

ارائه مدلی برای مدیریت مصارف آبی کشاورزی، صنعتی و خانگی ایران با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

مریم موثقی گیلانی^۱، محمدعلی افشار کاظمی^{۲*} و محمدعلی کرامتی^۳

چکیده

کمبود منابع آبی را می‌توان یکی از مهم‌ترین مشکلاتی در نظر گرفت که امروزه همه ابعاد زندگی مردم ایران را تحت‌تأثیر قرار داده است. با توجه به اهمیت مسئله، در این تحقیق در ابتدا فرضیات دینامیکی موجود در سیستم تأمین منابع آبی با کمک نمودار علت و معلولی نشان داده شد. این کار با استفاده از ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها که کاربرد خود را در تحلیل و شبیه‌سازی انواع سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی نشان داده است، انجام گرفت. سپس نمودار جریان انباشت ایجاد شد و پس از شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل به تحلیل سناریوهای تعرفه‌ای و حاکمیتی در قبال آب تا سال 1420 پرداخته شد. نتایج نشان داد که تغییر تعرفه مصرف آب خانگی تأثیر چندانی بر موجودی منابع آبی نخواهد داشت؛ از آنجا که الگوی مصرف آب کشاورزی و صنعتی در بلندمدت اصلاح خواهد شد، افزایش تعرفه برای این بخش‌ها، در افق 20 ساله تأثیر به‌مراتب بهتری بر مدیریت منابع آب خواهد گذاشت. در صورتی که قوانین دولتی در خصوص توسعه صنایع آب‌بر، سطح زیر کشت و الگوی مصرف آب کشاورزی 20 درصد سخت‌گیرانه شود، با فرض ثبات در سایر پارامترهای مدل، تا سال 1420 منابع آبی زیرزمینی و منابع آبی پشت سدها به ترتیب 17 و 20 درصد افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مدیریت منابع آبی، مصارف آب خانگی، کشاورزی و صنعت

ارجاع: موثقی گیلانی م. افشار کاظمی م.ع. و کرامتی م.ع. 1403 ارائه مدلی برای مدیریت مصارف آبی کشاورزی، صنعتی و خانگی ایران با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها. مجله پژوهش آب ایران. 52: ۴۴-۴۳.

1- دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز.

2- دانشیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز.

3- دانشیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز.

* نویسنده مسئول: dr.mafshar@gmail.com

تاریخ دریافت: (1402/12/13) / تاریخ پذیرش: (1403/02/10)

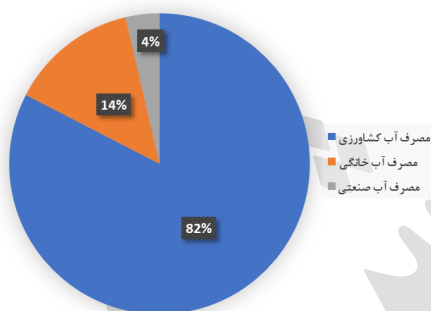
مقدمه

کمبود منابع آب یکی از مهم‌ترین مسائل در قرن بیست‌ویکم است که جوامع بشری با آن روبه‌رو هستند (Yazdanparast et al., 2023). رشد جمعیت، فعالیت‌های تولیدی صنعتی و کشاورزی، توسعه سریع شهرنشینی و تغییرات شدید شرایط آب‌وهوایی، تأثیر زیادی بر منابع آب محدود و محیط‌زیست در حوضه رودخانه‌ها به همراه داشته است (Dalín et al., 2015; Grizzetti et al., 2017; Haddeland et al., 2014; Shiu et al., 2023).

در سال‌های اخیر کاهش بارش باران، بهره‌برداری نادرست از منابع آب و توزیع نامناسب صنایع آب‌بر در کشور و الگوی ناصحیح مصرف منجر به کاهش سطح منبع آب‌های جاری و بروز اثرات منفی دیگر شده است. کمبود آب تأثیر قابل‌توجهی بر توسعه پایدار دارد (Liu et al., 2020; Yousefi et al., 2023). کشور ایران به دلیل کمبود ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن، در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و در این شرایط به دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های اقتصادی (کشاورزی و صنعت) تقاضا برای آب روزبه‌روز افزایش می‌یابد. نظری به گذشته و تاریخ کهن این کشور نشان می‌دهد که برای تعدیل مشکلات ناشی از محدودیت منابع آب، ابتکارات و ابداعات متنوعی در زمینه بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، در ابعاد سازه‌ای و مدیریتی مورد توجه بوده است که احداث قنات، سدهای مخزنی و انحرافی در بُعد سازه‌ای و نظام‌های حقابه‌بری مدون در بُعد مدیریتی آن قابل‌ذکر است (Keshavarz and Sadeghzadeh, 2000). هدف از مدیریت منابع آب، ایجاد سیستمی است که ضمن ارتباط دادن متقابل مدیریت منابع آب با محیط‌زیست و توسعه اجتماعی و اقتصادی، از انعکاس و بازخورد آن‌ها بهره‌مند شده و در نهایت با مشارکت بخش‌های مختلف، تصمیم‌گیری‌های تخصیص و توسعه منابع آب صورت گیرد. نکته مهمی که در مطالعات جامع مدیریت منابع آب باید مورد توجه قرار گیرد، شناخت مؤلفه‌ها و عدم قطعیت‌های آن‌ها و مشخص و روشن کردن

ارتباطات مستقیم و غیرمستقیم بین آن‌هاست، تا با حل یک مشکل و برنامه‌ریزی یک مؤلفه، قسمت‌های دیگر سیستم تحت‌الشعاع قرار نگیرد (Shafaghati, 2008).

مصارف آب کشور ایران را می‌توان در سه حوزه اصلی کشاورزی، صنعتی و خانگی تقسیم‌بندی کرد. مطابق با منابع معتبر در طی سال‌های 1380 تا 1396 سهم مصرف هر کدام از بخش‌ها مطابق با نمودار شکل 1 است. از آنجا که آمار و اطلاعات مربوط به مصارف از چاه‌های کشاورزی به صورت دقیق وجود ندارد و سهم آن نسبت به سایر مصارف نسبتاً پایین است، در این آمار تنها مصارف کشاورزی از سدها در نظر گرفته شده و با این حال بیش از 80 درصد مصارف آب کشور در بخش کشاورزی است.



شکل 1- سهم هر کدام از مصارف آب در کشور (Statistical Center of Iran, 2018)

در خصوص تحقیقات پیشین، نشان داده شده است در بخش کشاورزی رابطه معناداری بین ویژگی‌های فردی کشاورزان و تمایل به مدیریت پایدار منابع آبی وجود دارد (Zarei, 2018). نتایج تحقیق دیگری نشان داد که قیمت‌گذاری موجود آب در ایران به شیوه حسابداری در بلندمدت منجر به اتلاف منابع آبی کشور شده است (Khiabani et al., 2017). با استفاده از نمودار علت و معلولی، مدلی برای شناخت بحران منابع آبی در کشور هند ارائه و نشان داده شد که کشور هند جزو کشورهای با ریسک بالایی است که با توجه به رشد نمایی جمعیت، صنعتی‌شدن و روند روبه‌رشد شهرنشینی در معرض خشکسالی‌های طولانی قرار دارد (Ram and Irfan, 2021). تحقیق دیگری با شبیه‌سازی یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها، 16 درصد بهبود در الگوی

پرداخته شده است (Qin et al., 2012). محققان دیگری، با استفاده از بهینه‌سازی یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها، سیاست بهینه برای حفظ حداکثر منابع آبی کشور را تعیین کردند (Movaseghi Gilani et al., 2024). سایر تحقیقاتی که از پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی منابع آبی استفاده کردند، در جدول 1 ارائه شده است.

آبیاری کشاورزی، 10 درصد بهبود در الگوی کشت، 6 درصد کاهش هدررفت کالاهای کشاورزی و 5 درصد بهبود سالیانه در عملکرد بخش کشاورزی به‌عنوان سیاست پایدار مدیریت مصرف آب انتخاب کرده است (Keyhanpour et al., 2021). همچنین با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها به ارزیابی تأثیر مصارف مختلف منابع آبی بر متغیر ظرفیت تحمل منابع آب

جدول 1- تحقیقات صورت‌گرفته در خصوص مدیریت منابع آبی با کمک ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها

مکان	سال	منبع	موضوع مطالعه
کانادا	2000	(Ahmad and Simonovic, 2000)	توسعه قوانین عملیاتی مخزن برای کاهش آسیب سیلاب
چین و آمریکا	2002	(Kaiser et al., 2011; Xu et al., 2002)	مدیریت پایدار منابع آب در برابر رشد تقاضا
کانادا	2003	(Simonovic and Li, 2003)	ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سامانه حفاظت از سیل شهری
آمریکا	2003	(Stave, 2003)	افزایش درک عمومی از گزینه‌های مدیریت آب در مناطق در حال رشد سریع
ایران	2009	(Madani and Mariño, 2009)	تأثیرات بلندمدت جابه‌جایی آب میان حوضه‌های آب کم‌آب
ایران	2010	(Bagheri et al., 2010)	مدیریت منابع آب پس از بحران
آمریکا	2011	(Venkatesan et al., 2011)	پیش‌بینی بار نمکی و حذف آن از جریان بازگشتی
چین	2011	(Chen et al., 2011)	رویکرد یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی سیاست در پویایی‌شناسی سیستم‌ها
چین	2014	(Chen and Wei, 2014)	کاربرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در تحقیقات امنیت منابع آبی
چین	2015	(Chang et al., 2015)	ارزیابی امنیت منابع آب شهری تحت گسترش شهری
قرقیزستان	2017	(Alifujiang et al., 2017)	مدل‌سازی تغییرات سطح آب در دریاچه ایسیک-کول، قرقیزستان
چین	2017	(Chen et al., 2017)	یک مدل پویا برای بررسی سناریوهای مدیریت منابع آب در مناطق خشک
دانمارک	2018	(Gastelum et al., 2018)	استفاده از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای بهبود برنامه‌ریزی یکپارچه منابع
ایران	2019	(Ahmadi and Zarghami, 2019)	آیا تأمین آب برای شهرهای بزرگ باید به منابع بیرونی وابسته باشد؟ شبیه‌سازی مونت کارلو پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای شیراز
ایران	2019	(Barati et al., 2019)	یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها از حکومت هوشمند آب زیرزمینی
سوئیس	2019	(Bates et al., 2019)	مدل‌سازی ذخیره آب زیرزمینی برای برنامه‌ریزی در مقیاس حوضه
ایران	2020	(Babamiri et al., 2020)	راهبردهای مدیریت مالی پایدار شبکه توزیع آب شهری تحت ساختار قیمت
ایران	2020	(Bakhshianlamouki et al., 2020)	ارزیابی تأثیرات تدابیر بازسازی رابطه آب-انرژی-غذا در حوضه دریاچه ارومیه
	2021	(Phan et al., 2021)	کاربردهای پویایی‌شناسی سیستم‌ها در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب
ترکیه	2022	(Demirel et al., 2022)	تحلیل مسئله طراحی شبکه/موقعیت ایستگاه‌های پالایش فاضلاب
ایران	2022	(Gohari et al., 2022)	مدل‌سازی رابطه آب-زمین-جامعه در سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی
تایوان	2023	(Shiu et al., 2023)	ارزیابی چرخه حیات پویا برای پیامدهای پالایش آب
ایران	2023	(Yazdanparast et al., 2023)	توسعه یک مدل مفهومی امنیت آب با ترکیب سامانه‌های انسانی-محیطی

مواد و روش‌ها

تفکر سیستمی نوعی نگرش به جهان هستی و پدیده‌های آن است. این شیوه تفکر، روش‌شناسی مؤثری را برای دستگاه‌های اجتماعی-فرهنگی در محیط آکنده از آشفتگی و پیچیدگی ارائه می‌دهد. در تفکر سیستمی، افزون بر توجه به اجزا و جزئیات یک سیستم، چگونگی تعامل بین اجزا و نیز برهمکنش اجزا و محیط بررسی می‌شود (Senge, 2014). تکنیک پویایی سیستم برای نخستین بار در اواخر دهه 1950 توسط یک گروه از محققان به رهبری Forrester در دانشگاه MIT توسعه داده شده است (Coyle, 1997). ابزار مورد استفاده در این پژوهش نیز پویایی‌شناسی سیستم‌هاست که اساس خود را بر تفکر سیستم بنا نهاده و براساس معادلات ریاضی ورودی به مدل شبیه‌سازی می‌شود. در رویکردهای سنتی بر روابط علت و معلولی خطی تأکید می‌شود، در حالی که در رویکرد مورد استفاده در این پژوهش بر بازخورد بین متغیرهای سیستم تمرکز می‌شود.

به صورت کلی گام‌های لازم برای استفاده از پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی یک مسئله در شکل 1 نشان داده شده است (Sterman, 2000).

تعریف دقیق مسئله و تعیین مرز سیستم: در این گام مسئله مورد نظر به صورت کامل بررسی و مرز سیستم مشخص شده است. نکته مهم این است، در صورتی از این ابزار استفاده می‌شود که در مسئله مورد نظر فرایندهای بازخوردی موجب بروز مسئله شده باشند.

استخراج متغیرهای مؤثر و تدوین نمودار علی و معلولی: پس از شناسایی زیرسیستم‌ها، متغیرها و بازخوردهایی که در هر زیرسیستم وجود دارند، شناسایی و سپس نمودار علی و معلولی سیستم با استفاده از متغیرها و حلقه‌های شناسایی شده ایجاد شد.

ایجاد نمودار جریان انباشت و استفاده از داده‌های مناسب برای شبیه‌سازی مدل: گام بعدی، ایجاد نمودار جریان انباشت از روی نمودار علی و معلولی بود.

از آنجاکه در سیستم مدیریت منابع آبی کشور متغیرها و بازخوردهای فراوانی وجود دارد، برای تحلیل این سیستم می‌بایست از ابزاری استفاده شود که ضمن نگاه جامع به همه متغیرها، بتواند روابط علت و معلولی بین تمامی آن‌ها را به خوبی مدل‌سازی کند. با به کارگیری ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها، در عین در نظرگیری روابط دوطرفه همه متغیرهای اصلی، می‌توان به شبیه‌سازی این سیستم پرداخت و با کمک آن سناریوهای مناسبی را در قبال آینده تعریف کرد.

تحقیقات انجام شده در جدول 1 اگرچه مدل‌های مناسبی را در حوزه آب ارائه کرده‌اند، اما هیچکدام با هدف مدیریت منابع آب کشور ایران مدل‌سازی و شبیه‌سازی انجام نداده‌اند؛ بنابراین نوآوری در تحقیق حاضر، در ابتدا ارائه مدل جامع در حوزه مدیریت منابع آبی کشور ایران، با به کارگیری متغیرها و نتایج تحقیقات جدول 1 است و سپس تلاش شده پس از تأیید اعتبار مدل ارائه شده، تأثیر افزایش تعرفه آب و سیاست‌های حاکمیتی بر منابع آبی تحلیل شود.

در حقیقت هدف تحقیق حاضر، پاسخ به سؤالات زیر است:

- متغیرهای کلیدی طراحی مدل مصرف آب کدام‌اند؟
- رفتار متغیرهای کلیدی در طی زمان چگونه‌اند؟
- تأثیر سناریوهای مختلف تعرفه‌ای و حاکمیتی بر مصرف آب کشور چگونه است؟

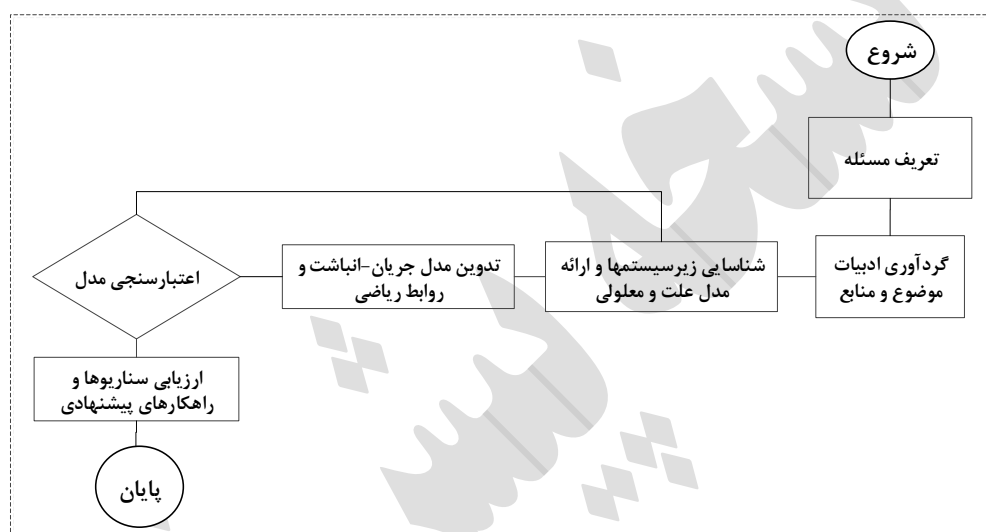
این تحقیق بدین صورت سازماندهی شده است که در ابتدا، فرضیه‌های دینامیکی در قالب مدل علت و معلولی تشریح شده و مدل علت و معلولی کلی ارائه شد. پس از آن با شناسایی متغیرهای جریان و انباشت، نمودار جریان-انباشت ارائه و با ورود فرمول‌ها، مدل شبیه‌سازی شد. در ادامه اعتبار مدل جریان-انباشت با استفاده از روش‌های آزمون حدی، بازسازی رفتار مرجع و آزمون ارزیابی ساختاری مورد تأیید قرار گرفت. بعد از تأیید اعتبار مدل، به تحلیل سناریو پرداخته شد.

آزمون‌هایی مانند رفتار مرجع، آزمون حساسیت، آزمون رفتار حدی استفاده شد.

ارزیابی سناریوهای پیشنهادی و بیان راهکار مناسب: در پایان، پس از تأیید اعتبار مدل، سناریوهای متصور پیشنهادی با تعریف ورودی‌های مدل آزمایش و اثر آن‌ها بر متغیرهای اصلی مشاهده شد.

بدین منظور، ابتدا متغیرهای نرخ، انباشت و کمکی درون نمودار علی و معلولی شناسایی و سپس نمودار جریان انباشت ایجاد شد. پس از ایجاد این مدل، روابط بین متغیرها براساس داده‌های تاریخی، استفاده از نظر خبرگان آن صنعت و منطق بین متغیرها تعیین شد.

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده: برای اطمینان از صحت و دقت مدل، اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده در این تحقیق، از



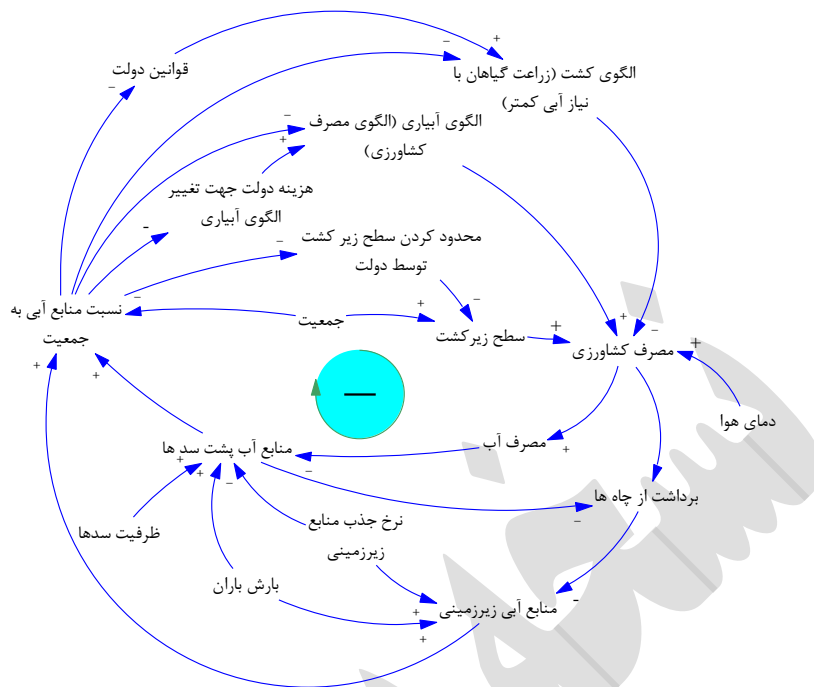
شکل 1- گام‌های لازم برای استفاده از سیستم دینامیک در تحلیل مسائل اقتصادی-اجتماعی (Sterman, 2000)

جمعیت در حال رشد زمین است (Akbari and Mahmodi karamjavan, 2022). در این رابطه بازخوردی هرچه کمبود آب نسبت به سرانه جمعیت احساس شود، قوانین دولتی سختگیرانه‌تر شده و با محدودکردن سطح زیر کشت و اصلاح الگوی کشت و الگوی آبیاری مصرف کشاورزی کنترل خواهد شد. در مدل ارائه شده در این تحقیق بارش باران از جمله متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر منابع آبی است.

نتایج و بحث

فرضیه‌های دینامیکی

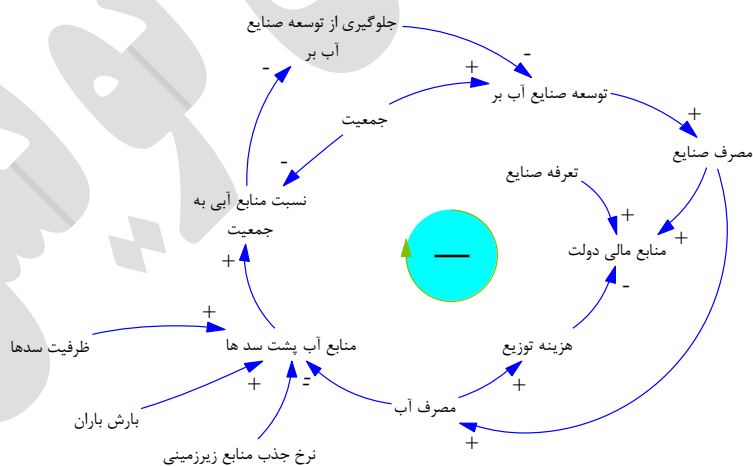
اولین فرضیه مورد بررسی در تحقیق مربوط به ارتباط بین کشاورزی و منابع آبی است. متغیرهایی که بر مصرف کشاورزی تأثیرگذارند در شکل 2 قید شده‌اند. سطح زیر کشت و الگوی کشت و آبیاری مهم‌ترین متغیرهایی هستند که بر مصرف آب کشاورزی اثر گذارند (Bates et al., 2019). ترویج بهبود مدیریت آبیاری یکی از عوامل مهم کلیدی برای کمک به تغذیه



شکل 2- نمودار حلقه علی و معلولی مربوط به اثر متقابل نسبت منابع آبی به جمعیت و مصارف آب کشاورزی

در این فرضیه در صورت کاهش نسبت منابع آبی به جمعیت، توسعه صنایع آب بر محدود شده و مصرف صنایع کاهش خواهد یافت.

دومین فرضیه دینامیکی مورد بررسی در تحقیق که در شکل 3 نشان داده شده است، مربوط به ارتباط بین نسبت منابع آبی به جمعیت بر مصرف آب صنایع است.

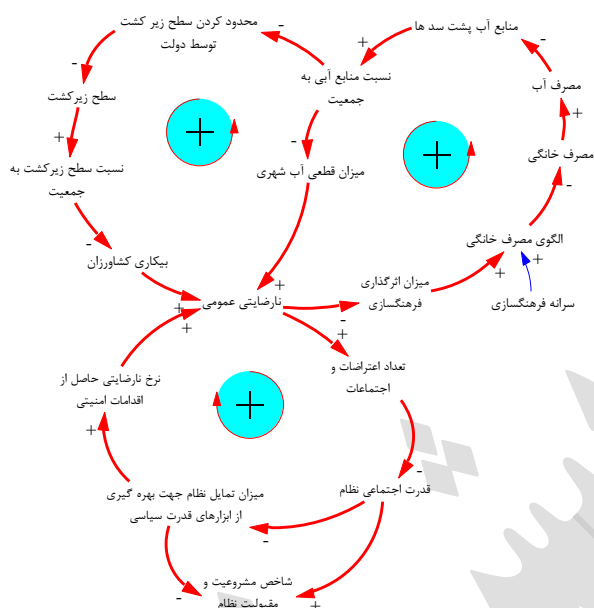


شکل 3- نمودار حلقه علی و معلولی ارتباط متقابل نسبت منابع آبی به جمعیت بر توسعه صنایع آب بر

نشان داده شده است که می توان با آموزش و افزایش آگاهی خانوارها در چگونگی مصرف آب و استفاده از ادوات کاهنده مانند کنتورهای هوشمند و شیرآلات

فرضیه دینامیکی سوم در شکل 4 مربوط به ارتباط بین نسبت منابع آبی به جمعیت و سرانه فرهنگ سازی و تأثیر آن بر الگوی مصرف خانگی است. در این شکل

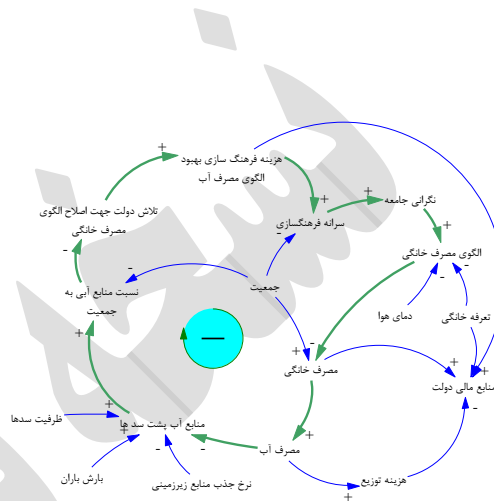
پیدا می‌کند. این موضوع به نوبه خود منجر به استفاده حکومت از ابزارهای سیاسی برای مقابله با اعتراضات شده و نارضایتی عمومی را افزایش می‌دهد. درحقیقت این یک حلقه مثبت است که در صورت کاهش شاخص «نسبت حجم منابع آبی به تعداد جمعیت» فعال خواهد شد.



شکل 5- نمودار حلقه علی و معلولی ارتباط متقابل بین نسبت منابع آبی به جمعیت و بازخوردهای ایجاد نارضایتی عمومی

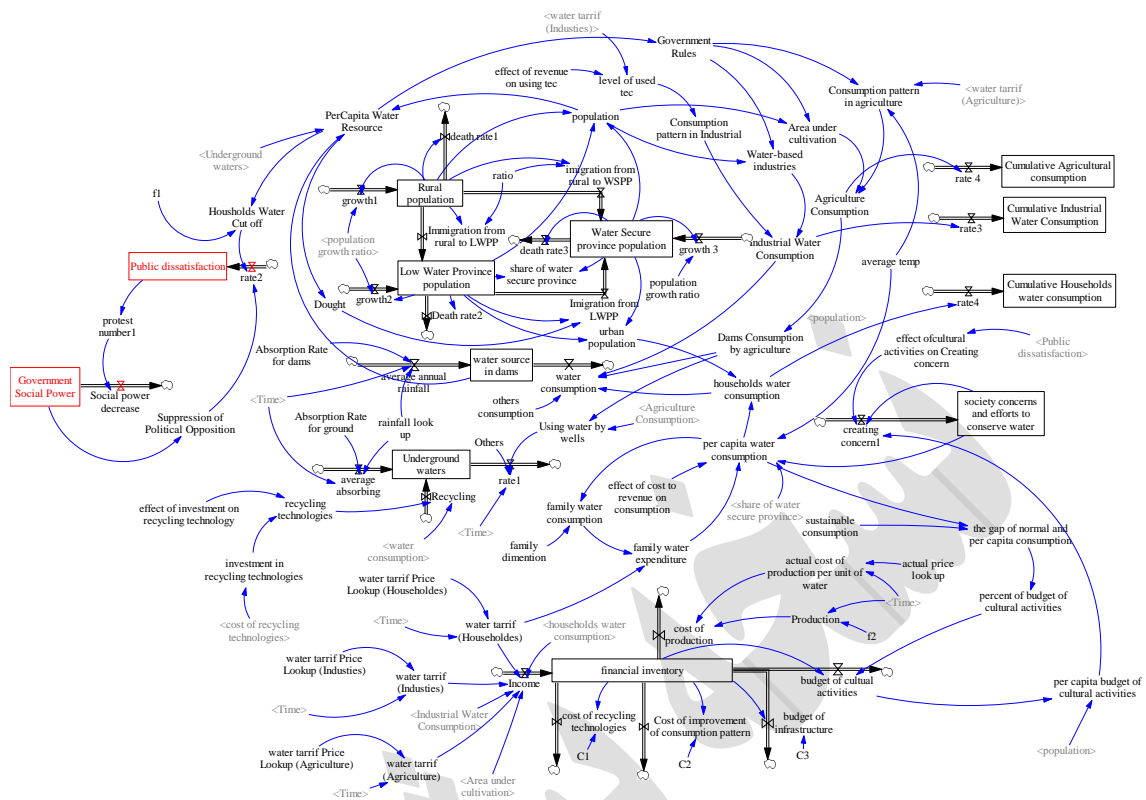
در صورتی که همه فرضیات دینامیکی تبیین شده در بالا را به هم متصل کنیم، نمودار علت و معلولی کلی شکل 7 حاصل خواهد شد. ساختارهای علی و معلولی از سه روش مطالعه رفتار گذشته متغیرهای هدف، مشورت با خبرگان و مرور ادبیات پیشین تحقیق طراحی شده‌اند و مدل توسط خبرگان امر تأیید شده است. پس از اتمام این گام، نمودار جریان انباشت ترسیم می‌شود. این نمودار با تقسیم‌بندی متغیرهای اصلی به متغیرهای سطح، نرخ و کمکی ترسیم می‌شود. ورود نمودار جریان به نرم‌افزار مینایی برای ورود روابط ریاضی و شبیه‌سازی مدل نهایی است.

جدید، نقش مهمی در مدیریت مصرف آب داشت (Dadashi Divkolaei et al., 2022). فرضیه دینامیکی چهارم در شکل 5 مربوط به ارتباط متقابل بین نسبت منابع آبی به جمعیت و نارضایتی عمومی است. هرچه نارضایتی عمومی افزایش یابد، تعداد اعتراضات و اجتماعات فزونی یافته و قدرت اجتماعی نظام کاهش



شکل 4- نمودار حلقه علی و معلولی ارتباط متقابل بین نسبت منابع آبی به جمعیت و فرهنگ‌سازی دولت

فرضیه دینامیکی بعدی ارتباط بین میزان کمبود آب و مهاجرت افراد از استان‌های کم‌آب به استان‌های دارای امنیت آبی را نشان می‌دهد (شکل 6). در صورتی که نسبت منابع آبی به جمعیت کاهش یابد، این نوع مهاجرت افزایش یافته و جمعیت در مناطق دارای امنیت آبی افزایش و در نتیجه مصرف آب خانگی افزایش پیدا خواهد کرد و به دنبال آن نسبت منابع آبی به جمعیت کاهش می‌یابد. از طرفی هرچه جمعیت افزایش پیدا کند، علاوه بر افزایش مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی با تولید پسماند، شیرابه‌ها به داخل آب نفوذ کرده و بخشی از منابع آبی زیرزمینی را آلوده خواهند کرد.



شکل 7- نمودار جریان-انباشت

با قوانین دولتی رابطه عکس دارد. مصرف آب صنعتی نیز متناسب با سطح استفاده از تکنولوژی‌های نوین (LUT) کاهش می‌یابد.

$$CPA = \frac{AT \times 8.8 \times 10^7}{50627.4 + GR} \quad (3)$$

$$CPI = \frac{1}{LUT} \quad (4)$$

در بخش خانگی ایجاد نگرانی فردی درخصوص منابع آبی (CC) متأثر از سه متغیر تأثیر فعالیت‌های فرهنگی بر ایجاد نگرانی (ECA)، بودجه سرانه فرهنگ‌سازی مصرف آب (PCB)، نگرانی جامعه و تلاش برای صرفه‌جویی منابع آبی (SCE) است.

$$CC = ECA \times PCB \times SCE \quad (5)$$

قوانین حکومتی برای مدیریت منابع آبی نیز متأثر از سرانه منابع آبی (PCW) است و هرچه سرانه منابع آبی کمتر شود، قوانین حکومتی مطابق با رابطه زیر افزایش خواهد یافت.

در مدل توسعه داده شده مصرف آب کشاورزی (AC)، مطابق با فرمول زیر و براساس سطح زیر کشت (AUC) و الگوی مصرف کشاورزی (CPA) محاسبه می‌شود (معادله 1).

$$AC = \frac{AUC \times CPA}{10^6} \quad (1)$$

رابطه بین سطح زیر کشت و قوانین حکومتی (GR) نیز به صورت معادله 2 است. در این رابطه سطح زیر کشت با جمعیت کشور (P) رابطه مستقیم دارد و با وضع قوانین محدودسازی سطح کشت، این متغیر کاهش پیدا می‌کند.

$$AUC = \frac{P}{1 + GR} \quad (2)$$

همچنین الگوی مصرف آب کشاورزی (CPA) و آب صنعتی (CPI) مطابق با دو رابطه زیر است. الگوی مصرف آب کشاورزی با سطح دما (AT) رابطه مستقیم و

نکند؛ از این رو گام‌های زمانی شبیه‌سازی مدل نیز پارامترهای 0/0625 در نظر گرفته شده است. پارامترهای لحاظ‌شده در شبیه‌سازی که مقادیر آن‌ها از آمارنامه‌های معتبر موجود تهیه‌شده، مطابق با جدول 2 است.

$$GR = \frac{1}{PCW} \quad (6)$$

زمان شروع شبیه‌سازی سال 1380 در نظر گرفته شده است. از نظر ریاضی گام‌های گسسته‌سازی مدل باید کمترین مقداری باشد که با کاهش آن رفتار مدل تغییر

جدول 2- پارامترهای لحاظ‌شده در شبیه‌سازی (National Water & WasteWater Eng. Co, 2020; Statistical Center of Iran, 2018)

پارامتر	تعریف	مقدار	واحد
Initial value of water source in dams	مقدار اولیه متغیر انباشت منابع آبی پشت سدها	300000	میلیون مترمکعب
Initial value of Underground waters	مقدار اولیه متغیر انباشت منابع آبی زیرزمینی	1000000	میلیون مترمکعب
Initial value of Population	مقدار اولیه متغیر انباشت جمعیت	66000000	نفر
Absorbtion rate in dams	نرخ جذب بارش‌ها در سد	0.076	1 بر سال
Absorption Rate for ground	نرخ جذب بارش‌ها در زمین	0/2	1 بر سال
Average temperature	دمای هوا	20	سانتی‌گراد
Rainfall look up	میزان بارش باران	[(1380,0)- (1400,500000)], (1380,406000),(1385, 406000),(1400,306000)	میلیون مترمکعب در سال
Family Dimention	بُعد خانوار	4	نفر
Death rate	نرخ مرگ‌ومیر	0/004	1 بر سال
Migration rate from rural	نرخ مهاجرت از روستاها	0/015	1 بر سال

هدف بررسی می‌شود تا هیچ‌گونه رفتار نامعقول یا خطایی در مدل مشاهده نشود.

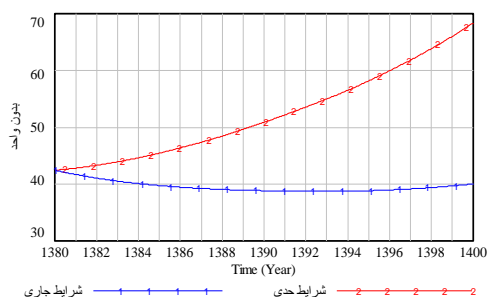
اعتبارسنجی مدل

استرمن در کتاب پویایی‌شناسی کسب‌وکار انواع روش‌ها را برای بررسی اعتبار مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه داده است و در این مطالعه اعتبار مدل مدیریت منابع آبی کشور به‌وسیله دو روش مهم و رایج با عنوان‌های بازسازی رفتار مرجع و آزمون شرایط حدی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Sterman, 2000). در آزمون بازسازی رفتار مرجع، مدل باید بتواند رفتار متغیرهای اصلی که شامل رفتارهای خطی، هدف‌جو، نمایی یا رشد، نوسانی، S شکل و... را برای بازه زمانی گذشته تا حد خوبی بازسازی کند و در آزمون شرایط حدی نیز ورودی‌های مدل به‌صورت ناگهانی در حالت حدی (بسیار بالا یا بسیار پایین) قرار گرفته و رفتار متغیرهای

آزمون رفتار حدی

در این قسمت پارامترهای ورودی مدل تحت مقادیر حدی مختلف بررسی شده‌است. بررسی رفتارهای مدل در شکل‌های 9 تا 12 نشان داد که مدل در شرایط حدی از رفتار منطقی برخوردار است و با مشاهده نتایج حاصل از این تغییر یا تغییرات دیگر بر متغیرهای ورودی عملاً هیچ رفتار نامعقولی ایجاد نشده است؛ بنابراین از نظر این آزمون اعتبار مدل تأیید می‌شود.

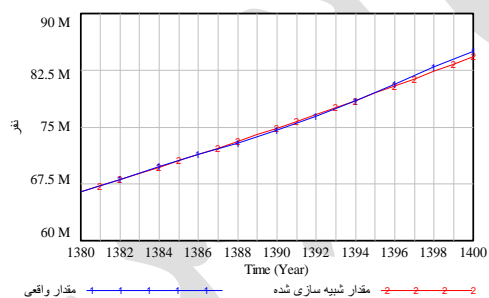
به‌عنوان یک مثال از آزمون حدی که بر روی مدل اجرا گردید، فرض شود پارامتر نرخ زاد و ولد مدل سه برابر



شکل 11- نمودار رفتار متغیر قوانین حاکمیتی در شرایط حدی

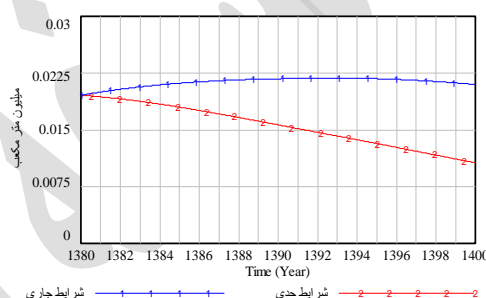
آزمون بازسازی رفتار مرجع (بازسازی داده‌های تاریخی)

در شکل‌های 13 تا 15 داده‌های واقعی مربوط به جمعیت کشور، مصرف آب صنعتی، مصرف آب کشاورزی از سدها، کل مصرف آب از سدها و خروجی مدل شبیه‌سازی مقایسه شده است. داده‌های واقعی نشان می‌دهد افزایش جمعیت با رفتار خطی و متغیرهای مصرف آب کشاورزی از طریق سدها و مصرف کل آب از سدها با رفتاری هدف‌جو افزایش می‌یابد و همان‌طور که از مقایسه نتایج مشخص است، مدل توانسته تا حد خوبی رفتار این متغیرهای مرجع را به‌درستی شبیه‌سازی کند.

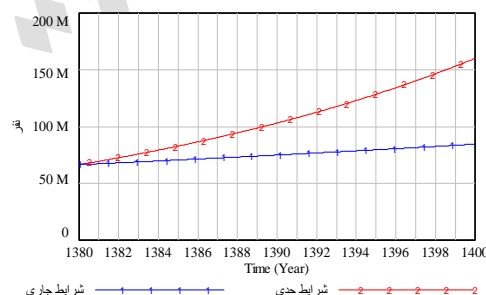


شکل 12- نمودار رفتار متغیر مصرف آب صنعتی در مقایسه با داده‌های واقعی

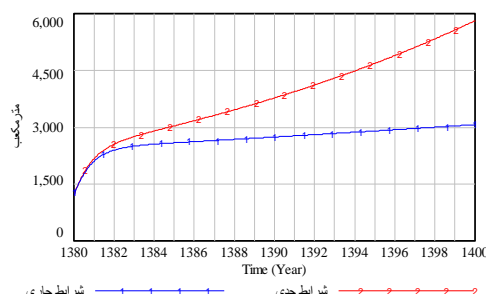
شود. در این صورت رفتار زیر برای متغیرها حاصل می‌شود که در این رفتارها هیچ‌گونه رفتار نامعقولی وجود ندارد؛ برای مثال فرض شود با اعمال این تغییر، متغیر سرانه منابع آبی کشور افزایش می‌یافت یا مقدار جمعیت کاهش پیدا می‌کرد (که نشان‌دهنده رفتار نامعقول سیستم در قبال افزایش نرخ زاد و ولد است)، در این صورت اعتبار مدل مورد تأیید قرار نمی‌گرفت و می‌بایست روابط ریاضی یا ساختار مدل مورد بازبینی قرار گیرد.



شکل 8- نمودار رفتار متغیر سرانه منابع آبی کشور در شرایط حدی



شکل 9- نمودار رفتار متغیر جمعیت در شرایط حدی

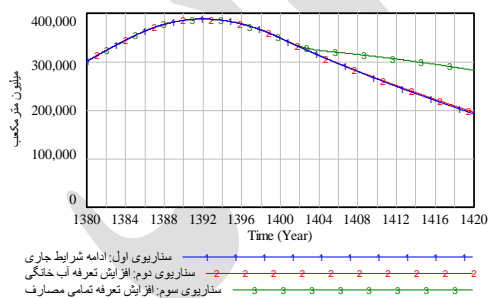


شکل 10- نمودار رفتار میزان مصرف خانگی در شرایط حدی

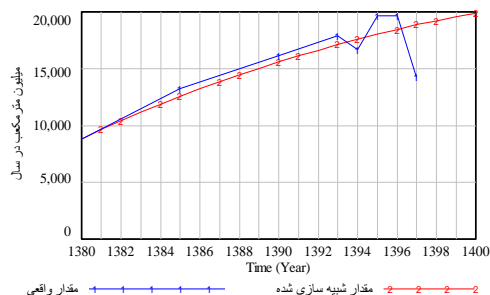
آب کشاورزی و صنعتی در یک دوره 5 ساله و به صورت پلکانی افزایش یافته است.

شکل‌های 16 تا 19 نتایج حاصل از اجرای سه سناریو را بر منابع آبی پشت سدها و سرانه منابع آبی کشور نشان می‌دهند. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی قابل مشاهده است که با ادامه شرایط جاری همان‌طور که روند نزولی کاهش منابع آبی از سال 1392 شروع شده، سرانه منابع آبی همزمان با افزایش جمعیت کاهش خواهد یافت. علت این موضوع افزایش مصرف کشاورزی است که سهم زیادی از مصرف آب را به خود اختصاص داده است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش منابع آبی، میزان مصرف آب صنعتی کاهش خواهد یافت، زیرا استفاده از تکنولوژی‌ها برای کاهش مصرف آب بیشتر خواهد شد.

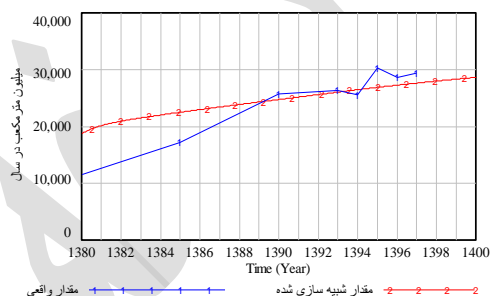
نتایج ارائه شده در شکل‌های 17 تا 20 با نتایج مطالعه (Tahami Pour Zarandi et al., 2020) که نشان داده فاصله معنی‌داری بین متوسط وزنی ارزش اقتصادی آب با متوسط وزنی تعرفه پرداختی آن در بخش صنعت وجود دارد و با اصلاح نظام قیمت‌گذاری این نهاد به صورت پلکانی، قیمت‌ها به مقادیر بهینه خود نزدیک‌تر می‌شوند و بهره‌وری مصرف آب در صنایع افزایش یابد و تحقیق (Tahami Pour Zarandi and Yazdani, 2017) که بهترین راهکار اصلاح قیمت آب کشاورزی را افزایش پلکانی آن می‌داند، همخوانی دارد.



شکل 15- نمودار رفتار منابع آبی پشت سدها



شکل 13- نمودار رفتار متغیر مصرف آب کشاورزی از طریق سد در مقایسه با داده‌های واقعی



شکل 14- نمودار رفتار متغیر کل آب مصرفی از طریق سد در مقایسه با داده‌های واقعی

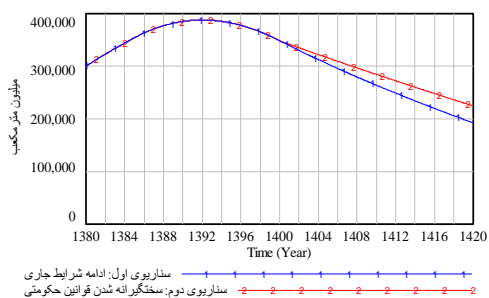
نتایج و بحث

پس از اتمام طراحی مدل و حصول اطمینان از اعتبار آن، به بررسی اثر اجرای استراتژی‌ها در افق 20 ساله پرداخته شده است. نخستین شبیه‌سازی مربوط به ادامه شرایط جاری است و استراتژی تعریف‌شده شامل تغییر قیمت تعرفه‌های مصرف آب است.

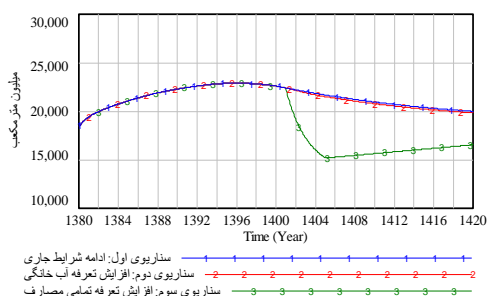
جدول 2- سناریوهای شبیه‌سازی شده

سناریو	شرایط
اول	شرایط اصلی مسئله حاکم است و فرض می‌شود مقادیر پارامترها مطابق با سال 1400 باقی بماند.
دوم	از سال 1401 قیمت واقعی واحد آب خانگی توسط دولت تا 5 سال به مقدار 1/5 برابر افزایش یابد.
سوم	از سال 1401 قیمت واقعی آب خانگی، صنعتی و کشاورزی از سال 1401 تا 5 سال 1/5 برابر شود.

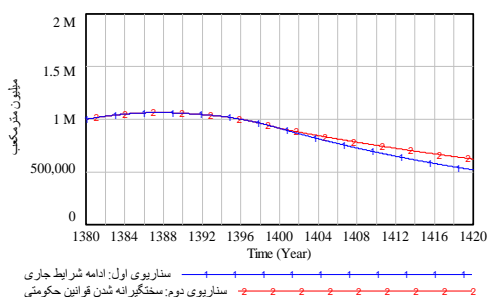
در سناریوی سوم ارائه شده در جدول 2 مطابق با مطالعات (Tahami Pour Zarandi et al., 2020; Tahami Pour Zarandi and Yazdani, 2017) تعرفه



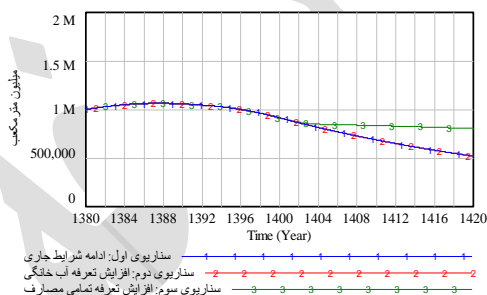
شکل 19- نمودار منابع آبی پشت سدها



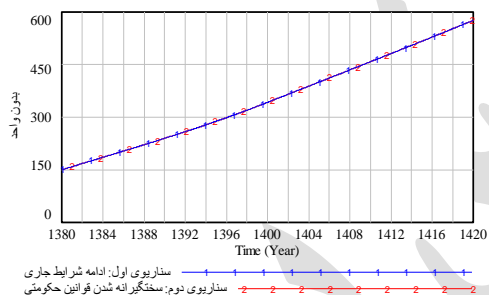
شکل 16- نمودار رفتار منابع آبی مصرف کل آب از سدها با افزایش قیمت تمامی تعرفه‌ها



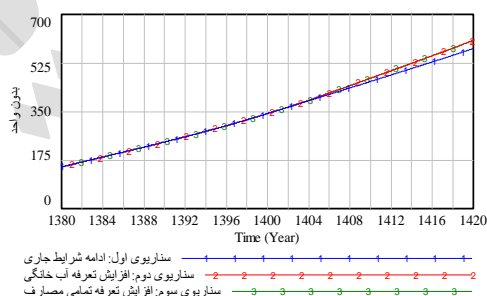
شکل 20- نمودار میزان منابع آب زیرزمینی



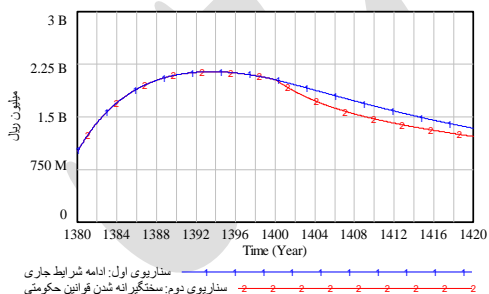
شکل 17- نمودار رفتار منابع آبی پشت سدها



شکل 21- نمودار رفتار نارضایتی عمومی از مدیریت حاکمیت در مصرف آب



شکل 18- نمودار رفتار نارضایتی عمومی از مدیریت حاکمیت در مصرف آب



شکل 22- موجودی منابع مالی دولت در حوزه مدیریت آب

در سناریوی بعدی فرض شود از سال 1401 به بعد قوانین دولتی به گونه‌ای سخت‌گیرانه شود که توسعه صنایع آب‌بر، الگوی مصرف آب کشاورزی و سطح زیر کشت 20 درصد کاهش پیدا کند، در این صورت نتایج شکل‌های 20 تا 23 حاصل خواهد شد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه سناریوهای فوق را در جدول زیر مشاهده کرد:

جدول 3- خلاصه نتایج سناریوها در سال 1420

سناریوهای مربوط به قوانین حاکمیت	سناریوهای مربوط به تغییر تعرفه		شرایط جاری	متغیر	
	افزایش تمام تعرفه‌ها	افزایش تعرفه خانگی			
17%↑	47%↑	2%↑	0%	192354	منابع آبی پشت سدها
20%↑	55%↑	0%	0%	519367	منابع آبی زیرزمینی
0%	5%↑	5%↑	0%	577	نارضایتی عمومی
20%↓	167%↑	0%	0%	1/3*10 ⁹	منابع مالی حاکمیت

نتیجه‌گیری

در شرایطی که جمعیت کشور روزبه‌روز فزونی یافته، صنعت توسعه می‌یابد، نیاز به کالای کشاورزی بیشتر شده، بارش‌ها کاهش یافته و منابع آبی روزبه‌روز تحلیل می‌رود، شناخت ساختار زنجیره‌ای که عرضه و مصارف آب را رقم می‌زند، در مدیریت منابع آبی اهمیت وافری دارد. در این مقاله به‌منظور ایجاد مدل ذهنی مشترک و ترسیم تأثیر و اثرات میان متغیرهای دخیل در سیستم عرضه و تقاضای آب کشور ایران از ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. در ابتدا مقالات بین‌المللی و داخلی مرور شده و پس از مصاحبه با خبرگان امر و مطالعات کتابخانه‌ای شکاف تحقیقاتی شناسایی شده است. درحقیقت تاکنون مدل جامعی برای کشور ایران ارائه نشده است که هم بخش تقاضا شامل مصرف کشاورزی، صنعت و خانگی و هم بخش منابع آبی موجود را به یکدیگر متصل کند و از طرف دیگر سایر زیرسیستم‌ها مانند قوانین دولتی، منابع مالی دولت و نارضایتی عمومی را در نظر بگیرد؛ بنابراین در این تحقیق ضمن پوشش شکاف موجود، مدل جامعی ارائه شده است که می‌توان سناریوهای مختلف را با کمک آن آزمایش کرد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد سیاست‌های قیمتی دولت که تنها تعرفه مصرف آب خانگی را تغییر می‌دهد، تأثیر چندانی بر منابع آبی نخواهد داشت و در صورتی که این افزایش تعرفه برای بخش کشاورزی و صنعت اعمال شود، چون الگوی مصرف آب کشاورزی و صنعتی اصلاح خواهد شد؛ بنابراین تأثیر بیشتری بر حفظ منابع آبی کشور خواهد گذاشت. این نتایج بانتهای (Tahami Pour Zarandi et al., 2020) که راهکار بهبود

بهره‌وری آب صنایع را افزایش تعرفه می‌داند و مطالعه (Tahami Pour Zarandi and Yazdani, 2017) که راهکار اصلاح قیمت آب کشاورزی را افزایش پلکانی به‌جای افزایش یکباره ارائه داده است، همخوانی دارد. همچنین نتایج نشان داد سختگیرانه‌شدن 20 درصدی قوانین دولتی در حوزه توسعه صنایع آب‌بر، سطح زیر کشت و الگوی مصرف آب کشاورزی در کشور تا سال 1420 منجر به افزایش منابع آب زیرزمینی و منابع آب پشت سدها به اندازه 17 و 20 درصد خواهد شد.

منابع

- Ahmadi, M.H. and Zarghami, M., 2019. Should water supply for megacities depend on outside resources? A Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz. Iran. *Sustainable cities and society*, 44: 163-170.
- Ahmad, S. and Simonovic, S.P., 2000. System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14: 190-198.
- Akbari, A. and Mahmodi, karamjavan J., 2022. Designing a Promotional Model for Improving Irrigation Management to Deal with the Water Shortage Crisis in East Azerbaijan Province. *Journal of Water and Sustainable Development*, 9: 95-104. [In Persian].
- Alifujiang, Y., Abuduwaili, J., Ma, L., Samat, A. and Groll, M., 2017. System dynamics modeling of water level variations of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. *Water*, 9(12), p.989.
- Babamiri, A.S., Pishvae, M.S. and Mirzamohammadi, S., 2020. The analysis of financially sustainable management strategies of urban water distribution network under increasing block tariff structure: A system dynamics approach. *Sustainable Cities and Society*, 60, p.102193.

17. Demirel, D.F., Gönül-Sezer, E.D. and Pehlivan, S.A., 2022. Analyzing the wastewater treatment facility location/network design problem via system dynamics: Antalya, Turkey case. *Journal of Environmental Management*, 320, p.115814.
18. Gastelum, J.R., Krishnamurthy, G., Ochoa, N., Sibbett, S., Armstrong, M. and Kalaria, P., 2018. The Use of System Dynamics Model to Enhance Integrated Resources Planning Implementation. *Water Resources Management*, 32: 2247-2260.
19. Gohari, A., Savari, P., Eslamian, S., Etemadi, N. and Keilmann-Gondhalekar, D., 2022. Developing a system dynamic plus framework for water-land-society nexus modeling within urban socio-hydrologic systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 185, p.122092.
20. Grizzetti, B., Pistocchi, A., Liqueste, C., Udias, A., Bouraoui, F. and Van De Bund, W., 2017. Human pressures and ecological status of European rivers. *Scientific reports*, 7(1), p.205.
21. Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z.D., Wada, Y. and Wisser, D., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 3251-3256.
22. Keshavarz, A. and Sadeghzadeh, K., 2000. Water Consumption Management in the Agricultural Sector, Forecasting Demand for the Future. Ministry of Agricultural Jihad. *Agricultural Research, Education & Extension Organization*, 41(2): 33-44. [In-Persian].
23. Keyhanpour, M.J., Musavi Jahromi, S.H. and Ebrahimi, H., 2021. System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 12: 1267-1281.
24. Khiabani, N., Bagheri, S. and Bashiripour, A., 2017. Economic requirements of water resources management. *Journal of Water and Wastewater: Ab va Fazilab*, 28: 42-56. [In Persian].
25. Liu, X., Pan, Y., Zhang, W., Ying, L. and Huang, W., 2020. Achieve sustainable development of rivers with water resource management-economic model of river chief system in China. *Science of the total environment*, 708, p.134657.
26. Madani, K. and Mariño, M.A., 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-rud river basin. *Water Resources Management*, 23: 2163-2187.
6. Bagheri, A., Darijani, M., Asgary, A. and Morid, S., 2010. Crisis in Urban Water Systems during the Reconstruction Period: A System Dynamics Analysis of Alternative Policies after the 2003 Earthquake in Bam-Iran. *Water Resources Management*, 24: 2567-2596).
7. Bakhshianlamouki, E., Masia, S., Karimi, P., van der Zaag, P. and Sušnik, J., 2020. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia lake Basin, Iran. *Science of the Total Environment*. 708, p.134874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134874>
8. Barati, A.A., Azadi, H. and Scheffran, J., 2019. A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management*, 221: 502-518.
9. Bates, G., Beruvides, M. and Fedler, C.B., 2019. System dynamics approach to groundwater storage modeling for basin-scale planning. *Water*, 11(9), p.1907.
10. Chang, Y.T., Liu, H.L., Bao, A.M., Chen, X. and Wang, L., 2015. Evaluation of urban water resource security under urban expansion using a system dynamics model. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(6): 1259-1274.
11. Chen, C., Ahmad, S., Kalra, A. and Xu, Z.X., 2017. A dynamic model for exploring water-resource management scenarios in an inland arid area: Shanshan County, Northwestern China. *Journal of Mountain Science*, 14: 1039-1057.
12. Chen, Y.T., Tu, Y.M. and Jeng, B., 2011. A machine learning approach to policy optimization in system dynamics models. *Systems Research and Behavioral Science*, 28(4): 369-390.
13. Chen, Z. and Wei, S., 2014. Application of System Dynamics to Water Security Research. *Water Resources Management*, 28: 287-300.
14. Coyle, R.G., 1997. System Dynamics Modelling: A Practical Approach. *Journal of the Operational Research Society*, 48: 544-544.
15. Dadashi Divkolaei, H., Sorayaei, A., Nabavi and Chashmi, S.A., 2022. Identifying and Investigating the Factors Affecting Household Water Consumption Using a Hybrid Fuzzy-Delphi-TOPSIS based Approach. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8: 11-22. [In Persian].
16. Dalin, C., Qiu, H., Hanasaki, N., Mauzerall, D.L. and Rodriguez-Iturbe, I., 2015. Balancing water resource conservation and food security in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112: 4588-4593.

37. Statistical Center of Iran, 2018. Iran statistical year book 2018. [In Persian].
38. Stave, K.A., 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management*, 67(4): 303-313.
39. Sterman, J., 2000. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.
40. Tahami Pour Zarandi M., Khazaei A. and Kolivand F. 2020. Analysing the Tariff System and Economic Value of Water in Iran's Industry Sector. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6: 19-30.
41. Tahami Pour Zarandi, M. and Yazdani, S., 2017. The Role of Economic Instruments in IWRM: The Case Study of Irrigation Water Pricing in Western Basins of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 47: 545-556. [In Persian].
42. Venkatesan, A.K., Ahmad, S., Johnson, W. and Batista, J.R., 2011. Salinity reduction and energy conservation in direct and indirect potable water reuse. *Desalination*, 272: 120-27.
43. Xu, Z.X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Zhang, X.W., 2002. Sustainability Analysis for Yellow River Water Resources Using the System Dynamics Approach. *Water Resources Management*, 16: 239-261.
44. Yazdanparast, M., Ghorbani, M., Salajegheh, A. and Kerachian, R., 2023. Development of a Water Security Conceptual Model by Combining Human-Environmental System (HES) and System Dynamic Approach. *Water Resources Management*, 37: 1695-1709.
45. Yousefi, S., Mirdamadi, S.M., Hosseini, S.J. and farajoallah Lashgarara, F., 2023. Designing Scenario for Changing the Cultivation Pattern for the Sustainability of Water Resources in West Azerbaijan Province using a Dynamic System. *Water Resources Engineering*, 16: 75-90. [In Persian].
46. Zarei, B., 2018. An investigation of factors influencing the sustainable development of water resources management in agriculture (case study: Sarvestan). Islamic Azad University, Arsanjan. [In Persian].
27. Movaseghi Gilani, M., Afshar Kazemi, M.A. and Keramati, M.A., 2024. Presenting a model for managing agricultural, industrial, and household water consumption in Iran by combining system dynamics and genetic algorithm. *Water Resources Engineering*. [In Persian].
28. National Water & WasteWater Eng. Co., 2020. Statistical Yearbook of Iran Water and Wastewater Engineering Company. Planning and budget office.
29. Phan, T.D., Bertone, E. and Stewart, R.A., 2021. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2, p.100031.
30. Qaiser, K., Ahmad, S., Johnson, W. and Batista, J., 2011. Evaluating the impact of water conservation on fate of outdoor water use: A study in an arid region. *Journal of environmental management*, 92(8): 2061-2068.
31. Qin, H., Cha-tien Sun, A., Liu, J. and Zheng, C., 2012. System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain. *Water Policy*. 14: 214-231.
32. Ram, S.A. and Irfan, Z.B., 2021. Application of System Thinking Causal Loop Modelling in understanding water Crisis in India: A case for sustainable Integrated Water resources management across sectors. *HydroResearch*. 4: 1-10.
33. Senge, P.M., 2014. The fifth discipline fieldbook: Strategies and tools for building a learning organization. *Crown Currency*.
34. Shafaghati, M., 2008. Studying the country's comprehensive water cycle management system and structure. Deputy of Forests, Range and Watershed Management Organization. [In-Persian].
35. Shiu, H.Y., Lee, M., Lin, Z.E. and Chiueh, P.T., 2023. Dynamic life cycle assessment for water treatment implications. *Science of the Total Environment*, 860, p.160224.
36. Simonovic, S.P. and Li, L., 2003. Methodology for Assessment of Climate Change Impacts on Large-Scale Flood Protection System. *Journal of water resources planning and management*, 129: 361-371.

Presenting a model for managing Iran's agricultural, industrial and households water consumption with a systems dynamics approach

Movaseghi Gilani, M.¹, Afshar Kazemi, M. A.^{2*} and Keramati, M. A.³

Extended Abstract

Water scarcity is one of the most critical issues in the 21st century that human societies are facing. Population growth, industrial and agricultural activities, rapid urbanization, and drastic changes in climate conditions have had a significant impact on limited water resources and the environment in river basins. In recent years, reduced rainfall, improper water resource management, inappropriate distribution of water-intensive industries, and inefficient water consumption patterns in urban, industrial and agricultural sectors have led to a decrease in the availability of current water sources and the emergence of other negative effects. Water scarcity has a considerable impact on sustainable development. According to inadequate rainfall patterns and poor temporal and spatial distribution, Iran is classified among dry and semi-dry countries globally. In these circumstances, due to population growth, urban expansion, and the development of economic sectors (agriculture and industry), the demand for water is increasing day by day. Regarding the climate and geographical challenges during the ancient history of this country, various innovations in structures and management have emerged in Iran to overcome water resources limitations. The construction of Qanats, storage dams, and diversion structures were among the structural tools, and documented allocation management systems served as the managerial solutions.

The goal of water resource management is to create a system that integrates water resource management with environmental conservation and social and economic development. Also, such management should be able to benefit from the feedbacks and reflections of these components, and ultimately make allocation decisions and develop water resources through the participation of various sectors. An important aspect that should be considered in comprehensive water resource management studies is understanding their components and uncertainties, clarifying direct and indirect relationships between them to prevent solving one problem or planning one component from affecting other parts of the system. So, the purpose of this research is to answer the following questions: 1) What are the key variables in designing a water consumption model? 2) How do key variables behave over time? 3) What is the impact of different pricing and governance scenarios on the country's water consumption? As there are numerous variables and feedback loops in the country's water resource management system, an analytical tool must be used to model the causal relationships between all variables, comprehensively. By employing system dynamics, considering the two-way relationships of all key variables, it is possible to simulate this

1 - Ph. D. Candidate of Industrial Management, Management Faculty, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran.

2 - Information Technology and Industrial Management, Management Faculty, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

3 - Information Technology and Industrial Management, Management Faculty, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

*- Corresponding author: dr.mafshar@gmail.com

Received: 2024/03/03

Accepted: 2024/04/29

system and define appropriate scenarios for the future. The necessary steps for using system dynamics approach for modeling a problem are as follow: 1) Precise definition of the problem and setting system boundaries. 2) Extraction of influential variables and development of causal loop diagram (CLD). 3) Creation of stock flow (SFD) diagram and use of appropriate data for model simulation. 4) Validation of the simulated model. 5) Evaluation of proposed scenarios and presentation of suitable solutions. There have been studies conducted on water management in Iran that proposed models using system dynamic approaches, but none of them was developed on a national scale. In this study, a comprehensive model was provided. The model had the possibility of testing and examining various scenarios and their impacts on the Iran's water resources. Causal structures were extracted by three methods: studying the previous behavior of target variables, consulting with water experts, and reviewing previous literature. Then the model was approved by system dynamic experts. After that, a stock and slow diagram was designed.

The results of this research showed that changes in government pricing policies, which only affect household water consumption tariffs, do not have much impact on water resources. However, if this tariff increase is also applied to the agricultural and industrial sectors, with a change in water consumption patterns in these sectors, it will have a greater impact on preserving the country's water resources. These results are consistent with other research suggesting improving water efficiency in industries through tariff increases and proposing a solution to reform water prices in the agricultural sector through incremental increases rather than sudden increases. Furthermore, the results revealed that the strictest government regulations in the field of water industry development, land under cultivation, and agricultural water consumption patterns will lead to an increase in groundwater resources level and recharge reservoir water resources by 17% and 20% by the year 1420.

Keywords: water resources management, system dynamics, household, agriculture and industry water consumption

Citation: Movaseghi Gilani M. Afshar Kazemi M.A. and Keramati M.A. 2024. Presenting a Model for Managing Iran's Agricultural, Industrial and Households Water Consumption with a Systems Dynamics Approach. *Iranian Water Research Journal*. 52: ??-??.