه‌سازی، ۳۷٪ در نظر گرفته شده است (مطالعات بهنگام‌سازی بیلان منابع آب، ۲۰۱۱). شکل (۷) مدل‌سازی و شکل (۸) خروجی مدل تا سال ۱۳۹۵ را به‌صورت ماهانه نمایش می‌دهد.



شکل (۷): شبیه‌سازی مدل در مقیاس ماهانه با در نظر گرفتن سدها

Figure (7): Simulation of model on a monthly scale considering dams

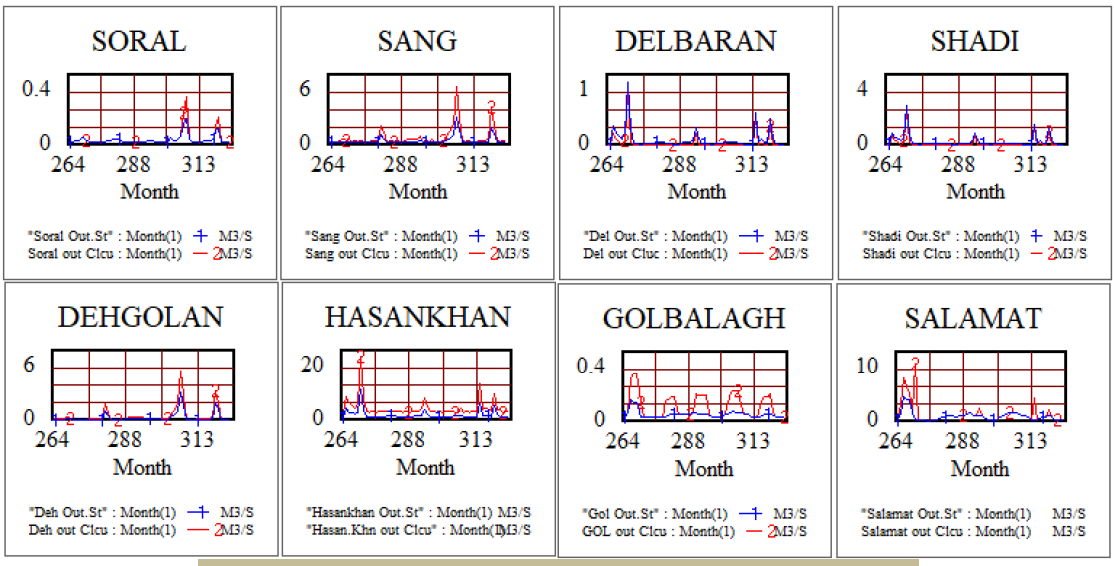


شکل (۸): نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در مقیاس ماهانه طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۵

Figure (8): Results of model simulation on a monthly scale during the 1986 to 2016

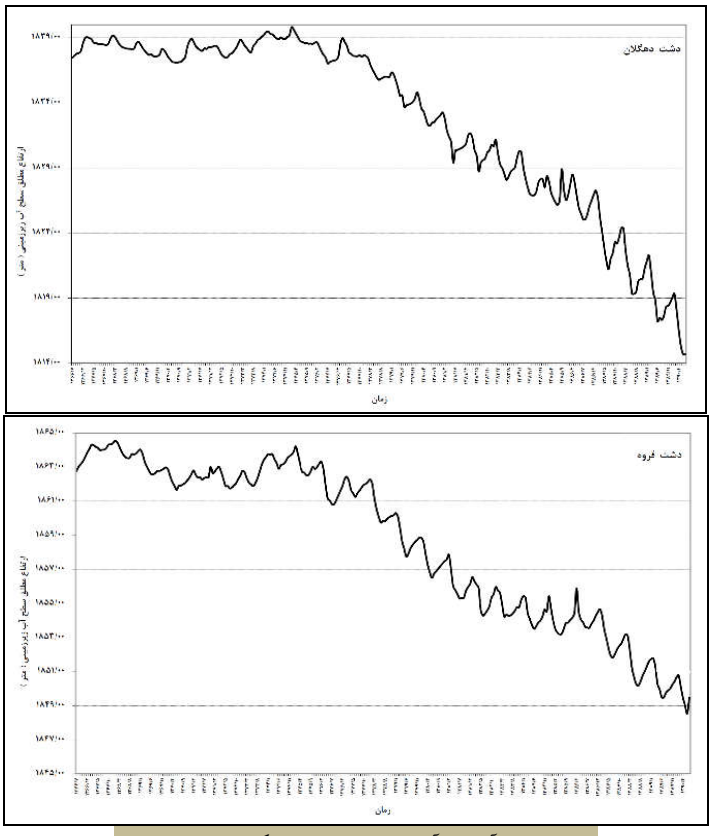
نکته‌ای که در این اشکال به چشم می‌خورد، تفاوت دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی در طول دورهٔ ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ می‌باشد که برای بررسی دقیق‌تر به‌صورت جداگانه در شکل (۹) آمده است. تفاوت این مقادیر در ایستگاه‌هایی که مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای همخوانی ندارند، به‌طور متوسط در ماکزیمم مقدار خود، دو برابر بوده است. این امر بدین معنی است که با توجه به صحت مدل، در بهترین حالت مقدار خروجی می‌تواند تا دو برابر بیشتر شده و احتمالاً این مقدار مصرف شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در ایستگاه‌هایی که سد واقع شده است (سورال، سنگ سیاه و گلبلاغ) مقادیر شبیه‌سازی‌شده خروجی بیشتری را نسبت به واقعیت نشان داده است. همین امر در ایستگاه‌هایی که در پایین‌دست سورال، سنگ سیاه و گلبلاغ واقع شده (دهگلان، حسن خان و سلامت‌آباد) و همچنین تحت‌تأثیر بالادست قرار دارند به چشم می‌خورد؛ برای نمونه، در خروجی ایستگاه سورال مقادیر مشاهداتی کمتر از مقادیر محاسباتی هستند و این بدین معنی است که یا افزایش سطح زیر کشت صورت گرفته یا به هر علت دیگری میزان مصرف آب در سال‌های پس از احداث سد بیشتر شده است. از آنجا که مصارف شرب و صنعت همچنان در تمام بازه‌ها از آب‌های زیرزمینی تخصیص می‌یابد و نیز الگوی کشت و راندمان در بازه‌های فوق تغییری نداشته است، دو گزینه جبرای بررسی علت فوق در نظر گرفته می‌شود: کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی و جبران آن از منابع آب‌های سطحی یا افزایش سطح زیر کشت؛ اما همچنان که مشاهده می‌شود ایستگاه‌های دلبران و شادی‌آباد دارای چنین مشکلی نبوده و مقادیر محاسباتی و مشاهداتی همخوانی و تطابق کافی را نشان می‌دهند. لذا چنین به نظر می‌رسد الگوی رفتاری کل منطقه در تمامی بازه‌ها تحت‌تأثیر وقایع بالادست تغییر کرده است. در شبیه‌سازی دینامیکی متغیرهایی وجود دارند به نام متغیرهای مرجع که وقایع و پدیده‌های درون سیستم را به تصویر می‌کشند. با بررسی چنین متغیرهایی، الگوهای رفتاری شناسایی شده و علت پدیده مشخص خواهد شد.

در این منطقه، متغیر آب‌های زیرزمینی که برای تخصیص بخش شرب، صنعت و نیز بخشی از مصرف کشاورزی مورد استفاده واقع می‌شود، به‌عنوان متغیر مرجع در نظر گرفته شده است. با توجه به آمار موجود، آبنمود آبخوان‌های این منطقه دریافت شد (مطالعات بهنگام سازی بیلان، ۲۰۱۱). شکل (۱۰) آبنمود آبخوان دشت قروه و دهگلان را نشان می‌دهند. همان طور که مشخص است، سطح آب در این دو آبخوان طی سال‌های منتهی به ۱۳۹۰ افت شدیدی (حدود ۱۵ متر در دشت قروه و ۲۲ متر در دشت دهگلان) را نشان می‌دهد. در کنار کاهش دبی چشمگیر رودخانه‌های منطقه و برداشت از بالادست، به نظر می‌رسد برداشت از آب‌های زیرزمینی همچنان به‌شدت ادامه دارد.



شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در مقیاس ماهانه طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵

Figure (9): Results from model simulation on a monthly scale during the years 2011 to 2016



شکل (۱۰): آبنمود آبخوان‌های دشت دهگلان و دشت قروه

Figure (10): Aquifers of Dehgolan and Qorveh plain

با توجه به رفتار بازه‌های بالادست و پایین‌دست، برای بررسی مشکل، تعیین الگوهای رفتاری حاکم بر منطقه انجام گردید که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

مکانیزم‌های فعال در سیستم منابع آب قروه دهگلان

با توجه به مطالب گفته‌شده چنین به نظر می‌رسد که دینامیک‌های حاکم در منطقه متأثر از الگوهایی هستند که علاوه بر ایجاد رقابت میان بازه‌های گوناگون، درون هر بازه

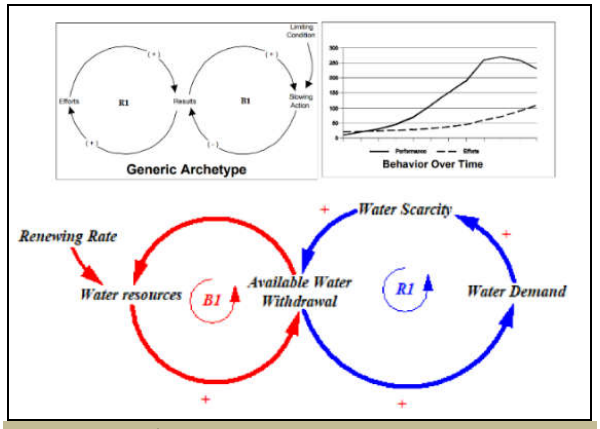
نیز به راه حلی مقطعی بسنده کرده‌اند که با احداث سد همچنان خروجی‌ها کاهش نشان می‌دهد. چنین رفتاری می‌تواند متأثر از الگوهایی چون محدودیت رشد[1]، راه‌حل‌هایی که شکست می‌خورند[2] و تهدید[3] باشد. از آنجا که منطقهٔ مطالعاتی به بازه‌هایی تعریف‌شده تقسیم گردیده است، فرایندهای تقویتی و تعادلی که منتج به تشکیل الگوهای رفتاری شده‌اند، به دو گروه درون بازه‌ای و بین بازه‌ای دسته‌بندی شده است. دینامیک‌هایی که در مقیاس درون بازه واقع می‌شوند و دیگری دینامیک‌هایی (مکانیزم‌هایی) که در مقیاس بین بازه‌ای اتفاق می‌افتند.

مکانیزم‌های فعال درون بازه‌ها

ساختار راه‌حل‌هایی که شکست می‌خورند، از یک باور یا اعتقاد که عمدتاً در یک افق کوتاه‌مدت مؤثر است و قادر به مشاهدهٔ نتایج بلندمدت نیست، منشأ می‌گیرد. این الگو در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود. در این الگو پس از پیدایش و درک مشکل مورد نظر[4] ابتدا راه‌حلی برای رفع مشکی پدیدآمده پیشنهاد می‌شود. اما این راه‌حل مقطعی[5]، سبب بروز پیامدهای ناخواسته[6]، نتایجی منفی و فعال شدن حلقه‌های تقویتی در درازمدت و در واقع تقویت مشکل می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌گردد، تصور وجود منابع آب[7]، رقابت برای برداشت آب[8] را بیشتر می‌کند. علامت مثبت روی زنجیره، تغییرات هم‌جهت این دو متغیر را نشان می‌دهد. همچنین به هنگام برداشت آب، به‌دلیل محدودیت، منابع آب رو به کاهش خواهد گذارد. علامت منفی روی زنجیره در شکل، این ارتباط را نشان داده است. نتیجهٔ این فرایند تشکیل حلقهٔ تعادلی B1 می‌باشد. از طرفی برداشت آب، سبب تقاضای آب[9] بیشتر شده و این امر در نهایت موجب کمبود آب[10] بیشتر خواهد شد. ارتباط متغیرهای فوق سبب پیدایش حلقهٔ تقویتی R1 شده‌اند. شایان ذکر است

1. Limit to growth
2. Fixes that Fail
3 . Escalation
4. Problem Symptom
5. Fix
6. Unintended Consequence
7. Water resources
8. Available water withdrawal
9. Water demand
10. Water Scarcity

که منابع آب موجود در منطقه[11] تحت‌تأثیر عامل برون‌زایی که قبلاً مورد اشاره قرار گرفت (مانند افزایش دما و کاهش رواناب) قرار گرفته‌اند. در نهایت، برآیندهای حلقه‌های B1 و R1، مکانیزم محدودیت رشد را به دنبال دارد که برای شفافیت بیشتر، الگوی کلی[12] آن نیز در شکل آمده است.



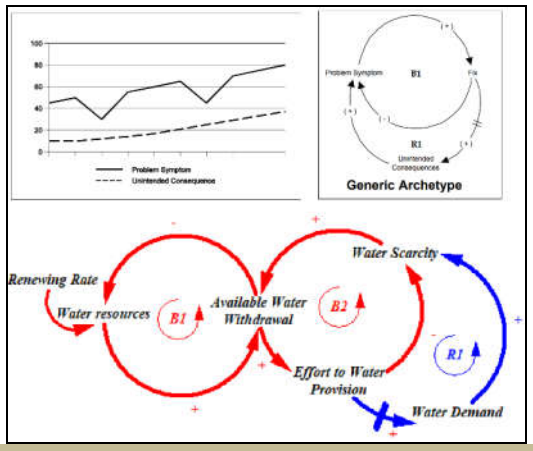
شکل (۱۱): الگوی محدودیت رشد در سیستم منابع آب قروه دهگلان

Figure (11): Limit to Growth algorithm in Qorveh Dehgolan water resources system

مطابق شکل، در عمل با ارائهٔ راه‌حل، در کوتاه‌مدت و مراحل اولیه، علامت مشکل کم‌رنگ‌تر می‌شود. در صورتی که این راه‌حل، پس از مدتی پیامدهای ناخواسته‌ای را در پی خود به ارمغان خواهد آورد که سبب تقویت مشکل پدیدآمده خواهد شد.

شکل (۱۲) الگوی راه‌حل‌های شکست‌خورده را توسط حلقه‌های تعادلی B2 و تقویتی R2 در منطقه نشان داده است. در این منطقه با مواجه شدن به مشکل کمبود آب[13] تلاش بیشتر در تأمین آب به‌منظور رفع مشکل ایجادشده صورت می‌گیرد. در واقع راه‌حل مقطعی[14] در این حوضه، تلاش بیشتر در تأمین آب[15] بوده است. این راه‌حل سبب بروز افزایش تقاضا در درازمدت (افزایش سطح زیر کشت و متعاقباً افزایش تقاضا) که در واقع مشکل پیش‌بینی‌نشده[16] در این مقطع می‌باشد، گردیده است. در نهایت، این امر قابلیت کنترل فرایند B2 را در بروز پدیدهٔ کمبود آب کاهش می‌دهد.

11. Water resources
12. Generic Archetype
13. Water Scarcity
14. Fix
15. Effort to water Provision
16. Unintended Consequences



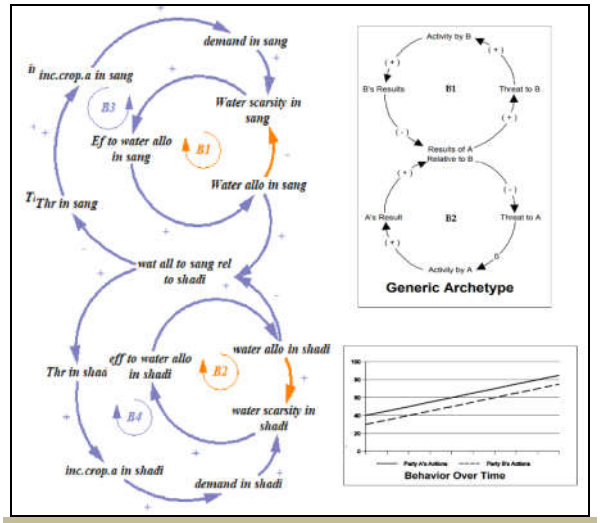
شکل (۱۲): الگوی راه‌حل‌های شکست‌خورده در سیستم منابع آب قروه دهگلان

Figure (13): Fixes that Fail algorithm in Qorveh Dehgolan water resources system

در این منطقه نیز به‌دلیل کمبود منابع آب برای برطرف کردن مشکل، احداث سد صورت گرفته، اما آنچه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد، حاکی از افزایش برداشت در محل احداث سد و نیز پایین‌دست آن می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که خروجی‌های مشاهده‌شده از مقادیر محاسباتی کمتر شده است. لذا با توجه به الگوهای رفتاری چنین به نظر می‌رسد با احساس تقویت و عدم کمبود منابع آب که منتج از رفتار الگوی محدودیت رشد و راه‌حل‌های شکست‌خورده می‌باشد، سطح زیر کشت افزایش یافته است. بررسی آمار این مطلب را تأیید کرده و نشان می‌دهد در تمام بازه‌ها افزایش سطح زیر کشت (راه‌حل‌های شکست‌خورده) صورت گرفته است. این رفتار نشان می‌دهد به‌رغم کاهش دبی طی سال‌های اخیر و افزایش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی با احداث سد (راه‌حل مقطعی)، افزایش سطح زیر کشت (افزایش تقاضا) صورت گرفته است که این امر در درازمدت سبب افت بیش از حد سطح آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی و تشدید بحران آب می‌شود. اما متأسفانه از آنجا که در اغلب موارد نتایج حاصل از الگوهای فوق با تأخیر همراه‌اند، امر یادگیری از نتیجهٔ سیاست‌های غلط را با مانع مواجه خواهد کرد.

مکانیزم‌های فعال بین بازه

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، در تمام بازه‌ها، حتی شادی‌آباد و دلبران نیز که سدی احداث نشده و پایین‌دست بازه‌های یادشده نیز واقع نشده‌اند، افزایش سطح زیر کشت صورت گرفته است. در ارتباط با روابط بین بازه‌ها، ساختار تهدید از گسترش فعالیت یک بازه و در نتیجه تهدید بالادستی منشأ می‌گیرد. این امر سبب تهدید بازهٔ پایین‌دست شده و اقدام وی را در افزایش فعالیت و استفاده از منابع تشدید می‌کند. در این الگو هریک از ذی‌نفعان با مصرف آب توسط بالادستی خود احساس خطر نموده و در پی آن به‌دنبال راه‌حلی برای افزایش تأمین آب خواهد بود. در این منطقه با توجه به شکل (۱۳) که (برای نمونه) بین بازه‌های سنگ سیاه و شادی‌آباد ترسیم شده است، مشاهده می‌گردد هریک از بازه‌ها با افزایش سطح زیر کشت چنین اقدامی را عملی کرده‌اند. این الگو که در واقع یک الگوی رشد (افزایش برداشت و روند روبه‌رشد کمبود) می‌باشد، فرایند تقویتی ساختار راه‌حل‌های شکست‌خورده را تشکیل داده است.



شکل (۱۳): الگوهای رفتاری بین بازه‌ای در قروه دهگلان

Figure 13: Active Behavior Archetype in Qorveh Dehgolan

در شکل (۱۳)، حلقه‌های بنفش‌رنگ بیان‌کنندهٔ الگوی رشد یا تقویتی تهدید در منطقه بوده که شامل دو حلقهٔ تعادلی B4 و B3 می‌باشد. در این ساختار، حلقهٔ تعادلی B3 شامل فعالیت بازه اول و حلقهٔ B4 در واکنش به گسترش فعالیت وی و احساس مخاطره در امنیت و رفاه خویش، خواستار تولید منابع برای بازه خود می‌باشد. برآیند این دو حلقه یک ساختار رشد تشکیل داده و بدون توجه به موجودیت منابع، خواستار رشد بی‌نهایت در منطقه هستند. حال آنکه این عدم توجه در منطقه منجر به ایجاد مکانیزم‌هایی از قبیل راه‌حل‌های شکست‌خورده

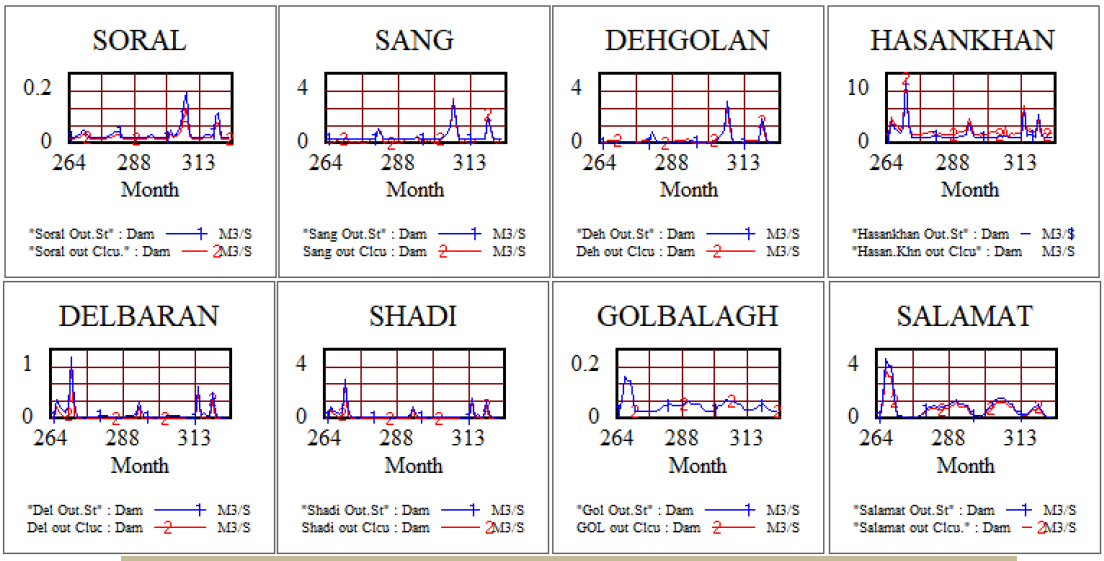
و محدودیت رشد در منابع شده است. مکانیزم راه‌حل‌های شکست‌خورده درون الگوی تهدید قرار گرفته است. در نتیجه، عدم توجه به نتایج حاصل از درخواست‌های مکرر در خصوص طرح‌های آبی از قبیل احداث سد، افزایش سطح زیر کشت را به‌دنبال داشته و در نتیجه الگوهایی فعال شده‌اند که سبب افزایش تقاضا و کمبود بیشتر منابع خواهد شد. در قروه دهگلان نیز الگوی تهدید سبب افزایش سطح زیر کشت در بازه‌های شادی‌آباد و دلبران شده اما از آنجا که در این منطقه از سد استفاده نشده، راندمان از ۳۷٪ به ۴۵٪ تغییر یافته و این امر سبب ایجاد تعادل در برداشت شده است. حداکثر درصد افزایش سطح زیر کشت نسبت به متوسط دوره در جدول(۵) آمده است.

پس از وارد کردن سطوح زیر کشت مازاد بر سطح قبل و راندمان تغییریافته خروجی مدل به دست آمد. نتایج حاصل از مقایسهٔ دبی‌های خروجی مشاهداتی (St) و محاسباتی (Clcu) در تمام ایستگاه‌های قروه دهگلان در شکل (۱۴) نشان‌دهندهٔ صحت و کارایی بالای نرم‌افزار ونسیم است.

جدول (۵): حداکثر درصد افزایش سطح زیر کشت نسبت به متوسط دوره

Table (5): Maximum percentage increase in crop area relative to average period

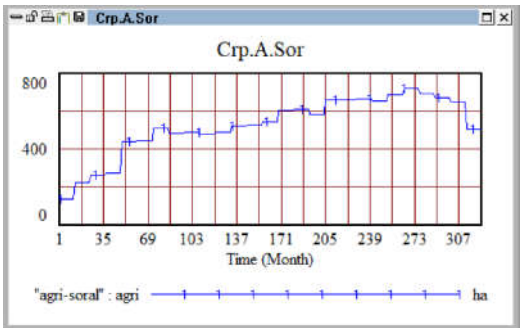
ایستگاه	سورال	دهگلان	سنگ سیاه	حسن خان	دلبران	شادی‌آباد	گلبلاغ	سلامت‌آباد
حداکثر درصد افزایش سطح	۲/۴۰	۳/۷۸	۳/۵۶	۴/۵۰	۱/۱۶	۲/۳۴	۳/۹۳	۱/۷۴



شکل (۱۴): مقایسهٔ دبی‌های خروجی مشاهداتی (St) و محاسباتی (Clcu) در تمام ایستگاه‌های قروه دهگلان

Figure (14): Comparison of observational (St) and Calculation (Clcu) output flows in all Qorveh Dehgolan stations

باید توجه داشت همان طور که در بخش الگوی محدودیت رشد اشاره شد، هیچ روند روبه‌رشدی تا بی‌نهایت ادامه نداشته و پس از بروز محدودیت منابع، سکون و حتی سقوط روند افزایشی را به‌دنبال خواهد داشت. شکل (۱۵) تأییدی بر این مطلب است.



شکل (۱۵): تغییرات سطح زیر کشت بازه سورال طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۵

Figure (15): Changes in the area under cultivation of the Sural interval during the years 1369 to 1395

همان طور که مشاهده می‌شود، سطح زیر کشت در بازه سورال روند افزایشی داشته و مهم‌تر اینکه پس از شیب افزایشی، با توجه به فعالیت الگوی محدودیت رشد، کاهش سطح در سال آخر با مقداری حدود ۴۰٪ مشاهده می‌شود. این امر منتج از کاهش و محدودیت منابع آب است. در این مرحله، با توجه به رفتارهای مشاهده‌شده، در صورتی که اقدامی برای مدیریت صحیح مصرف صورت نگیرد، قطعاً خروجی حداقلی و خشک شدن مخازن سدها دور از انتظار نخواهد بود.

نتیجه‌گیری و بحث

در این تحقیق، شبیه‌سازی سیستم تخصیص آب‌های سطحی حوضهٔ آبخیز قروه دهگلان مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی به دو بخش سالانه و ماهانه تفکیک شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقیاس سالانه با توجه به معیارهای RMSE و MAE به‌ترتیب و به‌طور متوسط در تمام ایستگاه‌ها ۰/۱۰ و ۰/۴۰ به دست آمد. این امر در کنار آزمون شرایط حدی، نشان‌دهندهٔ کارایی بالای مدل در مقیاس سالانه بود. در این بخش، درصد برداشت از آب‌های سطحی نیز با توجه به بازخوردهایی که از خروجی هر ایستگاه به بخش کشاورزی وارد می‌شد، و مقادیر آن در تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد. این مقادیر شامل حداکثر درصد برداشت در ایستگاه دهگلان با مقدار ۲۷/۷۹٪ و حداقل درصد برداشت در ایستگاه گلبلاغ با مقدار ۱۹/۵۳٪ بود. در ادامه، شبیه‌سازی جریان در مقیاس ماهانه قبل از فعالیت سدهای حوضه و پس از آن انجام شد. قبل از شروع فعالیت سدها مقادیر RMSE و MAE به‌ترتیب و به‌طور متوسط ۰/۷۴ و ۰/۳۹ بود که تأیید کارایی مدل را به‌دنبال داشت. آنچه در این بخش مد نظر قرار گرفت، تأثیر سدها بر رفتار منطقه و علل بروز آن‌ها بوده است؛ زیرا خروجی مدل پس از فعالیت سدها نشان می‌دهد در بهترین حالت مقدار خروجی می‌تواند تا دو برابر بیشتر شده و این مقدار مصرف شده است. رشد و فعالیت الگوهای محدودیت رشد، راه‌حل‌های شکست‌خورده و تهدید در این منطقه باعث شده است در برخورد با بحران کم‌آبی و جهت عرضهٔ بیشتر (راه‌حل مقطعی) احداث سد صورت گرفته و پس از آن با تصور وجود منابع آب کافی، سطح زیر کشت در تمامی بازه‌ها افزایش یابد. مناطقی که سد دارند، با تصور وجود منابع آب کافی و دیگر بازه‌ها در پاسخ به تهدید ایجادشده دست به چنین اقدامی زده‌اند. این امر سبب شده است در کنار افت شدید تراز آبخوان‌های قروه و دهگلان طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰ (اسدزاده و همکاران، ۲۰۱۶) دبی‌ها در منطقه به‌طور متوسط با توجه به برداشت‌های اخیر، ۷۲٪ نسبت به ابتدای دوره (از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵) و نسبت به کل دوره، ۱۱۴٪ کاهش داشتند و این در حالی است که بارندگی‌ها در اغلب ایستگاه‌ها چنین کاهش شدیدی را نشان نمی‌دهد. این نتایج با تحقیق اوجاقلو و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. از طرفی، سطح زیر کشت در بازه‌هایی که احداث سد در آن‌ها صورت گرفته، همچون سورال، سنگ سیاه و گلبلاغ یا بازه‌هایی که در پایین‌دست چنین بازه‌هایی قرار داشته‌اند همانند حسن خان، به‌ترتیب ۲/۴۰، ۳/۵۶، ۳/۹۳ و ۴/۵ نسبت به متوسط دوره در حداکثر مقدار خود، افزایش و به‌طور متوسط نسبت به کل دوره تا ۱۰۰٪ افزایش داشته‌اند که با نتایج تحقیقات قادرزاده و کریمی (۲۰۱۹) مطابقت دارد. در پاسخ به الگوی تهدید حتی در سرشاخهٔ چم شور که مستقل است و شامل بازه‌های دلبران و شادی‌آباد نیز می‌باشد، با فعالیت الگوی تهدید، افزایش سطح زیر کشت صورت گرفته است. از آنجا که در این بازه‌ها محدودیت رشد و راه‌حل‌های شکست‌خورده هنوز شروع به فعالیت نکرده‌اند، این بخش از حوضه برای حفظ تعادل، راندمان آبیاری را از ۳۷٪ به ۴۵٪ افزایش است. باید توجه داشت همان طور که در بخش الگوی محدودیت رشد اشاره شد، هیچ روند روبه‌رشدی تا بی‌نهایت ادامه نداشته و پس از بروز محدودیت منابع، سکون و حتی سقوط روند افزایشی را به‌دنبال خواهد داشت. اما متأسفانه از آنجا که در اغلب موارد نتایج حاصل از الگوهای فوق با تأخیر همراه‌اند، امر یادگیری از نتیجه سیاست‌های غلط را با مانع مواجه خواهد کرد. لذا از آنجا که این الگو در این منطقه فعالیت دارد، همچنان طرح‌های آبی و احداث سدهای جدید در ادامه نیز تعریف خواهد شد غ زیرا در این حوضه راه‌حل‌های مقطعی که منجر به شکست می‌شوند، جایگزین مدیریت صحیح مصرف شده است. تأیید این مطلب اینکه سطح زیر کشت در بازه سورال روند افزایشی

داشته و مهم‌تر اینکه پس از شیب افزایشی، با توجه به فعالیت الگوی محدودیت رشد، ۴۰٪ نسبت به حداکثر مقدار خود، کاهش سطح در سال آخر مشاهده می‌شود این امر منتج از کاهش و محدودیت منابع آب می‌باشد. این نتایج با تحقیقات قادرزاده و کریمی (۲۰۱۹) همخوانی دارد. در این مرحله با توجه به رفتارهای مشاهده‌شده، در صورتی که اقدامی برای مدیریت صحیح مصرف صورت نگیرد، به‌قطع خروجی حداقلی و خشک شدن مخازن سدها دور از انتظار نخواهد بود.

منابع

1. Alami, M. T., Farzin, S., Ahmadi, M. H. and Aghabalaee, B. (2014). System Dynamics Modeling of Dam and Groundwater for Optimal Water Management (Case study: Golak Dam). Journal of Civil and Environmental Engineering. 44(1):74-87.
2. Amoo, O.T., Nakin, M.D. V., Abayomi, A., Ojoubele, H. o. and Salami, A. W.(2020). System Dynamics Approach for Evaluating Existing and Future Water Allocation Planning Among Confilicting Users. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.4(3):44-51.
3. Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S. and B. Raei, B. (2016). Impact of Drought on Groundwater Quality and 3-Groundwater Level in Qorveh-Chardoli Plain. Iran-Water Resources Research. 12(3):513-561.
4. Barati, Kh., Abedi Koupai, J., Darvishi, E., Azari, A. and Yousefi, A. (2020). Cropping Pattern Optimization Using System Dynamics Approach and Multi-Objective Mathematical Programming. J. Agr. Sci. Tech. 22(5):1397-1412.
5. Wade, P. and Eslamian, S., (2017). Water Issues from a System Dynamics Perspective, Ch. 25 in Handbook of Drought and Water Scarcity, Vol. 2: Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity, Ed. by Eslamian S. and Eslamian F., Taylor and Francis, CRC Press, USA, 461-488
6. Fotookian, M.R., Safari. N. and 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.13(3):1-16.
7. Ghaderzadeh, H. and karimi, M. (2019). Impacts of Agricultural Water Quota Policy in Groundwater Resources Management in Qorveh-Dehgolan Plain. Agricultural Economics.12(4):73-89.
8. Ghodoosi, M., Morid, S. and Delavar, M. (2013). Comparison of de trending methods for the temperature and precipitations time series. Journal of Agricultural Meteorology.1(2):32-45.
9. Huanhuan, Q., Amy C. Sun, J. L. and Chunmiao, Z. (2012). System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain. Water Policy 14:214–231.
10. Kadkhodahosseini. M., Shahomammadi. S., Mirabbasi. R. and Nozari. H. (2018). Evaluation of Different Allocation Scenarios for Choghakhor Dam Reservoir Using System Dynamic M. Iran-Watershed Management Science & Engineering. 11(36):23-32.
11. Naseri. H., Ahmadi. M. and Salavitabar. A. (2011). Modeling the utilization of sustainable water resources of Shahrchai Dam (orumieh) by system dynamics method. Iranian Geological Quarterly. 16:97-108.
12. Ojaghlu. H., Mashahir. M. and Razmjo, m. GH. (2017). Monitoring the exploitation of tributaries on reducing the flow of the Ghezel Ozan River (Study Case: Tarom Basin - Khalkhal). 16th Iranian Hydraulic Conference. Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University.1-8.
13. Ormsbee, L. and Elshorbagy, A. (2006) Object-oriented modeling approach to surface water quality management, Environmental Modelling & Software.:21:689-698.
14. Paimozd. Sh., Morid. S., Bagheri. A. and Torabi. S.(2011). Inter State water allocation in common basin, using a system dynamics approach:A case study in the Qezel ozan basin. Ph.D. Thesis . Tarbiat Modares University.
15. Park, S. and Sahle, V. and Jung, S. Y. (2015). A System Dynamics Model for the Simulation of the Management of a Water Supply System. 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering. 80(8):3641.
16. Report of Agricultural Jihad of Kurdistan Province. (2017). Ministry of Agricultural.
17. Saysel, A. K., Yaman, B. and Yenigun, O. (2002), Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. Journal of Environmental Management,64: 247-260.
18. Senge, P. M. (1992). The Fifth Discipline. Random House, Australia, 7th ed. Edition.
19. Simonovic. S. P. (2002). Global water dynamics: Issues for the 21st century. Water Science and Technology, 45(8):53–64.
20. Simonovic, S. P.and Bender, M. J. (1996). Collaborative planning support system: an approach for determining evaluation criteria, Journal of Hydrology, 177(3):237–251.
21. Smith, P. and Ackere, A.V. (2002). A note on the integration of system dynamics and economic models. Journal of economic and control, 26:1–10.

22. Soltani, M. and Alizadeh, A.(2017.)Integrated water resources management at basin scale (IWMsim) using a system dynamics approach. Journal of Soil and Water Resources Protection .2:69-90
23. Stave, K. A. (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. International Journal of Environmental Management, 67:303-313.
24. Sterman, J. D. (1994).Learning in and about complex systems. System Dynamics Review, 10(2-3):291–330.
25. Teimoori, M., Mirdamadi, S. M. and Hosseini, S. J. (2018). Modeling of Climate Change Effects on Groundwater Resources: The Application of Dynamic Systems Approach. International Journal of Agricultural Management and Development, 9: 107-118.
26. Yuan, L., He, W., Degefo., D. M., Whan, Zh., Ramsey, T. S and Wu, x.(2021). A system dynamics simulation model for water conflicts in the Zhanghe River Basin, China.International Journal of Water Resources Development. https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1873107
27. Vlachos, D., Georgiadis, P. and Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. International Journal of Computers and Operations Research, 34:367-394.
28. Water resources planning report.(2011).Ministry of Energy. Iran Water Resources Studies Company.1:1-336.
29. Water resources balance updating studies.(2011). Iran Water Resources Studies Company.5:1-106.
30. Xi. X. and Poha, K. L. (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. Procedia Computer Science 16:157 – 166.
31. Xu, Z. X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Qhang, X. W. (2002). Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. Water Resources Management. 16(3):239–261.
32. Zarghami, M. and Akbariyeh, S. (2012). System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. Resources, Conservation and Recycling. 60:99-106.

Simulating Surface Water Allocation and Identifying Systemic Archetype Using Vensim Software: A Case Study of Qorveh Dehgolan's Basin

Shahla Paimozd[1]

Received: 23/01/2021 Accepted: 13/04/2021

Extended Abstract

Introduction: Modeling the allocation of water resources systems in the world has been considered from different perspectives. One of the most important differences in modeling is between linear and dynamic approaches. The term linear refers to a common approach in modeling with a mechanical conception of events that justifies phenomena with unilateral cause and effect relationships. On the other hand, in the dynamic approach, which is also applied in the present study, the system is first broken down into smaller components, the mutual causal relationships between the components are defined, and finally, the combination of their results determines the system's performance. Together with each other, Causal relationships create a Generic Archetype that helps identify the problems and solve them, which could especially be helpful in water resources management. This study sought to simulate surface water allocation in the agricultural sector of Qorveh Dehgolan's basin, dealing with future problems by identifying generic archetypes.

1. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Member of Water research institue, Arak University, Arak, Iran; S-Paimozd@araku.ac.ir.
DOI: 10.22052/deej.2021.10.31.61

Materials and Methods: in the study area, drinking water, the water used in industry, and some part of the water used in agriculture are supplied from groundwaters. Thus, the researchers attempted to measure the amount of surface water consumed by the agricultural sector. To this end, first, the model was simulated on an annual scale. Then, after ensuring the model's accuracy, it was implemented on a monthly scale using the Vensim software. Moreover, behavior and condition tests were performed to validate the simulated model, proving the model's high accuracy.

Results: To ensure that the decrease in rainfall does not affect discharge, a comparison of rainfall trends and river discharge was performed in two selected stations, and the results showed that the decrease in river discharge was due to consumption. After that, has been evaluated model in annual scale, we used average values of RMSE and MAE in all stations, results show values equal 0.4 and 0.10 respectively, on the other hand, the test of limit conditions was confirmed high accuracy of the model.

In the next stage, the average percentage of computational withdrawals was calculated for the annual scale, and the results showed that the maximum and minimum percentages of water consumption are equal to 27.79 and 19.53 for Dehgolan and Golbalagh stations, respectively. These values indicate a deficit equal to 50% of the water requirement throughout the simulation period. Then, simulations were performed on a monthly scale before and after dam activity. Before operating the dams in the region (until 1390), the RMSE and MAE values were calculated as 0.74 and 0.39, respectively, which confirmed the model's efficiency. Then the impact of dams on the region's behavior and the causes of their occurrence was considered. Despite an intense decrease in discharge, the activity of generic archetypes, such as growth limit, failed fixes, and escalation, have expanded the under-cultivation area in all zones from 1390 to 1395, with the HassanKhan under-cultivation zone being expanded by 4.5 times compared to the previous conditions.

Discussion & conclusion: Simulating the dams' post-operation performance model shows that the dams' output can be increased up to 2 times in the best case. An increase in growth-limit patterns failed solutions, and escalation has led to the construction of dams in this region to deal with water shortages crisis and to supply more water, and, thus, to the expansion of under-cultivation areas in all zones with the assumption of the existence of adequate water supplies. Therefore, in addition to the critical decrease in Qorveh and Dehgolan aquifers' water level throughout the 1369-1390 period, the region's discharge rate has dropped by 72% compared to its rate at the beginning of the period (from 1390 to 1395), and by 114% compared to the whole study period due to recent extractions, while according to most of the meteorological station, the precipitation rate has not been decreased so critically.

On the other hand, the under-cultivation areas in zones where dams are constructed such as Soral, Sang Siah, and Golbalagh, or under-cultivation areas in areas located downstream of those zones, including Hassan Khan, have been expanded by 2.40, 3.56, 3.93, and 4.5 times compared to the study period's average rate in response to the escalation. As the growth limit and failed solutions have not been applied to these zones yet, this part of the basin has increased the irrigation efficiency from 37% to 45% to maintain the equilibrium. Therefore, considering the observed behaviors, it could be argued that if appropriate measures are not taken to manage water consumption properly, the dams' minimum output and their reservoirs' dryness would be highly expected.

Keywords: Qorveh Dehgolan, System Archetype, System Dynamics, Vensim, Water Allocation.