



Dynamic simulation of generic archetype of upstream sefid rud basin and river inflow under influence of dams

Katayoon Faraji¹, **Shahla Paimozd²**, **Mahdi Rahimi³**

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail:

Katayoon.faraji@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: Paimozd.ar@hotmail.com

3. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Mahdi.rahimi@alumni.ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 8, 2022

Revised: Jan. 7, 2023

Accepted: Feb. 19, 2023

Published online: Feb. 20, 2023

Keywords:

Generic Archetypes,
System Dynamics,
Vensim,
Water Allocation.

ABSTRACT

Introduction: available water resources and their management are very important in preserving and sustaining the development plans of a country, along with providing foodstuffs. Meanwhile, the main tributaries and flooded rivers of a country play a vital role. There are also very important rivers in Iran, one of which is Ghezel Ozen. This river originates in Kurdistan province and it reaches Gilan province after it passes through downstream provinces and joins Sefid-Rud river after which it is called Qezel Ozen of Sefid-Rud river and enters the great dam of Sefid-Rud. In the meantime, considering small details of the area, modeling will provide a faster and more accurate investigation so that managers can use it. In this regard, there are two views, dynamic and linear. In this research, the mechanistic view was used as a decision support system due to the available feedback, holistic thinking, and the possibility of using the model. Then the problems of the region were evaluated by identifying generic archetypes.

Materials and methods: The current research has dealt with the dynamic simulation of the surface water resources allocation in upstream Sefid-Rud basin during the years 1990 to 2019 in two annual and monthly scales. During 1990 to 2011 when the dams had not yet started to operate, simulation was conducted by considering about 30 intervals in the mainstream of the rivers and tributaries of Kurdistan province, part of Zanjan province, and a small area of Hamadan province precipitation, discharge and ground waters as well as all agricultural products, domestic and industrial amounts as input.

Results and discussion: The annual scale of the model structure, with MAE, RMSE, and R2 scales of 0.098, 0.087, and 0.980, respectively, confirmed the accuracy and precision of the model along with the test of the limit conditions that are specific to the dynamic system. Due to the construction of dams, since 2010, monthly simulations were carried out in two sections, before and after the dams' operation. Before the operation of the dams, the values of MAE, RMSE, and R2 were equal to 0.052, 0.103, and 0.940, respectively, confirming the high efficiency of the model. From 2011 to 2019, modeling was defined so as during the first 6 months of water year, water withdrawal was done from the river and during the second 6 months it was done from the dam. All the specifications of the dams along with the needs of the region were simulated in all intervals on a monthly scale. In the meantime, according to the dynamic simulation, the feedback and causal loops formed by them formed patterns that corresponded to the generic archetypes of the region. With the start of the dams, the escalation archetype, limits to growth archetype, and fixes that fail archetype were activated and the increase in water withdrawal was observed in all intervals, whether with the construction of the dam or not.

Conclusion: The results showed that despite the drop of aquifers to an average amount of 30 meters in the whole period and 6.35 meters after the construction of dams, in addition to a 90% reduction in discharges, there was an increase in water withdrawal and despite the severe reduction of water resources, the area under cultivation in dealing with escalation archetype has increased by four times, and following the limits to growth archetype, there has been a very sharp decrease to about 3 times. On average, in the region, the area under cultivation has increased by 2.8 times, at the highest value by 4 times and at the lowest value by 1.6 times. The results indicate that, dam construction led to inappropriate exploitation in the region.

Cite this article: Faraji, K., Paimozd, Sh., & Rahimi, M. (2023) dynamic simulation of generic archetype of upstream sefid rud basin and river inflow under influence of dams, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (12), 2839-2861.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348421.669357>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348421.669357>



شبیه‌سازی دینامیکی رفتار حاکم بر بالادست حوضه سفیدرود و جریان رودخانه تحت تأثیر احداث سدها

کتایون فرجی^۱ | شهلا پایمزد^۲ | مهدی رحیمی^۳^۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: Katayoon.Faraji@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.رایانامه: Paimozd.ar@hotmail.com^۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Mahdi.rahimi@alumni.ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش جمعیت و رشد صنعتی نیازمند منابع غذایی است. رکن اصلی منابع غذایی و نیز مصرف کننده اصلی منابع آبی، بخش کشاورزی می‌باشد که با مصرف روز افزون دچار تنش‌های فراوانی شده است. پژوهش حاضر به شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص منابع آب‌های سطحی بالادست حوضه سفیدرود بزرگ طی سال‌های ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸ پرداخته است. آزمون سالانه ساختار مدل، با معیارهای MAE، RMSE و R2 به ترتیب معادل ۰/۰۹۸، ۰/۰۸۷ و ۰/۹۸۰ است. دقت مدل را در کنار آزمون رفتار حدی، تایید نمود. با توجه به احداث سدها از سال ۱۳۹۰ شبیه‌سازی ماهانه در دو بخش قبل از فعالیت سدها و پس از آن انجام شد. قبل از فعالیت سدها مقادیر MAE، RMSE، R2 به ترتیب معادل ۰/۰۵۲، ۰/۱۰۳ و ۰/۹۴۰ تایید کارایی بالای مدل بود. با شروع بهره‌برداری از سدها، الگوهای گسترش تدریجی، توقف و نزول رشد و شکست فعال و افزایش برداشت در تمام بازه‌ها، چه با احداث سد و چه عدم احداث آن مشاهده گردید. نتایج نشان داد با وجود افت آبخوان‌ها به مقدار متوسط ۳۰ متر در کل دوره و ۶/۳۵ متر پس از احداث سدها، در کنار کاهش ۹۰ درصدی ورودی‌ها، افزایش برداشت صورت گرفته و علی‌رغم کاهش شدید منابع آب، سطح زیر کشت در برخورد با الگوی گسترش تدریجی، چهار برابر افزایش و در پی توقف و نزول رشد، افت بسیار شدیدی تا حدود ۳ برابری داشته است. به طور متوسط در منطقه، افزایش سطح زیر کشت ۲/۸ برابر و در بالاترین رقم ۴ و در پایین‌ترین مقدار ۱/۶ برابر افزایش داشته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱	
واژه‌های کلیدی: الگوهای رفتاری، پویایی سیستم، تخصیص آب، ونسیم.	

استناد: فرجی؛ کتایون؛ پایمزد؛ شهلا، رحیمی؛ مهدی، (۱۴۰۱) شبیه‌سازی دینامیکی رفتار حاکم بر بالادست حوضه سفیدرود و جریان رودخانه تحت تأثیر احداث سدها. مجله

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348421.669357>. ۲۸۳۹-۲۸۶۱، ۵۳ (۱۲)، تحقیقات آب و خاک ایران،

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348421.669357>

مقدمه

منابع آب و نحوه مدیریت آنها در حفظ و حراست یک کشور در کنار تامین مواد غذایی دارای اهمیت بالایی است. در این بین شاخه‌های اصلی و رودخانه‌های پر آب یک کشور نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. در کشور ایران نیز رودخانه‌های بسیار مهمی وجود دارند که یکی از آنها قزل اوزن می‌باشد. این رودخانه از استان کردستان سرچشمه گرفته و پس از عبور از استان‌های پایین دست نهایتاً پس از الحاق به سفید رود تحت عنوان قزل اوزن سفید رود به گیلان رسیده و وارد سد عظیم سفید رود می‌گردد. پرداختن به منابع آب سرشاخه‌های بالادستی و بررسی مشکلات یا از دیدگاهی دینامیکی، بیماری‌های موجود در منطقه، سبب کاهش شدت بحران در شرایط کم آبی و مدیریت سریع‌تر آن خواهد شد. در این بین با توجه به جزئیات ریز منطقه، مدلسازی امکان بررسی سریع‌تر و دقیق‌تری خواهد داد تا مدیران به عنوان یک سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری بتوانند از آن استفاده کنند. در این راستا دو دیدگاه دینامیکی و خطی وجود دارد که به دلیل بازخوردهای موجود در سیستم‌های دینامیکی و امکان استفاده به عنوان یک سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری از دیدگاه دینامیکی استفاده گردید و با شناسایی الگوهای رفتاری مشکلات منطقه ارزیابی شد. در این منطقه تاکنون چنین تحقیقی صورت نگرفته است و در تحقیقات موجود کمتر به استفاده از الگوهای رفتاری در شبیه‌سازی پویا اشاره شده و یا حتی مورد استفاده واقع نشده است. لذا نیز نظر به اهمیت حوضه آبریز سفید رود بزرگ، در تحقیق حاضر با استفاده از این برتری، به شبیه‌سازی دینامیکی بالادست حوضه سفید رود بزرگ (قزل اوزن) پرداخته شده است.

پیشینه پژوهش

سامانه‌های منابع آب از پیچیدگی‌های مختص به خود برخوردار بوده و در برخورد با آن دو دیدگاه کاملاً متفاوت وجود دارد که به دو دسته اصلی خطی (استاتیکی) و غیرخطی (دینامیکی) تقسیم‌بندی می‌گردند (Hjorth & Bagheri, 2006). پویایی سامانه‌ها روشی برای درک رفتارهای یک سامانه پیچیده در طول زمان است. در این روش با تمرکز بر حلقه‌های بازخورد درون سامانه، تأثیرات غیرخطی و تأخیرهای زمانی در میان متغیرها و همچنین ماهیت انباشتی و یا جریانی متغیرها، به بررسی رفتار یک سامانه می‌پردازند (Ahmad & Simonovic, 2000; Smith & Ackere, 2002).

پروژه آناتولی جنوب شرقی یک پروژه توسعه چندبخشی است که شامل سدسازی گسترده در جنوب شرق آناتولی ترکیه می‌باشد که بر اساس مفهوم توسعه پایدار برای ارتقای زندگی ساکنان این منطقه آغاز شد و هدف عمده این پروژه، ساخت ۲۲ سد و ۱۹ نیروگاه برق بر روی رودخانه‌های دجله و فرات به همراه توسعه شبکه‌های آبیاری برای تولید انرژی و آبیاری ۱/۸ میلیون هکتار زمین اعلام گردید. در تحقیق Saysel *et al.* (2002) مشکلات زیست‌محیطی بلندمدت این پروژه، مربوط به استفاده از منابع آب از منظر سامانه‌ها و با تمرکز بر کلیت مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و به کمک نرم‌افزار Vensim مدل‌سازی گردید. هدف از آن، برنامه‌ریزی سیاست‌هایی بود که در رسیدن به پایداری اجتماعی و زیست‌محیطی بلندمدت تأثیرگذار هستند. Paimozd (2021) با استفاده از روش پویایی سامانه، به مدل‌سازی تخصیص بین استانی در حوضه آبریز قزل‌اوزن با تعریف زیر مدل‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی و گیاهی در مدل تخصیص پرداخت و سناریوهای متفاوتی را ارزیابی نمود. نتایج نشان داد در پی تعریف طرح‌ها، به‌خصوص در سال‌های خشک، تبعاتی از جمله کاهش درآمد در استان‌های پایین‌دست، کاهش خروجی از استان‌های بالادست، افزایش سطح زیر کشت و در نتیجه افزایش تقاضا خواهد داشت و بخش زیادی از این مشکلات، متوجه ورودی به سد سفیدرود و تبعات آن برای استان گیلان خواهد بود. مدل‌سازی سامانه منابع آب دشت مشهد با استفاده از پویایی سامانه‌ها توسط حسینی و باقری (۱۳۹۱) انجام شد. در این تحقیق، با استفاده از شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی منبع، تنش منبع و متوسط نیاز آبی دشت، استراتژی‌هایی جهت پایداری دشت مشهد تبیین گردید. رویکرد پویایی سامانه‌ها در تخصیص منابع آب سد چقاخور با توجه به برهم کنش عرضه و تقاضای آب شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی، در محیط نرم‌افزار Vensim نشان داد که در بهینه‌ترین سناریو، این سد توانایی تأمین آب ۴۳۰۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی پایین‌دست را دارد (کدخدای بخش و همکاران، ۱۳۹۷). Nozari *et al.* (2021) با استفاده از روش دینامیک سامانه، به شبیه‌سازی عملکرد سد مخزنی دز پرداختند. در این تحقیق، تمام نتایج با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) مقایسه و عدم اطمینان هر دو روش بررسی شد. نتایج نشان داد که روش پویایی سامانه نسبت به PSO برنامه‌ریزی مناسب‌تری را در پاسخگویی به تقاضای پایین‌دست ارائه می‌دهد. Yuan *et al.* (2021) مدلی را ارائه کردند که پویایی تقاضای آب، عرضه آب و بی‌ثباتی طرح‌های تخصیص آب در مقیاس حوضه رودخانه ژانگ در چین، در زمان کم‌آبی را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که پویایی اجتماعی - اقتصادی - زیست‌محیطی دینفان آب باید در زمان تخصیص آب در نظر گرفته شود. قابلیت نرم افزار ونسیم در پیش بینی تقاضای آب توسط Huang & Wang

(2021) در حوضه رودخانه مروارید با توجه به توزیع ناهمگون منابع آب در زمان و مکان و تناقض فزاینده بین عرضه و تقاضای آب بررسی و نتایج نشان داد مدل پویایی سامانه‌ها برای پیش‌بینی تقاضای آب حوضه رودخانه پیرل قابلیت بالایی دارد. *Abdi-Dehkordi et al.* (2021) اقدام به مدل‌سازی حوضه کارون بزرگ با استفاده از رویکرد پویایی سامانه‌ها پرداختند. برای مدل‌سازی این حوضه از نرم‌افزار Vensim استفاده نمودند. در این مطالعه از شاخص‌های متعدد کمی، کیفی، تنش آبی، درآمد، هزینه و بهره‌وری برای نشان دادن جنبه‌های مختلف پایداری استفاده شد. در نهایت، عملکرد سیستم‌ها با تدوین شاخص پایداری با استفاده از مدل پهنه‌بندی پراکنده به منظور شناسایی سیاست‌های مدیریتی مناسب برای این حوضه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج در کنار تایید قابلیت‌های پویایی سیستم، نشان می‌دهد که صرفاً با در نظر گرفتن پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و توسعه کشاورزی نمی‌توان تقاضای کاربران پایین‌دستی را به طور کامل برآورده کرد. *Ayele et al.* (2022) با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای تغییر اقلیم به بررسی بهره‌برداری از مخزن در راستای تامین نیازها پرداختند. توابع هدف آنها افزایش سطح آب موجود در مخزن و افزایش رهاسازی از آن بود و برای بهینه‌سازی تخصیص از سیستم پویای تصادفی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بیشترین تقاضای سالانه برای آبیاری در فصول خشک ارائه می‌گردد و رهاسازی بهینه از مخزن توانایی تامین تمام تقاضاها برای آبیاری را ندارد. *Dai et al.* (2022) با استفاده از سیستم‌های پویا به بررسی ظرفیت برد منابع آبی در حوضه آبریز yongding در شمال چین پرداختند. نتایج نشانگر بهبود و تعادل میان توسعه اقتصادی و امنیت آبی در شرایط خشکسالی بود. *Hou et al.* (2022) به بررسی روش‌های مختلف تخصیص منابع آب در این حوضه پرداختند. نتایج نشانگر این موضوع بود که شبیه‌سازی پویا قابلیت اطمینان نتایج را افزایش می‌دهد. *Kazemi et al.*, (2022) به مطالعه تخصیص منابع آب در حوضه سفیدرود بزرگ پرداختند. توابع هدف آنها شامل افزایش سود اقتصادی و برقراری عدالت اجتماعی در حوضه بود. نتایج نشان دادند که در صورت همکاری بین استان‌های مختلف هر دو تابع هدف به سمت بهینه‌تر هدایت می‌شوند. *Suo & Fan* (2022) یک مدل برنامه‌ریزی پویا با فاصله فازی^۱ (FIDP) برای مدیریت آب در مقیاس منطقه‌ای تحت عدم قطعیت با ترکیب برنامه‌ریزی خطی فاصله فازی^۲ (FILP) و برنامه‌ریزی پویا^۳ (DP) ارائه کردند. این مدل نه تنها می‌تواند با عدم قطعیت‌های موجود مقابله کند، بلکه ویژگی‌های دینامیکی را در فرآیند تخصیص منابع آب نیز در نظر می‌گیرد. تابع هدف این مطالعه رضایت کلی ذینفعان برای حل تعارض ناشی از توزیع نابرابر منابع در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد مزایای مدل FIDP تحت بررسی ویژگی‌های دینامیکی مطلوب‌تر و دقیق‌تر از مدل FILP است. *Wang et al.* (2022) یک مدل کمی بر اساس پویایی سامانه‌ها برای بررسی حلقه اجتماعی-اقتصادی-آب-محیط‌زیست ارائه کردند. برای این کار سه سناریو برای توسعه آینده شامل ۱- سناریوی ادامه وضعیت موجود، ۲- سناریوی تعدیل ساختار صنعتی، ۳- سناریوی توسعه پایدار، پیشنهاد کردند. این مدل در استان Hubei در چین در دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ پیاده‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که فشار عرضه و تقاضا و آلودگی آب در سناریوی توسعه پایدار کمتر از دو سناریوی دیگر است. *Yuan et al.* (2022) به بررسی طرح مدیریت آلودگی آب با استفاده از نظریه‌های چسب‌انداز، نظریه بازی تکاملی و سیستم‌های پویا پرداختند. نتایج نشان داد که آینده‌نگری و ریسک‌پذیری عوامل موثر در آلودگی آب رودخانه‌ها هستند. همچنین افزایش مجازات‌ها و مدیریت رودخانه به صورت یکپارچه می‌تواند مشکلات حاصل از آلودگی را کاهش دهد. *Zeng et al.* (2022) به بررسی همبستگی آب، غذا، انرژی با ترکیب حساسیت انسانی و بهره‌برداری از مخزن با استفاده از سیستم‌های پویا پرداخته و مدل را در کشور چین پیاده‌سازی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که آگاهی زیست محیطی، حساسیت انسان به کمبود سیستم‌های آب، انرژی و غذا را افزایش می‌دهد. مطابق با تحقیقات فوق نرم‌افزار ونسیم دارای قابلیت بالایی در سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد. از آنجا که در مطالعات فوق کمتر به استفاده از الگوهای رفتاری در شبیه‌سازی پویا اشاره شده و مورد استفاده واقع نشده است و نیز نظر به اهمیت حوضه آبریز سفید رود بزرگ، در تحقیق حاضر با استفاده از این برتری، به شبیه‌سازی دینامیکی بالادست حوضه سفید رود بزرگ (قزل اوزن) پرداخته شده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مطالعاتی

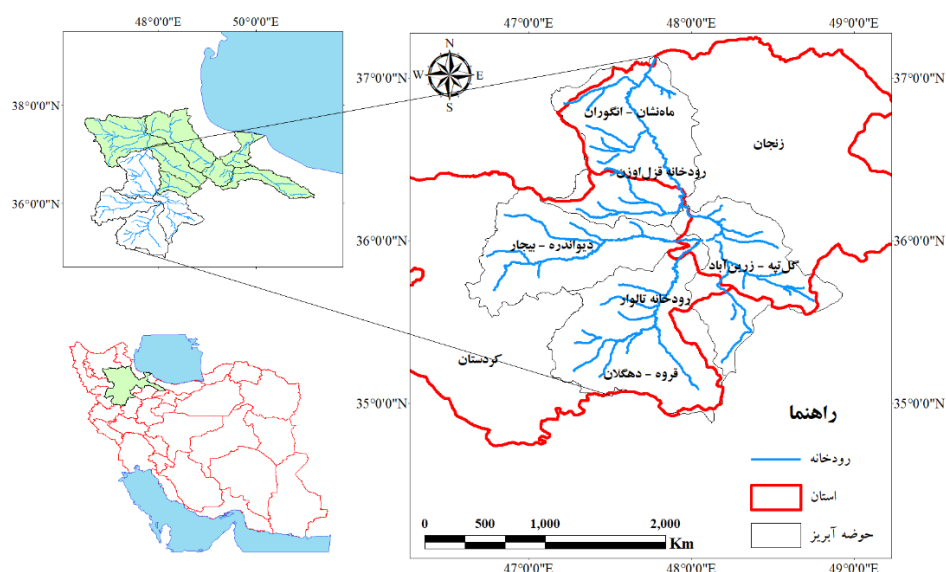
منطقه مورد مطالعه این تحقیق حوضه‌های آبریز بالادست رودخانه قزل‌اوزن (سفیدرود) واقع در استان کردستان و بخشی از استان زنجان، شامل چهار زیر حوضه قروه دهگلان، دیواندره بیجار، گل‌تپه زرین‌آباد و ماه‌نشان انگوران را شامل می‌گردد. این محدوده در ۳۵ تا ۳۷ درجه

۱. Fuzzy Interval Dynamic Programming

۲. Fuzzy Interval Linear Programming

۳. Dynamic Programming

شمالی و ۴۷ تا ۴۹ درجه شرقی قرار دارد.



شکل ۱. حوضه‌های قروه دهگلان، دیواندره بیجار، ماه‌نشان انگوران و گل‌تپه زرین‌آباد (بالادست حوضه سفیدرود)

حوضه آبریز قروه دهگلان از سرچشمه تلوار تا محل تلاقی با قزل‌اوزن به مساحت ۷۲۸۴ کیلومترمربع را شامل شده است. محدوده دیواندره بیجار با مساحت ۵۳۸۵ کیلومترمربع سرشاخه اصلی قزل‌اوزن را شامل می‌شود که می‌توان آن را قزل‌اوزن علیا نامید و تا محل تلاقی با رودخانه تلوار ادامه دارد. رودخانه یول‌گشتی یکی از سرشاخه‌های مهم قزل‌اوزن در این محدوده قرار دارد. محدوده مطالعاتی گل‌تپه زرین‌آباد بخشی از حوزه آبریز قزل‌اوزن را در حدفاصل بالادست تلاقی گامیشکای رود تا محل الحاق دو رودخانه تلوار و قزل‌اوزن علیا در بر می‌گیرد که مساحتی معادل ۵۱۲۴ کیلومترمربع را شامل شده است. بخشی از حوزه آبریز رودخانه قزل‌اوزن از بالادست محل تلاقی آجی‌چای تا بالادست تلاقی گامیشکای رود (به‌استثناء حوزه آبریز سوچاس رود) بنام محدوده مطالعاتی ماه‌نشان انگوران شناخته شده که ۶۷۷۲ کیلومترمربع وسعت دارد. شکل ۱ نشان‌دهنده منطقه مطالعاتی تحقیق حاضر می‌باشد. آمار مورد نیاز در این منطقه جهت شبیه‌سازی شامل مقادیر ماهانه دبی، بارش، سطوح زیر کشت، ریز محصولات، راندمان و جریان برگشتی از سال ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸ بوده است. در این منطقه ۲۲ ایستگاه هیدرومتری موجود است که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. جهت بررسی روند داده‌های بارش و دما نیز از آمار ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه استفاده شده است. از آنجا که شبیه‌سازی جریان سطحی مد نظر بوده است، به مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری اکتفا شده است.

شبیه‌سازی با پویایی سیستم

تفکر سامانه‌ای که اساس و مبنای شبیه‌سازی دینامیک^۱ (پویا) به شمار می‌رود، شامل توانایی نشان دادن و ارزیابی پیچیدگی در طول زمان است و اغلب برای اشاره به ارتباطات جامع بین اجزاء مختلف و نحوه ایجاد رفتارها در یک سامانه پیچیده، استفاده می‌شود (Clancy, 2018). در تفکر سیستمی (سامانه‌ای) با توجه به تئوری فرایندهای بازخوردی، مدل‌سازی به‌صورت بسته در نظر گرفته می‌شود بازخوردها توسط ابزارهای نموداری بازنمایی و در قالب معادلات شبیه‌سازی سیستم، به صورت ریاضی نمادسازی و در نهایت مدل‌سازی صورت می‌گیرد (شفایی و همکاران، ۱۳۹۰). یکی از این مدل‌ها ونسیم می‌باشد. این نرم افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود رفتارسیستم را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد (Paimozd, 2021). طی زمان، مقدار متغیرها در این نوع تفکر تحت تأثیر بازخوردها نسبت به مقدار اولیه تغییر نموده و سبب تغییر در کل سیستم می‌گردند. متغیرها در طول زمان با تأثیر گذاری بر یکدیگر توسط بازخوردها، کل را تغییر داده و روابط بین آنها رفتارهایی را تحت عنوان الگوهای رفتاری ایجاد می‌نماید که هر یک، 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 تحقیق حاضر

۱. Dynamic Simulation

با استفاده از نرم افزار Vensim Professional شبیه‌سازی چهار زیر حوضه در دو مقیاس سالانه و ماهانه انجام گردید. در این منطقه به دلیل وجود ۱۲ سد که حدود سال ۱۳۹۰ به بهره‌برداری رسیده‌اند، وجود دارد. لذا در بخش اول شبیه‌سازی سالانه تخصیص سالانه آب‌های سطحی از سال ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۰ شبیه‌سازی شد و پس از ارزیابی مدل و اطمینان از نتایج آن، شبیه‌سازی در مقیاس ماهانه انجام گردید. ارزیابی مدل انجام و در مرحله بعد با ورود سدها، تخصیص ماهانه کل دوره (۱۳۶۹-۱۳۹۸) با استفاده از نرم‌افزار ونسیم صورت گرفت. توصیف شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن در بخش‌های بعد آمده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مورد مطالعه

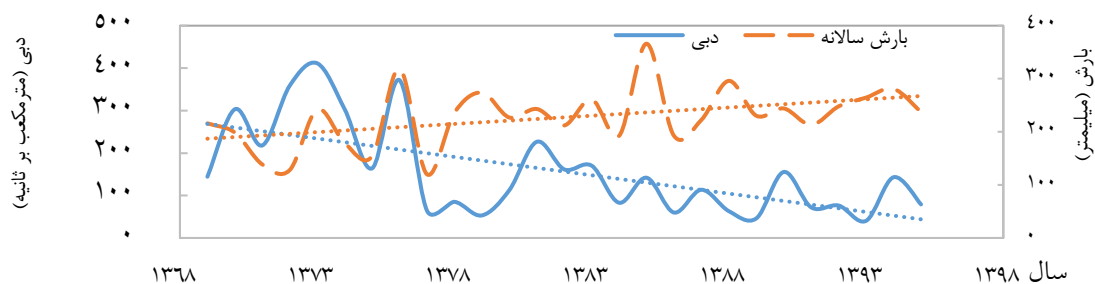
استان	نام ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
کردستان	(بیانلو)یساول	قزل‌اوزن	۵۸-۴۷-۰۰	۳۶-۰۰-۰۰	۱۵۰۰
کردستان	سنگ سیاه	تالوار	۴۷-۲۸-۰۰	۳۵-۱۱-۰۰	۱۸۳۰
کردستان	هشتاد جفت	گامیشگای	۴۷-۵۳-۰۰	۳۶-۱۰-۰۰	۱۵۰۰
کردستان	دهگلان	تالوار	۴۷-۲۴-۴۰	۳۵-۱۶-۴۵	۱۸۲۵
کردستان	نساره علیا	قزل‌اوزن	۴۷-۰۷-۳۸	۳۵-۵۲-۲۶	۱۷۲۵
کردستان	سیازاخ	قزل‌اوزن	۴۷-۰۰-۴۷	۳۲-۵۱-۳۵	۱۷۷۰
کردستان	سورال	تالوار	۴۷-۱۲-۰۰	۳۵-۰۹-۰۰	۱۸۸۸
کردستان	مهرآباد	تالوار	۴۷-۵۴-۰۰	۳۵-۵۱-۰۰	۱۴۸۰
کردستان	پای‌پل‌دلبران	چم شور	۴۷-۳۶-۳۵	۳۵-۱۲-۴۶	۱۷۷۰
کردستان	شادی آباد	چم شور	۴۷-۴۶-۳۲	۳۵-۲۸-۴۱	۱۶۸۰
کردستان	حسن خان	تالوار	۴۷-۲۱-۲۳	۳۵-۲۶-۱۸	۱۷۱۹
کردستان	تالوار	تالوار	۲۸-۵۴-۴۷	۳۲-۴۷-۳۵	۱۵۸۸
زنجان	قره‌گونی	قزل‌اوزن	۴۷-۵۷-۰۰	۳۶-۱۴-۰۰	۱۴۵۰
کردستان	گلبلاغ	اوزون دره	۵۰-۲۳-۴۷	۳۵-۰۸-۳۶	۱۸۱۵
زنجان	زرده کمر	قزل‌اوزن	۶۰-۲۱-۴۷	۰۰-۵۵-۳۵	۱۶۷۳
زنجان	سیر	پول‌گشتی	۴۲-۰۰-۴۷	۳۶-۰۸-۳۶	۱۹۴۷
زنجان	آله دره	آله دره	۴۷-۰۲-۰۴	۱۸-۴۳-۳۵	۱۸۸۷
زنجان	منداق	چسب	۶۰-۱۴-۴۷	۶۰-۱۴-۳۶	۱۹۷۵
زنجان	ماه‌نشان	قزل‌اوزن	۴۷-۴۴-۰۰	۳۶-۳۹-۰۰	۱۴۴۰
زنجان	چسب	مجلو	۴۸-۱۰-۰۰	۳۶-۱۱-۰۰	۱۶۵۰
زنجان	باباخان	گامیشگای	۲۰-۴۳-۴۷	۱۴-۱۰-۳۶	۱۵۲۵
زنجان	شیخ بشارت	خوزان	۱۰-۴۴-۴۷	۱۵-۱۴-۳۶	۱۵۵۸

یافته‌های پژوهش و بحث

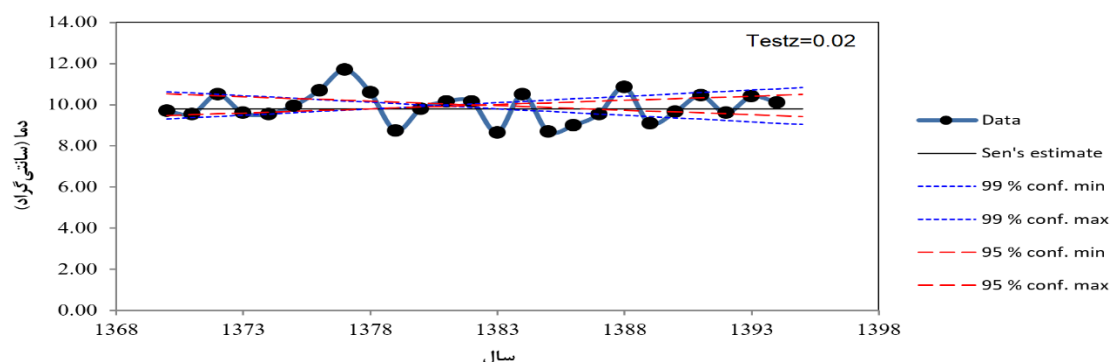
شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص سالانه از رودخانه

در نخستین مرحله و قبل از ورود اطلاعات به مدل، پس از دریافت آمار و اطلاعات از ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک، صحت و روند آمار (با استفاده از آزمون‌های جرم مضاعف و من‌کنندال) بررسی و اطلاعات تکمیل گردید. سپس روند بارش، دما و دبی در منطقه ارزیابی گردید تا تأثیر بارش بر رواناب دیده شود. بررسی روند داده‌ها در اغلب بازه‌ها، نشان‌دهنده ثابت بودن یا گاهی روند افزایشی باران به موازات عدم روند کاهشی دمای ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک، بود. در حالی که روند رواناب در ایستگاه‌های آب‌سنجی، نشان‌گر روند کاهشی مقدار آبدهی می‌باشد. واضح است که این کاهش آبدهی، به دلیل کاهش بارش نبوده و دلیل آن می‌تواند مواردی مانند سدسازی، افزایش برداشت از رودخانه‌ها و غیره باشد که در ادامه در مورد آن‌ها بحث خواهد شد. برای درک دقیق‌تر، با توجه به محدودیت فضا، به عنوان نمونه، روند بارش و رواناب ایستگاه بیانلو که یکی از مهم‌ترین ایستگاه‌های واقع در منطقه است، در شکل ۲ ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد روند کاهشی دبی در مقابل روند افزایشی بارش حاکی از این مطلب است که کاهش جریان رودخانه، به دلیل روند کاهشی بارش نیست. جهت بررسی عمیق‌تر با بررسی روند دما پرداخته شد. از روند دما در ایستگاه بیانلو به همراه آزمون من‌کنندال نیز در شکل ۳ آمده است.



شکل ۲. روند بارش و رواناب در ایستگاه بیانلو



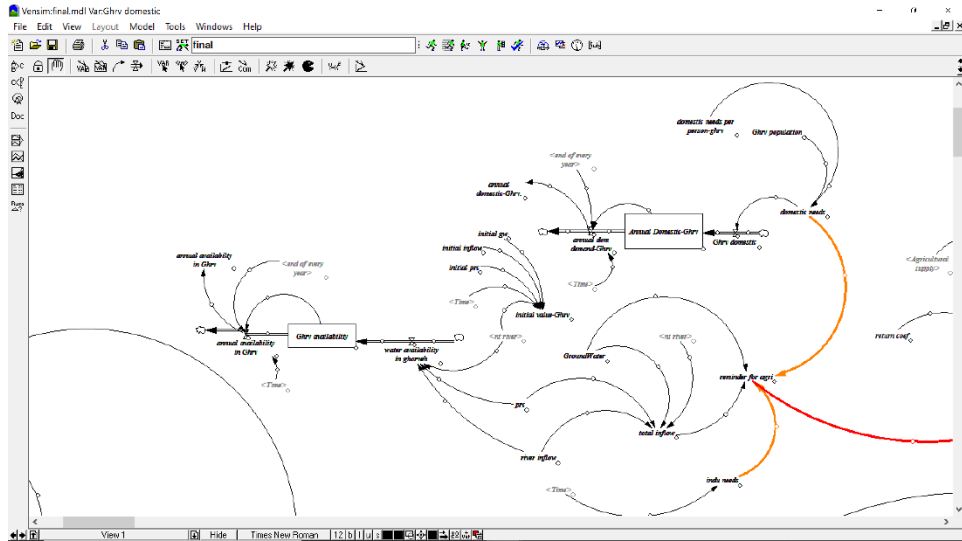
شکل ۳. روند دما در ایستگاه بیانلو

همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، با توجه به مقدار Z ، دما در ایستگاه بیانلو روند کاهشی نداشته است. این امر در کنار عدم روند کاهشی بارش تایید این مطلب است که کاهش جریان رودخانه به دلیل افزایش دما و تغییر اقلیم نبوده است. به دلیل محدودیت فضا نتیجه بررسی روندها در ایستگاه بیانلو اشاره شده و از ارائه نتایج بررسی روند دیگر ایستگاه‌ها صرف‌نظر شده است. پس از بررسی روند و صحت و سقم آمار و اطلاعات، در مرحله بعد جریان رودخانه‌های منطقه طبیعی‌سازی گردید. در تحقیق حاضر، جهت دقت بیشتر، کل منطقه به بازه‌هایی تقسیم شده که مابین هر دو ایستگاه قرار دارند، لذا با استفاده از طبیعی‌سازی ضمن حذف تأثیر برداشت‌های بالادست، جریان میانی بازه‌ها نیز محاسبه گردید. برای طبیعی‌سازی جریان رودخانه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از روش حذف روند (قدوسی و همکاران، ۱۳۹۲) که مورد تایید وزارت نیرو و معاونت امور آب و آبفا می‌باشد استفاده گردید.

جهت شبیه‌سازی دو مقیاس سالانه (و سپس ماهانه) انتخاب گردیده است، معادله بیلان اساس این مدل‌سازی قرار گرفته است. بر این اساس تلاش شد تا حتی‌الامکان کلیه ورودی‌های درون بازه‌ها شناسایی و مصارف نیز برآورد گردد. شکل ۴ شبیه‌سازی زیر سیستم ورودی منابع آب به هر زیرحوضه با استفاده از Vensim Professional را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر مدل‌سازی شامل ۳ مرحله می‌باشد. در هر مرحله کل جریان ورودی با استفاده از زیرسیستم شکل ۴ به مدل اصلی وارد می‌شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، ابتدا کل جریان ورودی بواسطه رودخانه‌ها، جریان میانی، بارندگی و منابع آب زیرزمینی به ترتیب با استفاده از متغیرهای prc river inflow و Ground water در ابتدای هر زیر حوضه و برای هر بازه به مدل معرفی شده‌اند (ورودی به متغیرهای حالت که در شکل ۵ با رنگ سبز نشان داده شده‌اند). لازم به ذکر است، به دلیل داشتن چشمه‌ها و قنوات متعدد در این چهار حوضه، کلیه منابع آب‌های زیرزمینی در یک منبع ورودی در نظر گرفته شد. در این منطقه، تقاضاها شامل شرب، صنعت و کشاورزی می‌باشد. تقاضای زیست محیطی به دلیل ناچیز بودن صرف‌نظر شده است (فرجی، ۱۴۰۱). به منظور تعیین تقاضای شرب، نرخ افزایش جمعیت در حوضه‌ها و سرانه مصرف هر یک برآورد گردید. نرخ رشد جمعیت از اطلاعات مرکز آمار ایران و تخصیص آب شرب از وزارت نیرو تهیه و نهایتاً سرانه مصرف تهیه شد. سپس نیاز شرب با ضرب متغیرهای $Domestic\ needs\ per\ person\ Ghrv$ و $Population$ برای هر زیر حوضه بواسطه متغیر $domestic\ needs$ برآورد گردید. نیاز صنعت نیز از طریق متغیر $indu\ needs$ به مدل معرفی گردیده است. از آنجا که در منطقه مطالعاتی حاضر، شرب و صنعت از منابع آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌کنند، پس از کسر این نیازها از منابع آب‌های زیرزمینی، مابقی ورودی جهت تخصیص به بخش کشاورزی توسط متغیر $reminder\ for\ agri$ وارد بخش اصلی

مدل شده است (جهت عدم برخورد لینک‌ها، متغیرهای فوق با استفاده از متغیر Shadow به مدل معرفی شده‌اند).



شکل ۴. شبیه‌سازی زیر سیستم ورودی منابع آب به هر زیرحوضه با استفاده از Vensim Professional

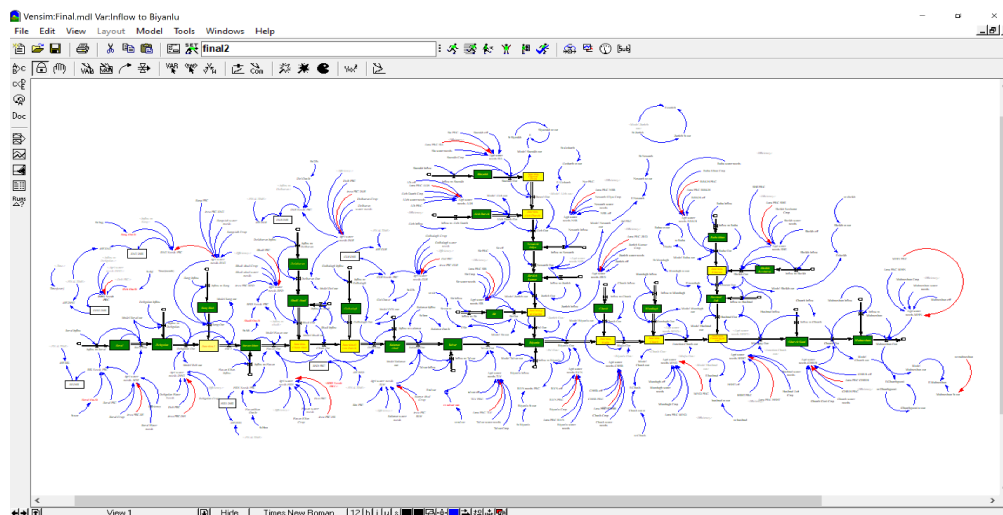
ورودی‌های نشان داده شده در شکل ۴ با متغیر Shadow وارد مدل اصلی (شکل ۵) شده و Flow به جهت تجمیع و برنامه‌ریزی وارد Stock می‌شود. در این مرحله کل آب مورد تقاضای کشاورزی با استفاده از متغیر demand for agri به جهت تصمیم‌گیری وارد شده است. نکته مورد توجه اینکه در این شرایط در صورت باقی ماندن آب در هر گام زمانی، مدل، میزان آب موجود را با مقدار تقاضا مقایسه نموده و کل آب مورد تقاضا یا درصدی از آن را که در اختیار دارد، به کشاورزی اختصاص می‌دهد. در کل محاسبات مربوط به بخش کشاورزی، کلیه محصولات موجود در بازه‌ها، دیده شده و هیچ‌یک حذف نگردیده است. میزان جریان برگشتی هر بازه، ۱۰ درصد برداشت در نظر گرفته شده و به سیستم باز می‌گردد (گزارش برنامه ریزی منابع و مصارف، ۱۳۹۸).

شکل شبیه‌سازی در مقیاس سالانه را نمایش می‌دهد. مدل نوشته شده در محیط ونسیم، به گونه‌ای است که جایگذاری متغیرها بر اساس شبکه هیدروگرافی محدوده مطالعاتی چهار حوضه، از بالادست (ایستگاه سورال) تا پایین‌دست (ایستگاه ماه‌نشان) منطبق بر واقعیت منطقه و در نظر گرفتن کلیه بازه‌ها، باشد. دوره زمانی شبیه‌سازی انجام شده در این مرحله، در مقیاس سالانه، از سال آبی ۷۰-۱۳۶۹ تا ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر شرب و صنعت از ورودیها کسر شده و سپس به زیر حوضه‌ها (و تک تک بازه‌ها) وارد می‌شود. در مدل حاضر کلیه بازه‌ها چه بالادست و چه پایین دست، از طریق لینک‌ها، بازخوردها و معادلات تعریف شده، به یکدیگر مرتبط بوده و مدل‌سازی یکطرفه نخواهد بود.

در این مرحله تعیین نیازها (مصارف) در کلیه بازه‌ها بطور همزمان انجام می‌گردد. از آنجا که تنها نیاز باقیمانده، کشاورزی است، لذا سطوح زیر کشت، راندمان و نیاز آبی حدود ۳۰ محصول در نظر گرفته شد. این نیازها برای تمام بازه‌ها در کلیه گام‌های زمانی (سالانه و ماهانه) و با در نظر داشتن تمام گیاهان در نظر گرفته شده است. سپس برداشت به گونه‌ای محاسبه می‌شود که مقادیر دبی محاسباتی و مشاهداتی خروجی بازه‌ها، بطور همزمان، حداقل اختلاف را داشته باشند. در هر مرحله بخشی از کشاورزی که از آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌شوند در محاسبات مربوط به جریان رودخانه کسر شده‌اند. در زمان ورود سدها به مدل نیز، مقدار حجمی که در واقعیت و برنامه‌ریزی منطقه، به شرب اختصاص داده می‌شود، در مدل نیز از سهم کشاورزی کم شده است. حال در کل مدل و در خروجی هر بازه در صورتی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی یکسان خواهد بود که در تمام بازه‌ها، برداشت‌ها با در نظر گرفتن سطوح زیر کشت، راندمان، نیاز آبی محصولات و ... دقیق برآورد شده باشند. چرا که به دلیل بازخوردهای موجود در مدل، کوچکترین خطا در مدل‌سازی، در تمام بازه‌ها بصورت تصاعدی بالا خواهد رفت. در مرحله به مرحله‌ی مدل‌سازی، مقایسه خروجی‌های مشاهداتی و نتایج محاسباتی با استفاده از معیارهای ارزیابی، در کنار آزمون شرایط حدی، جهت کارایی مدل بررسی و در ادامه آمده است. همچنین بررسی نتایج حاصل از مدل توسط متغیرهای مرجع در ادامه اشاره شده است.

در واقع مدل دارای این قابلیت است که با استفاده از متغیرهای تصمیم که معادلات آنها توسط کاربر نوشته می‌شوند، تقاضای بازه

پایین دست را نیز در نظر بگیرد. همزمان با تعیین نیاز بازه بالادستی، تقاضای بازه پایین دست، در هر (ماه) به بالادست معرفی و سپس میزان آب مازاد در صورت وجود، برای بازه پایین دست معرفی می‌گردد. لذا تمام بازه‌ها همانطور که جریان مازاد را به پایین دست انتقال می‌دهند، نیازهای پایین دست را به بالادست اعلام می‌نمایند. از مقایسه این دو، مقدار جریانی که هر ماه علاوه بر بازه بالادست، بازه پایین دست را نیز تامین می‌کند، محاسبه می‌گردد. پس از این هر مقدار آب مازاد وجود داشته باشد، به پایین دست انتقال داده می‌شود. البته لازم به ذکر است که نیازهایی که در بالادست تامین شده، در محاسبات مربوط به نیازهای استان پایین دست از تقاضای آن کسر می‌گردد.



شکل ۵. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی منابع آب بالادست حوضه سفیدرود با استفاده از Vensim Professional

ارزیابی مدل و آزمون‌های ساختار و رفتار

در شبیه‌سازی پویا، جهت ارزیابی مدل آزمون ساختار و آزمون رفتار انجام می‌شود. در بخش آزمون ساختار از معیارهای میانگین مربعات خطا (MAE^1)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) و ضریب تبیین (R^2) و جهت ارزیابی رفتار مدل، از آزمون شرایط حدی استفاده شد. از آنجا که در مدل سالانه جهت تعیین درصد برداشت، بازه‌ها از پایین دست به بالا دست بازخورد داده شده، لذا در صورت وجود هر گونه مغایرت این مقدار خطا بایستی در ایستگاه‌ها به حداکثر مقدار خود برسد. جدول ۲ نشان‌دهنده مقادیر سه معیار ارزیابی مدل می‌باشد. مقادیر این معیارها بیانگر دقت، صحت و کارایی مدل در شبیه‌سازی دبی خروجی از هر بازه و تخصیص منابع آب در چهار زیرحوضه مطالعاتی می‌باشد.

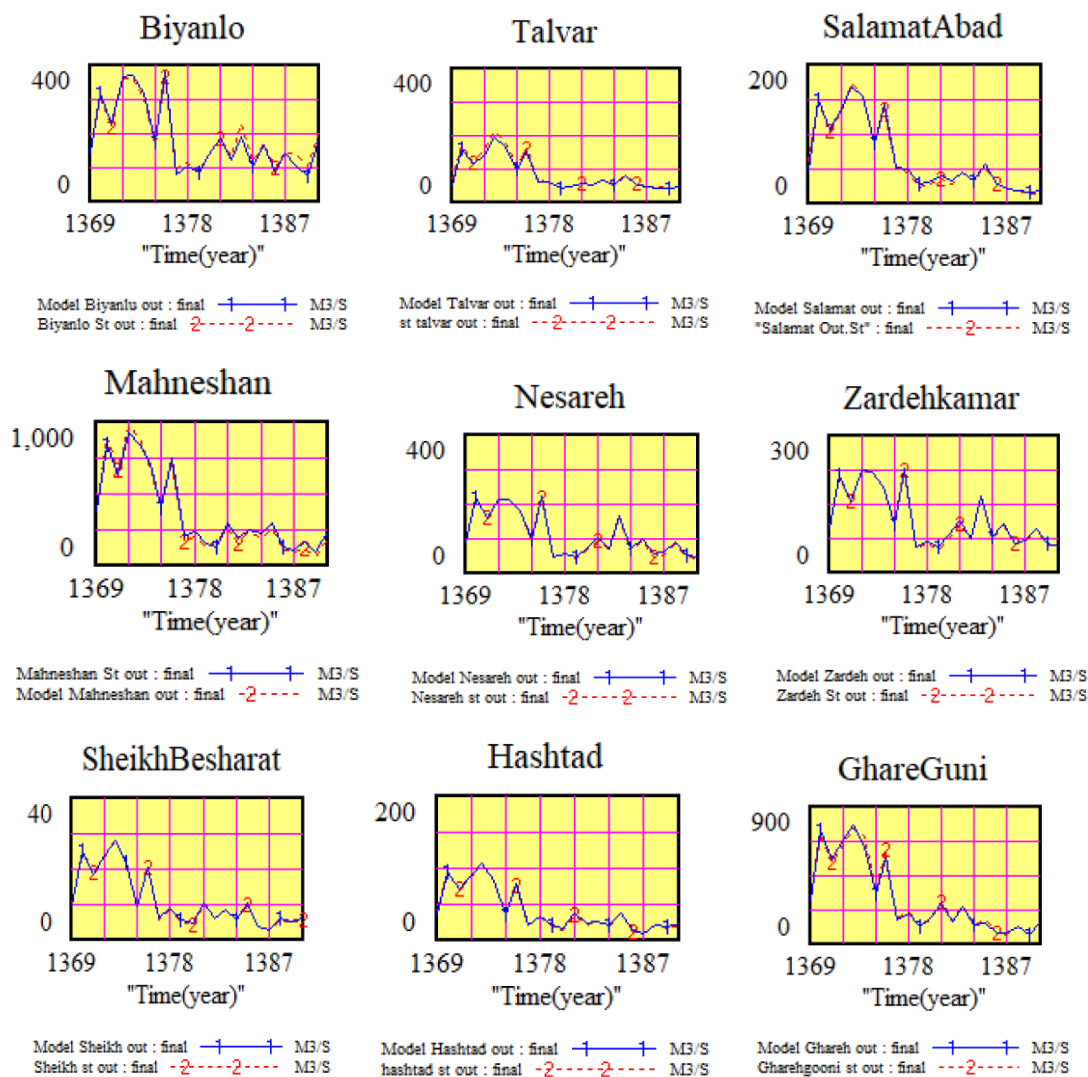
جدول ۲. نتایج معیارهای ارزیابی مدل در مقیاس سالانه

R^2	RMSE	MAE	ایستگاه	R^2	RMSE	MAE	ایستگاه
۰/۹۹۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۹	نساره علیا	۰/۹۹۵	۰/۰۱۹	۰/۰۹۵	سورال
۰/۹۹۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	زرده کمر	۰/۹۹۵	۰/۰۳۹	۰/۰۴۷	دهگلان
۰/۹۹۸	۰/۰۱۴	۰/۰۳۱	سیر	۰/۹۹۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	سنگ سیاه
۰/۹۹۱	۰/۰۳۴	۰/۰۳۱	بیانلو	۰/۹۹۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲۱	حسن خان
۰/۹۹۸	۰/۱۱۴	۰/۳۳۱	چسب	۰/۹۹۴	۰/۰۱۸	۰/۲۶۰	پای پل دلبران
۰/۹۹۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۳	منداق	۰/۹۹۱	۰/۰۰۳	۰/۶۲۵	شادی آباد
۰/۹۹۶	۰/۲۲	۰/۰۸۴	باباخان	۰/۹۷۹	۰/۰۹۹	۰/۲۳۲	گلبلاغ
۰/۹۹۷	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	شیخ بشارت	۰/۹۹۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	سلامت آباد (مهرآباد)
۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۶	هشتاد جفت	۰/۹۸۵	۰/۰۶۳	۰/۰۴۷	تالوار
۰/۹۸۹	۰/۰۶۴	۰/۰۴۴	قره گونی	۰/۹۸۳	۰/۰۴۶	۰/۱۷۹	سیازخ
۰/۹۸۷	۰/۰۸۲	۰/۰۴۱	ماهانشان	۰/۹۹۱	۰/۰۱	۰/۰۸۱	آله دره (سارال)

۱. Mean Absolute Error

۲. Root Mean Square Error

همان‌طور که از معیارهای ارائه شده در جدول مشخص است، مدل به کار گرفته شده، دقت، صحت و کارایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی منطقه مطالعاتی داشته است. معیارهای فوق، حاصل مقایسه دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی دبی‌های خروجی در شکل ۶ نمایش داده شده است. به دلیل محدودیت فضا این نمودارها در تعدادی از ایستگاه‌ها آمده است.



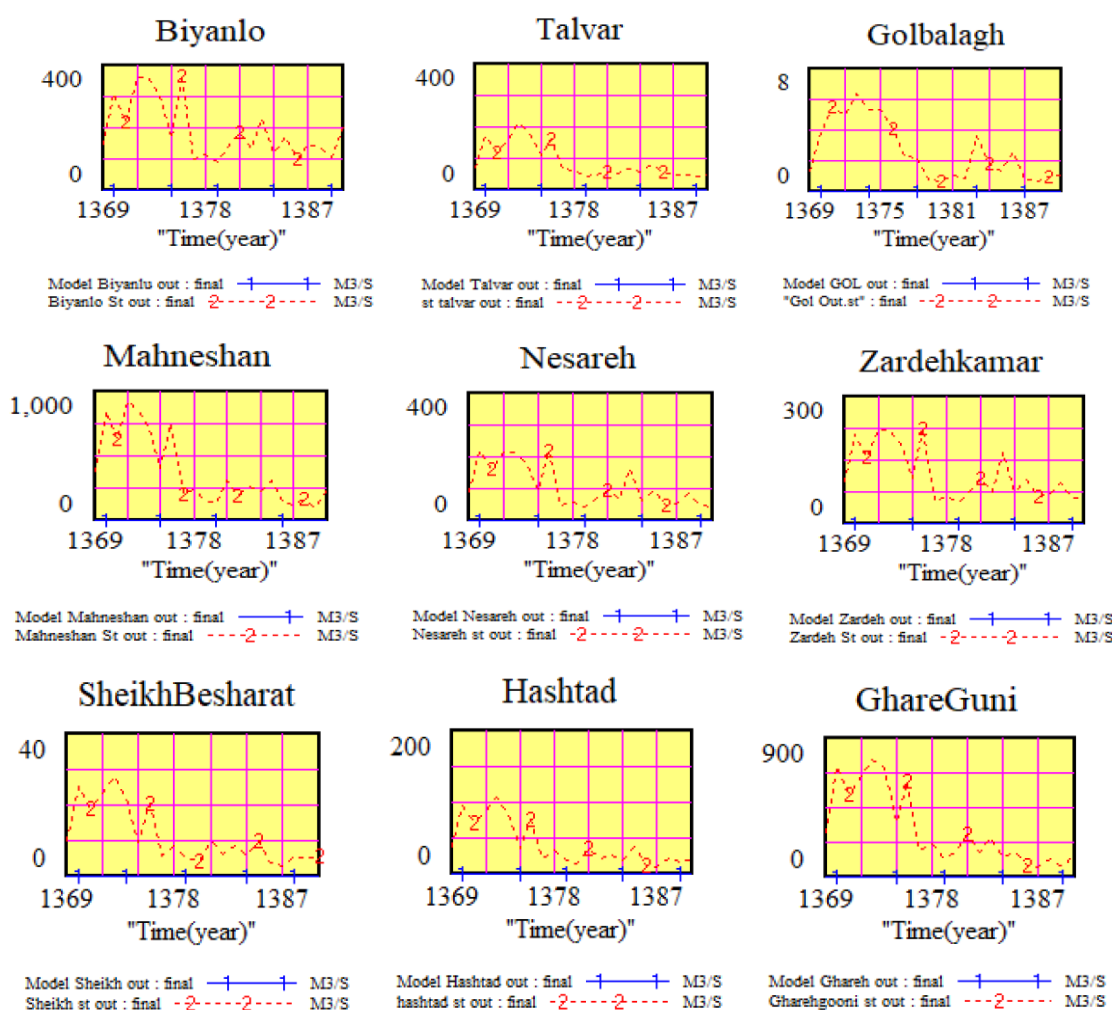
شکل ۶. مقایسه جریان سالانه مشاهداتی و محاسباتی در ایستگاه‌های منتخب بالادست حوضه سفیدرود

همان‌طور که از شکل مشخص است، مقادیر دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دارای دقت و صحت مناسبی می‌باشند. انطباق نمودارهای جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، بیانگر این موضوع است که محدوده مطالعاتی به خوبی و منطبق با واقعیت موجود، شبیه‌سازی شده است و این موضوع نشان از قدرت مدل در شبیه‌سازی سامانه‌های پویا و پیچیده را دارد.

آزمون رفتار

در مدل‌سازی سامانه‌های پویا علاوه بر ارزیابی مدل با استفاده از معیارهای بخش قبلی، بر استفاده از آزمون رفتار نیز تاکید شده است (Paimozd, 2021). این آزمون نشان دهنده رفتار مدل در حد (مرز) می‌باشد. کارایی مدل در شرایط حدی مشخص می‌سازد که مدل اطمینان پذیری قابل قبولی برای تصمیم‌گیری و اتخاذ گزینه مناسب دارد. برای انجام این آزمون با در نظر گرفتن مقادیر بسیار بزرگ برای ورودی آبدهی‌ها و مقادیر بسیار کوچک (صفر) رفتار مدل در هر دو شرایط بررسی می‌شود. از آنجائی که در صورت وارد کردن مقادیر

بسیار بزرگ به مدل، نتایج تخصیص منابع آب سطحی قابل پیش‌بینی می‌باشد، لذا در این پژوهش تنها به بررسی رفتار مدل در شرایط حدی با وارد کردن مقدار صفر برای تمام ورودی‌های ایستگاه‌ها انجام می‌شود. با توجه به اینکه علاوه بر معیارهای دیگر مدل‌ها، برای سنجش رفتار مدل دینامیکی تحقیق حاضر از آزمون رفتار استفاده شده است، برای درک بهتر، نمودارهای مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های این تحقیق، در شکل ارائه گردیده است. شکل نشانگر نتایج این آزمون با ورود مقدار حداقلی معادل صفر است. همان‌طور که از اشکال مشخص است، با در نظر گرفتن ورودی حداقلی برای جریان ورودی، مقادیر خروجی در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی صفر به دست آمده است. در واقع با لحاظ نمودن مقادیر صفر، برداشتی صورت نگرفته و عدم وجود مقادیر جریان رودخانه در ادامه به درستی شبیه‌سازی شده است. در غیر این‌صورت می‌بایست مقادیر خروجی منفی اعلام می‌گردید.



شکل ۷. نتایج آزمون رفتار در ایستگاه‌های منتخب منطقه مطالعاتی

شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص ماهانه از رودخانه و سد

شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص از رودخانه

برای سنجش دقیق‌تر رفتار برداشت منابع آب منطقه مطالعاتی در مقیاس ماهانه در بازه زمانی ۹۰-۱۳۶۹ شبیه‌سازی شد. برای این کار همانند شبیه‌سازی با گام زمانی سالانه، تمامی آمار اطلاعات اعم از طبیعی سازی آبدهی‌ها، محاسبه جریان میانی حوضه‌ها و غیره انجام پذیرفت. طبیعی سازی آبدهی با استفاده از روش حذف روند (روش وزارت نیرو) استفاده شد.

پس از آماده‌سازی اطلاعات و وارد کردن آن‌ها در نرم‌افزار ونسیم با گام زمانی ماهانه، منطقه مطالعاتی در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی انجام شده مطابق با شبکه هیدروگرافی چهار زیرحوضه مطالعاتی و منطبق با واقعیت در نرم‌افزار پیاده‌سازی شد. ارزیابی

مدل در این بخش، با استفاده از معیارهای $RMSE$ ، MAE و R^2 انجام شد. جدول نشان‌دهنده مقدار معیارهای مذکور در ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مطالعاتی می‌باشد.

جدول ۳. نتایج معیارهای ارزیابی مدل قبل از فعالیت سدها در مقیاس ماهانه

ایستگاه	MAE	RMSE	R^2	ایستگاه	MAE	RMSE	R^2
سورال	۰/۰۲۶	۰/۰۳۷	۰/۹۷۵	نساره علیا	۰/۰۴۰	۰/۰۷۰	۰/۹۸۵
دهگلان	۰/۰۹۰	۰/۱۳۵	۰/۹۸۲	زرده کمر	۰/۰۸۱	۰/۲۴۱	۰/۹۲۵
سنگ سیاه	۰/۱۳۱	۰/۱۸۳	۰/۹۸۰	سیر	۰/۰۱۱	۰/۰۹۵	۰/۸۱۷
چسن خان	۰/۰۲۷	۰/۰۳۹	۰/۹۴۸	بیانلو	۰/۱۱۳	۰/۱۹۱	۰/۹۴۹
پای پل دلبران	۰/۰۷۷	۰/۱۲۳	۰/۹۷۲	چسب	۰/۰۷۳	۰/۱۶۳	۰/۷۶۹
شادی آباد	۰/۰۱۶	۰/۰۵۳	۰/۹۷۶	منداق	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۹۸۸
گلیلاغ	۰/۰۵۶	۰/۰۸۹	۰/۹۰۵	باباخان	۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۹۷۸
سلامت آباد (مهرآباد)	۰/۰۳۸	۰/۰۵۱	۰/۹۶۸	شیخ بشارت	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۹۳۸
تالوار	۰/۰۵۰	۰/۰۶۹	۰/۹۴۸	هشتاد جفت	۰/۰۲۳	۰/۰۳۵	۰/۹۶۹
سیازخ	۰/۰۱۸	۰/۱۵۳	۰/۹۹۵	قره‌گونی	۰/۰۲۱	۰/۰۲۲	۰/۹۵۶
آله دره (سارال)	۰/۰۱۸	۰/۱۵۳	۰/۹۹۵	ماه‌نشان	۰/۱۹۹	۰/۲۸۴	۰/۹۶۶

با توجه به جدول در شبیه‌سازی صورت پذیرفته، ایستگاه ماهنشان با مقدار ۰/۱۹۹ دارای بیشترین مقدار خطا می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار خطای ایستگاه ماهنشان در محدوده خوب و قابل قبول است. با توجه به اینکه ایستگاه ماهنشان به‌عنوان آخرین ایستگاه در این سامانه می‌باشد، مقادیر خطای تمامی ایستگاه‌های قبل می‌توانند بر روی آن اثرگذار باشند. لذا با نزدیک شدن به انتهای شبکه هیدروگرافی در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی، مقادیر خطا کمی افزایش می‌یابند. همچنین کمترین مقدار این شاخص، برابر با ۰/۰۰۴ در ایستگاه منداق می‌باشد. ایستگاه منداق یک بازه کاملاً جدا از سایر بازه‌ها بوده و هیچ کدام از فعالیت‌های درون سایر بازه‌ها بر روی آن تأثیر ندارد. به همین دلیل، مدل در این ایستگاه دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد. با توجه به اینکه هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است، از جدول مشاهده می‌شود که مقادیر این معیار در تمامی ایستگاه‌ها در وضعیت مطلوبی قرار دارند.

معیار $RMSE$ نیز مانند معیار قبل، نشانگر مقدار خطای رخ داده در شبیه‌سازی انجام شده است. این معیار با استفاده از جذر توان دوم مقدار تفاضل داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده تقسیم بر تعداد داده‌ها، به برآورد خطای موجود می‌پردازد. همان‌طور که از جدول مشخص است، ایستگاه ماهنشان با مقدار ۰/۲۸۴ بیشترین مقدار در این معیار را دارد. این مقدار خطا، علاوه بر تأثیرپذیری از فعالیت‌های درون بازه قره‌گونی، از مقدار خطای ایستگاه‌های بالادست آن نیز تأثیر می‌پذیرد. بازه‌هایی که رواناب خروجی آن‌ها مستقیم به این ایستگاه می‌ریزند عبارت‌اند از: تالوار، بیانلو، چسب، منداق و هشتادجفت. در بین ایستگاه‌های مذکور، دو ایستگاه بیانلو و چسب به ترتیب با مقدار خطای ۰/۱۹۱ و ۰/۱۶۳ دارای خطای بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌های نام برده می‌باشند که مقادیر خطاهای فوق، بر میزان دقت شبیه‌سازی انجام شده در ایستگاه پایین دست تأثیرگذار است. به دلیل تأثیرپذیری ایستگاه ماهنشان از این ایستگاه‌ها، مقدار شاخص $RMSE$ در ایستگاه ماهنشان دارای بیشترین مقدار است. کمترین مقدار این شاخص نیز برابر با ۰/۰۰۶ مربوط به ایستگاه منداق می‌باشد. از آنجایی که معیارهای MAE و $RMSE$ تقریباً همانند یکدیگر و از روش مشابهی برای سنجش خطا استفاده می‌کنند، نتایج آن‌ها نیز تقریباً یکسان به دست آمده است. همانند MAE هرچه مقدار $RMSE$ کمتر و نزدیک به صفر باشد، بیانگر نتیجه مطلوب‌تری می‌باشد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول مشخص است که شبیه‌سازی صورت گرفته، دارای مقدار $RMSE$ قابل قبولی می‌باشد.

دو معیار فوق و نیز شاخص R^2 ، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی و میزان برداشت و تخصیص از آب‌های سطحی به بخش کشاورزی می‌باشد.

شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص از رودخانه و سد

در این بخش لازم بود اطلاعاتی همانند حجم مرده سدها، حجم مفید مخازن سدها و میزان توسعه اراضی پس از احداث سدها نیز وارد مدل شوند. در مدل‌سازی باید این نکته را در نظر گرفت که شرط اولیه بهره‌برداری از سد، بیشتر بودن میزان حجم آب موجود در آن نسبت به حجم مرده سد است. همچنین می‌بایست درصد افزایش سطح زیر کشت پس از احداث سدها را نیز در مدل وارد کرد. پس از اجرای

مدل در مقیاس ماهانه پس از فعالیت سدها، همانند سایر بخش‌ها نتایج حاصل از مدل ارزیابی شد. به طور کلی تفاوت در مدل پس از فعالیت سدها، افزایش سطح زیر کشت پس از فعال شدن سدها، افزایش راندمان پس از احداث سدها و شبکه‌های انتقال آب، اعمال زمان‌بندی در رهاسازی آب از سد برای مصارف پایین دست می‌باشد. راندمان آبیاری برای هر بازه که دارای سد می‌باشد، در دو مقطع قبل از احداث سد و پس از احداث سد وارد مدل گردیده است. همچنین توسعه اراضی یا همان میزان مساحت اراضی تحت کشت نیز قبل و بعد از احداث سدها وارد مدل شده تا آمار و اطلاعات وارد شده به نرم‌افزار، مطابق با واقعیت موجود باشند. در این مرحله از شبیه‌سازی، برداشت آب از سد مطابق با واقعیت منطقه می‌باشد به گونه‌ای که طی ۶ ماه اول سال آبی (مهر الی اسفند) برداشت از رودخانه و طی ۶ ماه دوم سال آبی (فروردین الی شهریور) برداشت از سد می‌باشد. شبیه‌سازی طی سال‌های ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸ صورت گرفته است و هر یک از سدها، در سال بهره‌برداری به منطقه وارد شده‌اند. نتایج حاصل از ارزیابی مدل با استفاده از معیارهای MAE، RMSE و R^2 در جدول ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج معیارهای ارزیابی مدل پس از اعمال فعالیت سدها در مقیاس ماهانه

ایستگاه یا سد	MAE	RMSE	R^2	ایستگاه یا سد	MAE	RMSE	R^2
سورال	۰/۰۲۶	۰/۰۳۰	۰/۹۹۳	نساره علیا	۰/۰۳۰	۰/۰۷۷	۰/۹۶۵
دهگلان	۰/۰۸۲	۰/۱۱۷	۰/۹۸۴	زرده کمر	۰/۰۵۳	۰/۲۰۶	۰/۹۲۸
سنگ سیاه	۰/۰۸۸	۰/۱۰۱	۰/۹۹۷	سیر	۰/۰۰۳	۰/۰۶۷	۰/۸۵۷
حسن خان	۰/۰۲۶	۰/۰۶۱	۰/۹۵۶	بیانلو	۰/۰۹۷	۰/۲۸۹	۰/۹۵۴
پای پل دلبران	۰/۰۷۳	۰/۱۱۶	۰/۹۷۰	چسب	۰/۰۲۲	۰/۰۸۶	۰/۹۰۸
شادی آباد	۰/۰۰۶	۰/۰۵۱	۰/۹۷۳	منداق	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۹۹۷
گلپلاغ	۰/۰۴۹	۰/۰۷۷	۰/۹۱۳	باباخان	۰/۱۶۲	۰/۲۷۰	۰/۹۶۳
سلامت آباد (مهرآباد)	۰/۰۳۶	۰/۰۸۰	۰/۹۶۹	شیخ بشارت	۰/۰۱۰	۰/۰۳۳	۰/۹۴۹
تالوار	۰/۰۴۴	۰/۰۹۰	۰/۹۷۴	هشتاد جفت	۰/۰۱۳	۰/۰۴۷	۰/۹۷۲
سیازاخ	۰/۰۱۷	۰/۱۲۴	۰/۹۵۸	ماه‌نشان	۰/۰۰۷	۰/۰۶۳	۰/۹۵۰
آله دره (سارال)	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۹۵۸	قره‌گونی	۰/۰۰۸	۰/۰۷۱	۰/۹۴۸

با مقایسه جدول با جدول مشخص است که مقادیر خطای هر دو معیار MAE و RMSE در مدل پس از فعالیت سدها نسبت به حالت غیرفعال بودن سدها افزایش یافته است. در ماه‌های پرآب سال، بخشی از جریان موجود در رودخانه، در مخازن سدها ذخیره می‌گردد تا در ماه‌های کم آب سال رهاسازی شود. همچنین پس از احداث سد، رهاسازی آب در رودخانه، براساس نیاز پایین دست می‌باشد. عوامل مذکور می‌توانند سبب افزایش خطا و ایجاد اختلاف میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی شوند. با توجه به جدول بیشترین مقدار MAE برابر با ۰/۱۶۲ مربوط به ایستگاه باباخان است که این مقدار در محدوده قابل قبولی قرار دارد. همچنین کمترین مقدار MAE در ایستگاه سیر برابر با ۰/۰۰۳ می‌باشد. عدم وجود بازه دیگری در بالادست سیر، سبب شده تا این ایستگاه تحت تاثیر تغییر جریان هیچ بازه دیگری قرار نداشته باشد.

بیشترین مقدار RMSE نیز در ایستگاه بیانلو با مقدار ۰/۲۸۹ می‌باشد. قرار گرفتن سدهای سیازاخ، آله‌دره (سارال) و زرده کمر در بالادست این ایستگاه، روند رواناب رودخانه را تحت تاثیر قرار داده و همین عامل، سبب افزایش خطا در ایستگاه بیانلو شده است. با این وجود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده در حد بالایی مورد قبول می‌باشد.

با بررسی مقادیر ضریب تبیین (R^2) نیز مشخص است که مقدار به دست آمده برای این معیار نیز مورد قبول می‌باشد. کمترین مقدار ضریب تبیین در سد سیر با مقدار ۰/۸۵۷ می‌باشد که مقدار قابل قبولی در سنجش مدل است. همچنین با بررسی نمودارهای دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، مشخص گردید که مدل نتایج قابل قبولی را ارائه کرده و توانایی لازم برای شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی را داشته است. جهت بررسی دقیق‌تر نتایج، نمودارهای مقایسه دبی محاسباتی (Simulation) و دبی مشاهداتی (Observation) در برخی از ایستگاه‌ها (به دلیل محدودیت فضا) در شکل شده است.



شکل ۸. مقایسه جریان ماهانه مشاهداتی و محاسباتی تحت تأثیر احداث سد‌ها طی سال‌های ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸

مقایسه خروجی‌ها تحت تأثیر وجود و عدم وجود سد

محدوده مطالعاتی این پژوهش از نظر منابع آب سطحی، منطقه‌ای غنی به شمار می‌آید، به همین دلیل در دهه گذشته سد‌های مخزنی بسیاری در این حوضه احداث گردیده است. این سد‌ها سبب کنترل جریان رودخانه‌ها توسط استان‌های بالادستی شده و استان‌های پایین دست را با چالش مواجه ساخته است. به صورتی که در بیشتر مواقع سال شاهد جریان ناچیز یا عدم وجود جریان در پایین دست سد‌ها هستیم. نکته حائز اهمیت در خصوص نمودارها، اختلاف دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از حدود سال ۱۳۹۰ به بعد می‌باشد. در نمودارهای ارائه شده از سال ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۸ مقدار جریان شبیه‌سازی بیشتر از جریان مشاهداتی می‌باشد. جهت بررسی بیشتر و دلیل وقوع این اتفاق، مقایسه خروجی از ایستگاه‌ها (و سد‌ها) پس از احداث سد‌ها صورت گرفت. این مقایسه حدوداً از زمان بهره‌برداری سد‌ها تا انتهای دوره شبیه‌سازی، جدا شده تا نتایج بهتر ملاحظه گردند و وضوح بیشتری داشته باشند (شکل ۹). در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد که حتی با وجود افزایش سطح زیر کشت برنامه‌ریزی شده برای هر بازه و اعمال آن در مدل، مقادیر جریان مشاهداتی کمتر از مقادیر جریان محاسباتی بوده است. نتایج حاصل از مقایسه خروجی محاسباتی با مقادیر مشاهداتی، از همه مهم‌تر روند تغییرات خروجی‌ها، نشان‌دهنده دقت و صحت شبیه‌سازی می‌باشد و از آنجا که مدل در مقیاس سالانه و ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفته است و در تمام بازه‌ها، افزایش و بهبود اراضی تحت کشت و نیز حداکثر و حداقل حجم سد‌ها مطابق با مقادیر اعلام شده به مدل وارد شده است، لذا بحث در خصوص چگونگی افزایش برداشت، باید در منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد. چرا که اگر شبیه‌سازی به دلیل ورود سد‌ها دچار اختلال می‌شد، روند تغییرات به گونه‌ای دیگر و مطابق با روند مشاهدات نبود. لذا بین بازه‌های کل منطقه عاملی سبب ایجاد چنین اختلافی گشته است.

در بازه سورال، پس از احداث سد سورال و کنترل جریان رودخانه، مقدار جریان در پایین دست بازه، کاهش محسوسی داشته است. در بازه دهگلان که فاقد سد می‌باشد، نیز کاهش محسوس جریان مشاهده می‌شود. بازه حسن خان نیز فاقد سد بوده و تأثیرات سد‌های سورال و سنگ سپاه که در بالادست آن قرار دارند، روی آن مشاهده می‌گردد. اما آنچه که فرضیه تأثیر سد را به چالش می‌کشد، بازه‌هایی هستند که سدی در آن‌ها احداث نشده و پایین دست آن‌ها نیز هیچ سدی نبوده و خود بر روی شاخه‌ای مستقل واقع شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در بازه‌های شادی آباد و حتی پای‌دلبران که مستقل از دیگر بازه‌ها می‌باشند و در این بازه‌ها سدی احداث نگردیده نیز

جریان مشاهداتی کمتر از جریان محاسباتی بوده است. این مسئله با شدت‌های مختلف، در تمام بازه‌ها به چشم می‌خورد. در واقع در تمام بازه‌ها، چه در بازه‌هایی که در آن‌ها سد احداث شده و چه در بازه‌هایی که سدی در آن‌ها احداث نشده، جریان مشاهداتی کمتر از جریان محاسباتی می‌باشد.



شکل ۹. مقایسه جریان ماهانه مشاهداتی و محاسباتی تحت تأثیر احداث سدها

از آنجا که مصارف خدمات و صنعت در محدوده‌های مطالعاتی، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و همچنین تغییر راندمان در مدل لحاظ شده است، پس دو احتمال برای کاهش جریان مشاهداتی از بازه‌ها در نظر گرفته می‌شود:

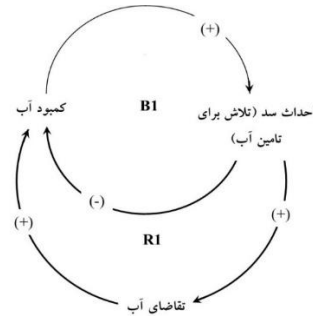
- ۱- کاهش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی و جبران آن از منابع آب‌های سطحی
 - ۲- افزایش سطح زیر کشت بیش از مقدار برنامه‌ریزی شده برای هر بازه و برداشت بیشتر از منابع آب‌های سطحی
- از آنجا که روند نمودارهای جریان مشاهداتی و محاسباتی، مشابه است و در تمام بازه‌ها، نمودارها دارای تطابق روند کافی هستند، رفتار منطقه با کمک الگوهای رفتاری^۱ (مختص به سیستم دینامیک) بازه‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت. این الگوها، متأثر از متغیرهای موجود در مدل هستند که در این پژوهش، مطابق با واقعیت به مدل معرفی شده‌اند، لذا بررسی دقیق آن‌ها می‌تواند دلیل امر فوق را نمایانگر ساخته و متغیر مرجع، صحت آن را تأیید نماید.

رفتار الگوی شکست^۲

در مسائل بدخیم، ارائه راه‌حل‌های تک‌بعدی شاید در کوتاه مدت سبب حل مشکل گردد، اما در بلند مدت سبب بروز پیامدهای بسیار منفی خواهد شد. از آنجا که با احداث سدها در منطقه مشکل کمبود منابع آب حل نشده است، به نظر می‌رسد الگوی شکست در منطقه فعال شده است. شکل ۱۰ الگوی شکست را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

۱. Generic Archetype

۲. Fixes That Fail



شکل ۱۰. الگوی شکست بالادست حوضه سفید رود

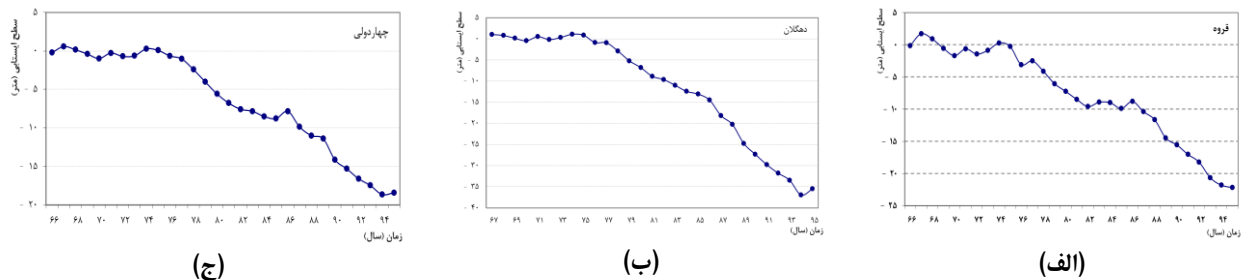
در شکل ۱۰ حلقه‌های تعادلی B1 و تقویتی R1 نشان داده شده است. در هنگام مواجهه شدن با مشکل کمبود آب، تلاش برای تأمین آب افزایش یافته است (احداث سد). در واقع راه‌حل مقطعی، احداث سد به منظور تلاش برای تأمین آب بوده است. همین موضوع به واسطه درمان مقطعی سبب افزایش تقاضای آب طی زمان (معضل پیش‌بینی نشده) می‌شود. بسته به نوع منطقه یا مشکل موجود زمان مطرح شده می‌تواند متغیر باشد. درنهایت این عامل قابلیت کنترل فرآیند B1 را در مواجهه با کمبود آب، کاهش می‌دهد. در حقیقت چنین به نظر می‌رسد که در منطقه مطالعاتی به دلیل کمبود منابع آب در راستای جبران فعالیت‌های کشاورزی، احداث سدها مد نظر قرار گرفته است. اما نکته اصلی پنهان شده این است که با احداث سدها، تصور وجود منابع آب کافی ایجاد شده و تقاضای منابع آب افزایش داشته است و همین موضوع سبب تشدید کمبود آب می‌گردد. حال در صورتی که این الگو مطابق با واقعیت منطقه باشد، متغیر مرجع مرتبط با این موضوع، آبخوان‌ها می‌باشند. بررسی این متغیر مرجع صحت تشخیص الگوی فوق و دلیل افزایش برداشت (معضل پیش‌بینی نشده) خواهد بود.

متغیر مرجع الگوی شکست در منطقه

برای به تصویر کشیدن الگوهای رفتاری، نیاز به شناسایی مواردی می‌باشد که تحت تأثیر آن، سایر متغیرها و عوامل نیز تغییر می‌کنند. در شبیه‌سازی دینامیکی، متغیرهایی وجود دارند که رفتار درون سیستم را به تصویر می‌کشند. به این متغیرها، متغیرهای مرجع گفته می‌شود (Paimozd, 2021). در ادامه متغیر مرجع مرتبط با الگوی راه‌حل‌های شکست خورده بررسی می‌شود.

بررسی منابع آب زیرزمینی

این محدوده دارای سه آبخوان قروه، دهگلان و چهاردولی می‌باشد. آبنمود هر سه آبخوان در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار میانگین تجمعی تغییرات سطح آب زیرزمینی (الف) قروه، (ب) دهگلان و (ج) چهاردولی

با مشاهده نمودارهای مربوط به آبنمود سه آبخوان، مشخص است که در حدود سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ کاهش موقتی برداشت و پس از سال ۱۳۸۶ افزایش برداشت رخ داده است. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، سطح ایستابی آبخوان قروه از ابتدای تأسیس شبکه سنجش (۱۳۶۵) تا سال ۱۳۹۵، ۲۲/۱۷ متر افت داشته است. همچنین در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵، سطح ایستابی این آبخوان ۶/۶۲ متر افت داشته است. میانگین تغییر سطح ایستابی آبخوان قروه برابر ۰/۷۴- متر و میانگین تغییر حجم آبخوان ۱/۸۷- میلیون مترمکعب بوده است. در آبخوان دهگلان نیز از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۵، سطح ایستابی ۳۵/۴۹ متر افت داشته و در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵، سطح ایستابی این آبخوان ۸/۱۷ متر کاهش یافته است. میانگین تغییر سطح ایستابی آبخوان دهگلان برابر ۱/۲۲- متر و میانگین تغییر حجم آن ۱۸/۱۴- میلیون مترمکعب بوده است. در آبخوان چهاردولی از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵، سطح ایستابی ۱۸/۴۲ متر افت داشته و در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵، سطح ایستابی این آبخوان ۴/۲۶ متر پایین‌تر رفته است. میانگین تغییر سطح ایستابی آبخوان چهاردولی برابر ۰/۶۱- متر و میانگین تغییر حجم آن ۲/۹۶- میلیون مترمکعب بوده است.

موارد فوق نشان می‌دهد در کنار کاهش دبی‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و برداشت از منابع آب سطحی در سطح حوضه، سطح آبخوان‌های حوضه آبریز قروه دهگلان افت شدیدی داشته است.

برای بررسی میزان افت آبخوان‌ها دوره زمانی بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب این دوره آبریزی تمام سدها در این دوره یا قبل از سال ۹۰ بوده است. در حوضه قروه دهگلان که دارای سه آبخوان قروه، دهگلان و چهار دولی می‌باشد، قبل از احداث سدها میانگین افت هریک از آبخوان‌ها به ترتیب برابر ۰/۷۴، ۱/۲۲- و ۰/۶۱- بوده است. اما پس از احداث سدهای سورال، سنگ‌سیاه و گلبلاغ در این حوضه، میزان افت آبخوان‌ها به ترتیب برابر ۱/۱۰-، ۱/۳۶- و ۰/۷۱- می‌باشد. در حوضه آبریز دیواندره بیجار نیز پس از بهره‌برداری از سدهای زرده‌کمر، سیر، سیازخ و آله‌دره، میانگین افت سطح آب زیرزمینی برابر ۰/۳۵- می‌باشد. در حالی که قبل از احداث سدها میانگین افت سطح آب زیرزمینی برابر ۰/۱۳- بوده است. بعد از بهره‌برداری از سدهای تالوار، چسب و منداق در حوضه گل‌تپه-زرین‌آباد به طور میانگین در هر سال سطح آب زیرزمینی ۰/۸۵- افت داشته است. اما قبل از احداث سدهای مذکور در حوضه گل‌تپه-زرین‌آباد میانگین افت سطح آب زیرزمینی ۰/۷۳- بوده است.

مشخص است که پس از احداث سدها، نه تنها میزان برداشت از آبخوان‌ها کاهش نیافته است، بلکه فشار بیش‌تری نیز به منابع آب زیرزمینی وارد شده است. همان‌طور که بیان شد با توجه به شکل ۱۱، که نشان دهنده تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشند، در ابتدای بهره‌برداری از سدها، در یک دوره زمانی کوتاه مقدار برداشت از آبخوان‌ها کاهش یافته است، اما با فعال شدن حلقه‌های تقویتی موجود در هر یک از حوضه‌ها، پیامدهای الگوی راه‌حل‌هایی که شکست می‌خورند نمایان شده است. این پیامد وارد شدن بیش‌تر به منابع آب زیرزمینی یا برداشت بیش‌تر نسبت به قبل از این منابع می‌باشد. مشخص است که احداث سدها نتوانسته است در بلند مدت نتیجه مثبتی برای بهره‌برداری از منابع آب داشته باشد و افزایش برداشت از منابع آبهای زیرزمینی در بخش کشاورزی را به دنبال داشته که با نتایج احمدی و سودمند افشار (۱۳۹۹) مطابقت دارد.

به طور کلی می‌توان گفت که در چهار حوضه قروه دهگلان، دیواندره بیجار، گل‌تپه زرین‌آباد و ماهنشان انگوران جهت مقابله با مشکل کمبود آب سدسازی انجام شده است. اما نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده افزایش برداشت از منابع آب شده است، به طوری که دبی‌های مشاهداتی کمتر از دبی‌های شبیه‌سازی هستند. توجه به الگوهای رفتاری مشخص می‌کند که الگوی محدودیت رشد سبب احساس تقویت منابع آب در دسترس و عدم کمبود منابع آب شده است. به همین دلیل سطح زیر کشت افزایش یافته است (راه‌حل‌های شکست خورده). این رفتارها نشان می‌دهند علی‌رغم کاهش دبی در سال‌های اخیر، احداث سد (راه‌حل مقطعی) سبب برداشت بیشتر از منابع آب سطحی و همین‌طور منابع آب زیرزمینی شده و افزایش سطح زیر کشت به وجود آمده است. این نتیجه در تحقیق امینی و همکاران (۱۳۹۵) نیز بدست آمده است. این عوامل در دراز مدت با افت بیش از حد سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش منابع آب سطحی، بحران کمبود آب در منطقه مطالعاتی را افزایش خواهد داد.

رفتار درون زیرحوضه‌ها

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، در تمام بازه‌ها نیاز آب افزایش پیدا کرده است. لذا بنظر می‌رسد رقابت بین ذینفعان سبب فعال شدن الگویی گردیده که در اثر افزایش تقاضای آب و برداشت بیشتر منابع آبی در بازه‌های بالادست، بازه‌های پایین‌دست احساس خطر می‌کنند. به عبارت دیگر افزایش بهره‌برداری از منابع آب در بازه‌های بالادستی سبب تهدید بازه پایین‌دست شده و باعث می‌شود تا بازه پایین‌دست اقدام به فعالیت بیشتر و تشدید بهره‌برداری از منابع آب نماید. این عامل سبب به وجود آمدن الگوی رفتاری گسترش تدریجی بین بازه‌های موجود در محدوده شده است.

رفتار الگوی گسترش تدریجی^۱

الگوی گسترش تدریجی از احساس به خطر افتادن منافع هریک از بهره‌برداران از رفتار یا اقدامات سایر بهره‌برداران جهت دستیابی به منابع بیشتر به وجود می‌آید. با احساس خطر در هر بهره‌بردار، وی نیز اقدام به افزایش بهره‌برداری از منابع می‌نماید. دو حلقه تعادلی^۲ تشکیل دهنده این مکانیزم، سبب به وجود آمدن یک حلقه تقویتی^۳ می‌شود. این حلقه تقویتی افزایش فعالیت و برداشت منابع بیشتر را در

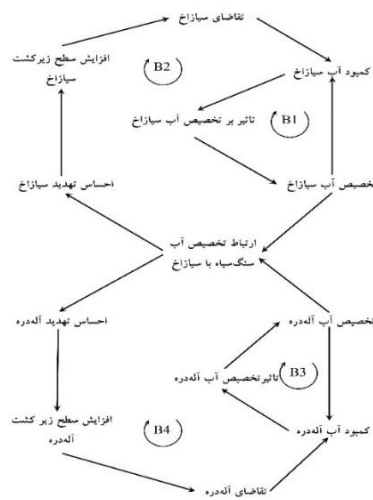
۱. Escalation

۲. Balancing

۳. Reinforcing

پی خواهد داشت. شکل ۱۲ ساختار الگوی گسترش تدریجی را نشان می‌دهد. به تبع الگوی گسترش تدریجی هریک از ذی‌نفعان در اثر برداشت منابع آب در بالادست احساس خطر کرده و اقدام به برداشت بیش‌تری از منابع آب و پیدا کردن راه‌حلی برای افزایش تأمین آب خواهند بود. برای شفافیت موضوع در شکل ۱۲ الگوی رفتاری گسترش تدریجی بین دو بازه سیازاخ و آله‌دره ترسیم گردیده است.

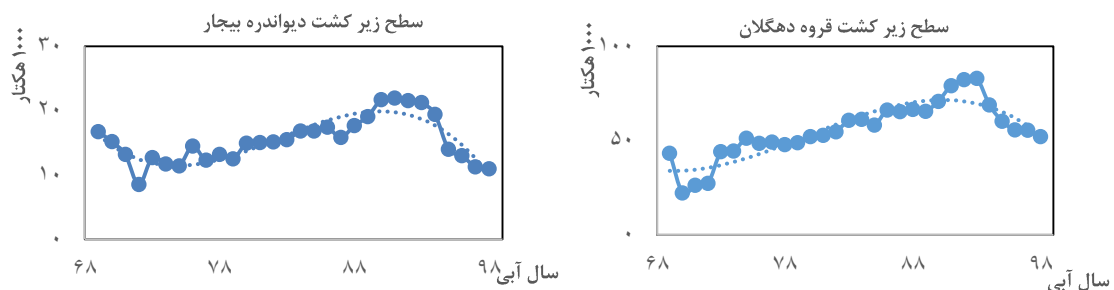
در شکل ۱۲ B2 و B4 نشان دهنده الگوی گسترش تدریجی در منطقه هستند که حلقه B2 شامل فعالیت بازه سیازاخ و حلقه B4 عکس‌العمل بازه آله‌دره در برابر افزایش فعالیت‌های بازه بالادست می‌باشد. مجموع این دو حلقه یک مکانیزم رشد شکل داده و بدون توجه به محدودیت منابع، خواستار رشد به سمت بی‌نهایت می‌باشند. عدم توجه به محدودیت منابع در مکانیزم رشد، سبب پدیدار شدن مکانیزم‌هایی مانند راه‌حل‌های شکست خورده و محدودیت رشد شده است. مکانیزم راه‌حل‌های شکست خورده در درون الگوی تهدید قرار گرفته است و توجه نکردن به نتایج حاصل در مورد طرح‌های آبی (احداث سد)، سبب افزایش تقاضا با افزایش سطح زیر کشت و افزایش کمبود منابع آب خواهد شد. به عبارتی ساده‌تر هر یک از بازه‌ها در پی تهدید از جانب ذینفع بالادستی یا همجوار خود، سعی در احداث سد یا افزایش سطح داشته است که همان الگوی راه‌حل‌های شکست خورده را فعال می‌نماید. در حقیقت، برداشت بیشتر، از منابع آبی که مدام رو به کاهش است. بررسی سطح زیر کشت بازه‌ها می‌تواند تایید فعالیت الگوی فوق در منطقه و بین بازه‌ها باشد.



شکل ۱۲. ساختار الگوی رفتاری گسترش تدریجی بین بازه‌های سیازاخ و آله‌دره

متغیر مرجع الگوی گسترش تدریجی

از آنجا که تعداد بازه‌ها اندک نیستند نمودار سطح زیر کشت دو منطقه قروه دهگلان و دیواندره بیجار در ادامه آمده است.



شکل ۱۳. تغییرات سطح زیر کشت دیواندره بیجار و قروه دهگلان طی سال‌های ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸

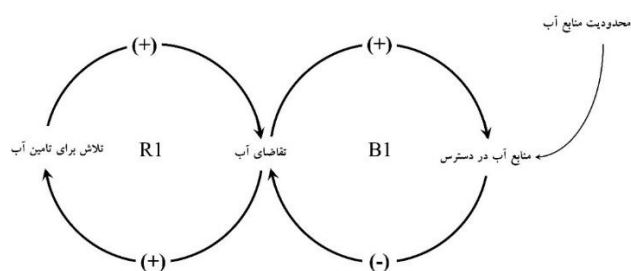
مشاهده این دو نمودار در شکل ۱۳ نشانگر این مطلب است که سطح زیر کشت دو منطقه قروه دهگلان و دیواندره بیجار، رو به افزایش است و این افزایش در حوالی سال ۱۳۹۰ که اغلب سدها شروع به فعالیت نموده‌اند، از شدت بیشتری برخوردار بوده است. از آنجا که سطح زیر کشت بهبود و توسعه در پی احداث سدها به مدل وارد شده‌اند، خروجی‌ها نشانگر این مطلب هستند افزایش سطوح بیش از

مقدار طرح شده در گزارش‌ها می‌باشند. متأسفانه در برخی بازه‌ها، حتی چنین الگوهایی، از سال ۱۳۸۳ با اطلاع از احداث اولین سد شروع شده است. به گونه‌ای که افزایش سطح زیر کشت بطور متوسط در کل منطقه ۲/۸ برابر، در بالاترین رقم ۴ برابر و در پایین‌ترین مقدار ۱/۶ برابر افزایش داشته است. در یک نتیجه کلی چنین می‌توان اظهار داشت که در کل منطقه افزایش سطح زیر کشت به چشم می‌خورد که با نتایج قادر زاده و کریمی (۱۳۹۷) مطابقت دارد.

این نمودارها اثبات وجود الگوی گسترش تدریجی در کلیه بازه‌ها و منطقه است که در پی احساس تهدید هر یک از بازه‌ها واکنش نشان داده و سبب افزایش سطح زیر کشت کل منطقه شده است. از آنجا که در اکثر بازه‌ها پس از فعالیت سدها، کاهش منابع آب محاسباتی نسبت به مقادیر مشاهداتی (شکل ۹) دیده شد، این الگو در تمام منطقه فعالیت داشته و سبب برداشت بی‌رویه از منابع خواهد شد تا جایی که محدودیت این منابع خود را نشان دهند. در واقع نتایج نشان می‌دهد سطوح زیر کشت تعیین شده بیشتر از پتانسیل منطقه است که در تحقیق امینی و همکاران (۱۳۹۵) نیز چنین نتیجه‌ای به دست آمده است. همانگونه که مشاهده شکل ۱۳ نشان می‌دهند، در ادامه رشد صعودی افزایش سطوح زیر کشت، طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ کاهش سطح زیر کشت مشاهده می‌گردد که همان فعالیت الگوی محدودیت رشد است و در واقع بروز محدودیت منابع آب است که خود را نمایان ساخته و سبب بروز چنین پیامدی گردیده است.

رفتار الگوی توقف یا نزول رشد

الگوی توقف یا نزول رشد بر اساس این فرضیه که هیچ فرآیند رشدی نمی‌تواند بدون محدودیت تداوم داشته باشد تعریف می‌شود. در هر فرآیند رشد محدودیت‌هایی وجود دارند که در نهایت شناخته می‌شوند. در این الگو یک یا چند فرآیند باز خورد مرحله رشد را تقویت می‌کنند. به تبع آن یک محدودیت، فرآیند متعادل کننده را به وجود آورده و حرکت سامانه را کند می‌کند. این محدودیت می‌تواند به شکل کمبود منابع یا عکس‌العمل داخلی یا خارجی سیستم در برابر رشد سیستم باشد. شکل ۱۴ الگوی فوق برای منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

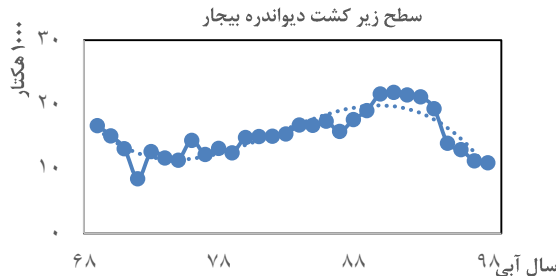


شکل ۲. محدودیت منابع آب در سیستم تخصیص منطقه مطالعاتی

همان‌طور که از الگوی رشد منابع آب در منطقه مطالعاتی مشخص است، ذهنیت وجود منابع آب، تلاش و رقابت برای برداشت بیش‌تر از منابع آب را تشدید می‌کند. محدودیت منابع آب موجود در هر بازه، سبب محدودیت منابع آب در دسترس خواهد شد. به همین دلیل تامین تقاضای آب تا حد منابع آب در دسترس امکان‌پذیر خواهد بود. علامت منفی موجود روی زنجیره شکل، بیان‌کننده این موضوع می‌باشد. با افزایش تقاضای تلاش برای تامین آب نیز افزایش خواهد یافت و همچنین با افزایش تامین منابع آب، تقاضای آب نیز روند مثبت در پیش خواهد گرفت و بیش‌تر خواهد شد. علامت‌های مثبت روی زنجیره شکل ۱۴ این ارتباط را نشان می‌دهد. حلقه تقویتی R1 میل به بی‌نهایت و رشد دارد. اما محدودیت منابع آب در دسترس و تأثیر آن بر رشد تقاضای آب سبب به وجود آمدن حلقه تعادلی B1 شده است که از رشد مداوم حلقه R1 جلوگیری می‌کند. همچنین منابع آب موجود در منطقه تحت تأثیر عوامل بیرونی مانند افزایش دما یا کاهش رواناب قرار گرفته‌اند. برآیند حلقه‌های B1 و R1 سبب به وجود آمدن مکانیزم محدودیت رشد در سامانه منابع آب منطقه مطالعاتی خواهد شد. به عبارت ساده‌تر می‌توان عنوان کرد یا تلاش برای تامین منابع آب بیشتر، مانند احداث سد، تقاضای آب نیز افزایش داشته است. این افزایش تقاضا از اختلاف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه‌هایی که در پایین سدهای منطقه مطالعاتی قرار گرفته‌اند، مشخص است. همان‌طور که در بخش‌های قبل مورد اشاره قرار گرفت، میزانی دبی شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های پایین‌دست سدها، بیشتر از دبی مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش تامین آب که با احداث سد و برداشت بیش‌تر از آب‌های زیرزمینی رخ داده است، سبب شده تا تقاضای آب نیز افزایش یابد. در محدودیت رشد پس از یک رشد سریع، با بروز عوامل محدودیت سبب می‌شوند تا رشد به حالت سکون یا حتی کاهشی داشته باشد.

متغیر مرجع الگوی توقف و نزول رشد

محدودیت منابع آب موجود در هر بازه، سبب محدودیت منابع آب در دسترس خواهد شد. به همین دلیل تامین تقاضای آب تا حد منابع آب در دسترس امکان پذیر خواهد بود. به عنوان نمونه شکل ۱۵ که نشان دهنده سطح زیر کشت دیواندره بیجار می باشد، تأیید کننده این موضوع است.



شکل ۳. تغییرات سطح زیر کشت دیواندره بیجار

همان گونه که از شکل ۱۵ مشخص است، سطح زیر کشت در حوضه روند افزایشی داشته است، اما در سال‌های آخر روند کاهشی گرفته و در سال ۱۳۹۴ کاهش بسیار شدیدی را تجربه کرده است. تایید فعالیت الگوی محدودیت رشد، کاهش سطح زیر کشت به دلیل محدودیت منابع آب می باشد که در نتایج اسعدی و نجفی علمدار لو (۱۳۹۸) نیز به آن اشاره شده است. نمودار نشان می دهد هیچ رشدی الی بی نهایت ادامه نداشته و در پی محدودیت‌های موجود، افول و نزولی با شیب چه بسا شدیدتر از روند صعودی خود داشته باشد. نتایج نشان می دهد برخورد سازه‌ای زمانی پاسخگو خواهد بود که کل ذینفعان منافع مشترک خود را در منطقه ببیند و نه به صورت منفرد که با نتایج (صدق آمیز و همکاران، ۱۴۰۰) مطابقت دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق مدل سازی دینامیکی تخصیص منابع آب سطحی با استفاده از الگوهای رفتاری در حوضه‌های آبریز قروه دهگلان، دیواندره بیجار، گل تپه زرین آباد و ماه نشان انگوران که از حوضه‌های بالادست حوضه سفیدرود می باشند، در دو مقیاس سالانه و ماهانه صورت گرفته است. دوره مورد نظر از سال ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۸ می باشد که با توجه به احداث سد های پی در پی در منطقه مطالعاتی حوالی سال ۱۳۹۰ شبیه سازی، طی دو دوره، قبل از فعالیت سدها و پس از فعالیت سدها مورد بررسی قرار گرفت.

برای انجام این مدل سازی ابتدا جریان طبیعی رودخانه‌ها با استفاده از روش حذف روند محاسبه گردید. سپس مدل مورد نظر در مقیاس سالانه مطابق با شبکه هیدروگرافی منطقه، با استفاده از آمار و اطلاعات دریافتی (جریان رودخانه، سطح زیر کشت کل و بین هر دو بازه، راندمان آبیاری و ...) اجرا شد. آزمون ساختار مدل در مقیاس سالانه با استفاده از معیارهای MAE معادل ۰/۰۹۸، RMSE معادل ۰/۰۸۷ و R^2 با مقدار ۰/۹۸۰ صحت و دقت مدل را تایید نمود. به موازات آزمون ساختار، آزمون رفتار نیز انجام و نتایج در مقیاس سالانه نشان از مطلوبیت خروجی‌های مدل و انطباق آن با واقعیت منطقه داشت. کمترین مقدار MAE متعلق به ایستگاه سلامت آباد با مقدار ۰/۰۱۵ و بیشترین مقدار MAE برابر با ۰/۳۳۱ متعلق به ایستگاه چسب محاسبه گردید. اعداد به دست آمده برای این معیار نشان دهنده دقت مدل در برآورد پارامترهای شبیه سازی شده بود. در مرحله بعد شبیه سازی در مقیاس ماهانه طی سال‌های ۱۳۶۹ الی ۱۳۹۰ انجام گردید. نتایج ارزیابی ساختار مدل با استفاده از معیارهای MAE، RMSE، R^2 به ترتیب معادل ۰/۰۵۲، ۰/۱۰۳ و ۰/۹۴۰ حاکی از تایید کارایی بالای مدل بود.

مرحله بعد ورود سدها به منطقه است. در این مرحله جهت تعدیل راندمان از ۳۷ درصد به حدود ۴۵ درصد افزایش داشته است. ارزیابی مدل در این مرحله نیز با استفاده از معیارهای MAE، RMSE، R^2 به ترتیب معادل ۰/۰۴۱، ۰/۰۹۴ و ۰/۹۵۰ دقت و صحت مدل را تایید نمود. اما آنچه که در این مرحله به چشم می خورد افزایش برداشت پس از فعالیت سدها است. از سال ۱۳۹۰ با آغاز فعالیت سدها افزایش برداشت در تمام بازه‌ها، چه با احداث سد و چه عدم احداث آن مشاهده گردید. به گونه‌ای که در برخی بازه‌ها این مقدار به حدود دو برابر اختلاف می رسد. از آنجا که رفتار و ساختار مدل مورد ارزیابی واقع گردیده بود، لذا این رخداد به رفتار منطقه در برخورد با احداث سدها

مرتبط بود. با بررسی منطقه و متغیرهای مرجع، الگوهای گسترش تدریجی، محدودیت رشد و راه حل‌های شکست خورده در این حوضه فعال شده‌اند. در منطقه حاضر، در برخورد با مشکل کمبود منابع آب، راه حل مقطعی (احداث سد) اجرا شده است که سبب تصور وجود منابع آب کافی سبب افزایش سطح زیر کشت گردیده است و در پی فعالیت الگوی گسترش تدریجی، تمام بازه‌ها، چه با احداث و چه عدم احداث سد، به چنین اقدامی دست زده‌اند. متأسفانه در برخی بازه‌ها، حتی چنین الگوهایی، از سال ۱۳۸۳ با اطلاع از احداث اولین سد شروع شده است. به گونه‌ای که افزایش سطح زیر کشت بطور متوسط در کل منطقه ۲/۸ برابر، در بالاترین رقم ۴ برابر و در پایین‌ترین مقدار ۱/۶ برابر افزایش داشته است. این امر برداشت بیشتر از آب‌های سطحی و حتی آب‌های زیر زمینی را به دنبال داشته است. نتایج نشان داد در کنار کاهش ۹۰ درصدی ورودی‌ها، با وجود افت آبخوان‌ها به مقدار متوسط ۳۰ متر در کل دوره، تا بیش از ۸ متر از سال ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۸ افت مجدد را تجربه نموده است. این الگو تأیید فعالیت راه‌حل شکست خورده در پی الگوی گسترش تدریجی است. در ادامه به دلیل محدودیت منابع آب و در برخورد با افزایش سطح زیر کشت در کل منطقه، در نتیجه فعالیت الگوی محدودیت رشد، سطح زیر کشت کاهش و نزول بسیار شدیدی تا حدود ۳ برابری داشته است. نتایج نشان می‌دهد برخورد سازه‌ای زمانی پاسخگو خواهد بود که کل ذینفعان منافع مشترک خود را در منطقه ببینند و نه به صورت منفرد. در نهایت چنین می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مورد مطالعه، تحت شرایطی که دیدگاه فعلی بر تامین آب، حاکم باشد، تخصیص حداقلی به پایین دست، افت عملکرد محصولات و تضعیف بخش کشاورزی را نتیجه خواهد داد.

“هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- احمدی، سلمان و سودمند افشار، رضا (۱۳۹۹). پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استانهای همدان و کردستان با استفاده از فن پراکنش‌گرهای دائمی. *مجله محیط زیست و مهندسی آب*، ۶(۳)، ۲۱۹-۲۳۳.
- اسعدی، محمدعلی و نجفی علمدارلو، حامد (۱۳۹۸). بررسی اثرات سیاست‌های کاهش منابع آب بر توسعه پایدار کشاورزی در دشت قروه استان کردستان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۲)، ۵۴۰-۵۵۱.
- امینی، عطا؛ حیدری، رنگین؛ حسینی، مجید و جلالی، نادر (۱۳۹۵). نقش منابع آب در آمایش سرزمین حوضه تلوار در استان کردستان. *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۸(۳)، ۳۲۲-۳۳۱.
- حسینی، سید احمد و باقری، علی (۱۳۹۱). مدلسازی پویایی سیستم منابع آب دشت مشهد برای تحلیل استراتژی‌های توسعه پایدار، *مجله آب و فاضلاب*، ۴(۴): ۲۸-۳۹.
- شفائی (۱۳۹۰). رفتارسنجی دینامیکی حوضه‌های آبریز با استفاده از مدل Vensim و برنامه‌ریزی ژنتیک، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، به راهنمایی محمد تقی اعلمی، دانشگاه تبریز، دانشکده عمران.
- فرجی، کتایون (۱۴۰۱). مدل‌سازی پویایی سامانه تخصیص آب‌های سطحی با استفاده از الگوهای رفتاری (منطقه مطالعاتی: استان کردستان). *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، به راهنمایی شهلا پامزد، دانشگاه اراک، دانشکده کشاورزی.
- قادر زاده، حامد؛ کریمی، مهین (۱۳۹۷). تأثیر سیاست سهمیه بندی آب بر مصرف آب‌های زیرزمینی در دشت قروه-دهگلان. *اقتصاد کشاورزی*، ۱۲(۴)، ۹۸-۷۳.
- قدوسی، میثم؛ سعید و دلاور مجید (۱۳۹۲). مقایسه روش‌های روند زدایی در سری زمانی بارش و دما. *نشریه هواشناسی کشاورزی*، ۱(۲)، ۴۵-۳۲.
- صدق آمیز، عباس؛ نیکو، محمد رضا و حیدر پور، منوچهر (۱۴۰۰). تدوین یک مدل بهینه‌سازی تخصیص تلفیقی منابع آب و سطح زیر کشت با کاربرد تئوری بازیها، مطالعه موردی اراضی پایین دست سد مخزنی نرماب. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی منابع آب*، ۱۴(۵۰)، ۱-۱۶.
- گزارش برنامه‌ریزی منابع و مصارف (۱۳۹۸). وزارت نیرو. جلد ۵.
- کدخداحسینی، مصطفی؛ شامحمدی، شایان؛ نوذری، حامد و میرعباسی نجف آبادی، رسول (۱۳۹۷). بررسی تأثیر انتقال آب در تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از رویکرد پویایی سیستم. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*، ۹(۳۴)، ۶۶-۷۰.



REFERENCES

- Abdi-Dehkordi, M., Bozorg-Haddad, O., Salavitabar, A. & Goharian, E. (2021). Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 23(11), 16246-16282. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01340-0>
- Ahmad, S. & Simonovic, S. P. (2000). System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of computing in civil engineering*, 14 (3), 190-198. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2000\)14:3\(190\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2000)14:3(190))
- Ahmadi, S. and Soudmand Afshar, R. (2020). Environment and Water Engineering. Monitoring of Land Subsidence in Qorveh and Chahardoli Plains of Hamadan and Kurdistan Provinces using PS-InSAR Technique. 6(19): 219-233. (in Persian).
- Amini, A., Haydari, R., Hosseini, M. and Jalali, N. (2016). The role of water resources in the land use planning in Talvar Watershed, Kurdistan, Iran. *Journal of Management and Engineering Watershed*. 8(3): 322-331. <http://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2016.106815> (in Persian).
- Asadi, M. A. and Njafi Alamdarlo, H. (2019). Investigating the Effects of Water Reduction Policies on Sustainable Development of Agricultural Sector in Ghorveh Plain of Kurdistan Province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 13(2):540-551 <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.2.23.1> (in Persian).
- Ayele, W. T., Tenagashaw, D. Y., Belew, A. Z. & Andualem, T. G. (2022). Optimal Water Allocation Under Climate Change, Based on Stochastic Dynamic Programming Model Approach in Ribb Reservoir, Amhara, Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, 7(1), 33-44. <https://doi.org/10.1007/s41101-021-00125-w>
- Clancy, T. (2018). Systems thinking: Three system archetypes every manager should know. *IEEE Engineering Management Review*, 46(2), 32-41. <http://dx.doi.org/10.1109/EMR.2018.2844377>
- Dai, D., Sun, M., Lv, X., Hu, J., Zhang, H., Xu, X. & Lei, K. (2022). Comprehensive assessment of the water environment carrying capacity based on the spatial system dynamics model, a case study of Yongding River Basin in North China. *Journal of Cleaner Production*, 344, 131137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131137>
- Faraji, Katayoon. (2022). Modeling the System dynamics of surface water allocation using Behavior Archetypes (Case Study: Kurdistan), Master's thesis. Arak University, Iran. (in Persian).
- Ghaderzadeh, H. and karimi, M. (2019). Impacts of Agricultural Water Quota Policy in Groundwater Resources Management in Qorveh-Dehghan Plain. *Agricultural Economics*. 12(4):73-89. http://www.iranianjae.ir/article_34565.html (in Persian).
- Ghodoosi, M., Morid, S., and Delavar, M. (2014). Comparison of de trending methods for the temperature and precipitations time series. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1(2), 32-45. (in Persian).
- Hjorth, P. & Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. *Futures, Division of Water Resources Engineering*, 38(1), 74-92. [doi: 10.1016/j.futures.2005.04.005](https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.04.005)
- Hosseini, S. and Bagheri, A. (2013). System Dynamics Modeling of the Water Resources System in Mashad Plain to Analyze Strategies for Sustainable Development. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 24(4), 28-39. (in Persian).
- Hou, J., Wang, N., Luo, J., Zhang, X., Wang, Z. & Xie, J. (2022). A multi-method integrated simulation system for water resources allocation. *Water Supply*, 22(3), 2518-2532. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.456>
- Huang, M. Li. X. & Wang, J. (2021). Research on regional water demand prediction of the upper and middle reaches of The Pearl River Basin based on system dynamics. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 26-28 March. Dalian. China. 784(1),1-7. [doi:10.1088/1755-1315/784/1/012003](https://doi.org/10.1088/1755-1315/784/1/012003)
- Kadkhodahosseini, M., Shahmohammadi, S., Nozari, H. and Mirabbasi, R. (2019). Investigating the impacts of water transfer to Choghakhor dam on resource allocation using system dynamics approach. *Iranian of Irrigation and Water Engineering*, 9(34), 66-80. <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.87267> (in Persian).
- Kazemi, M., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E. & Chu, X. (2022). Optimal water resources allocation in transboundary river basins according to hydro political consideration. *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 1188-1206. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01491-0>
- Nozari H, Moradi, P. & Godarzi, E. (2021). Simulation and optimization of control system operation and surface water allocation based on system dynamics modeling. *Journal of Hydro informatics*, 23(2), 211-230. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.294>
- Paimozd, Sh. (2021). Simulating surface water allocation and identifying systemic archetype using vensim

- software: A case study of Qorveh Dehgolan's basin. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 10 (31) :123-141. <http://dx.doi.org/%2010.22052/deej.2021.10.31.61> (in Persian).
- Saysel, A. K., Barlas, Y. & Yenigun, O. (2002). Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. *Journal of environmental management*, 64(3), 247-260. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0488>
- Sedghamiz, A., Nikoo, M. R. and Heidarpour, M. (2021). Developing a Model for Optimizing the Integrated Allocation of Water Resources and Cultivation Area Using Game Theory: The Case Study Downstream Lands of the Narmab Reservoir Dam. *Water Resources Engineering Journal*.14(50):1-16. <https://dx.doi.org/10.30495/wej.2021.26431.2278> (in Persian).
- Shafaei. J. (2017). Dynamic behavior measurement of watersheds using Vensim model and genetic programming, Master's thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran. (in Persian).
- Smith, P. & Ackere, A.V. (2002). A note on the integration of system dynamics and economic models. *Journal of economic and control*, 26,1-10. [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(00\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(00)00025-7)
- Suo, M., Xia, F. & Fan, Y. (2022). A Fuzzy-Interval Dynamic Optimization Model for Regional Water Resources Allocation under Uncertainty. *Sustainability*, 14(3), 1096. <https://doi.org/10.3390/su14031096>
- Water resources planning report. (2011). Ministry of Energy. Iran Water Resources Studies Company.1:1-336. (in Persian).
- Wang, H., Huang, J., Cheng, X., Zhou, H. & Yuan, Y. (2022). Scenario simulation of water resources development and utilization based on a system dynamics model. *International Journal of Water Resources Development*, 38(3), 447-463. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1908235>
- Yuan L, He. W., Degefu, D. M., Wan, Z., Ramsey, T. S. & 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>
- Yuan, L., He, W., Degefu, D. M., Kong, Y., Wu, X., Xu, S. & Ramsey, T. S. (2022). Elucidating competing strategic behaviors using prospect theory, system dynamics, and evolutionary game: a case of transjurisdictional water pollution problem in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(14), 20829-20843 <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17034-z>
- Zeng, Y., Liu, D., Guo, S., Xiong, L., Liu, P., Yin, J. & Wu, Z. (2022). A system dynamic model to quantify the impacts of water resources allocation on water-energy-food-society (WEFS) nexus. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 3965-3988. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3965-2022>