

## پویایی‌شناسی منابع آب قم

امین آقائی روزبهانی،\* عباس سیفی\*\*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۹ نوع مقاله: ترویجی

### چکیده

در این مقاله، سیستم آب استان قم به وسیله پویاشناسی سیستم‌ها مورد تحلیل و مدلسازی قرار گرفته است. مدل ارائه شده پس از اعتبار سنجی لازم برای شبیه سازی بازه ۰۳ ساله، یعنی از سال ۰۹۳۱ تا سال ۰۲۴۱، مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل، منابع آب استان قم، منابع زیرزمینی، منابع انتقالی و فاضلاب تصویه شده در نظر گرفته شده و از سوی دیگر، عناصر اصلی متقاضی آب بخش خانگی، صنعتی و کشاورزی لحاظ شده است. سیستم‌های مدیریتی منابع آب نیز اصلاح شیوه و الگوی کشاورزی، استفاده مجدد از فاضلاب و طرح‌های انتقال آب خارج از حوزه آبریز در نظر گرفته شده است. اثر هر یک از این سیاست‌های مدیریتی، بر منابع آبی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سناریوهای انتقال آب و تسویه فاضلاب تأثیری بر روند هدر رفت منابع آب زیرزمینی ندارد و تنها اصلاح روش های آبیاری کشاورزی می‌تواند در حفظ و بازسازی منابع زیرزمینی مؤثر باشد. این مدل را می‌توان به عنوان یک ابزار برای تحلیل سیاست ها و راهبردهای حوزه مدیریت آب در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

واژگان کلیدی: منابع آب، پویا شناسی، قم.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

\*. نویسنده مسئول. مربی دانشکده مهندسی، دانشگاه ایوان کی (غیر دولتی)، پست الکترونیک: aghaee@aut.ac.ir  
\*\*. استاد دانشکده صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، aseifi@aut.ac.ir

مجله مهندسی سیستم و بهره‌وری، سال اول، شماره ۴، پاییز ۱۴۰۱، ص ۷ - ۲۵

## مقدمه

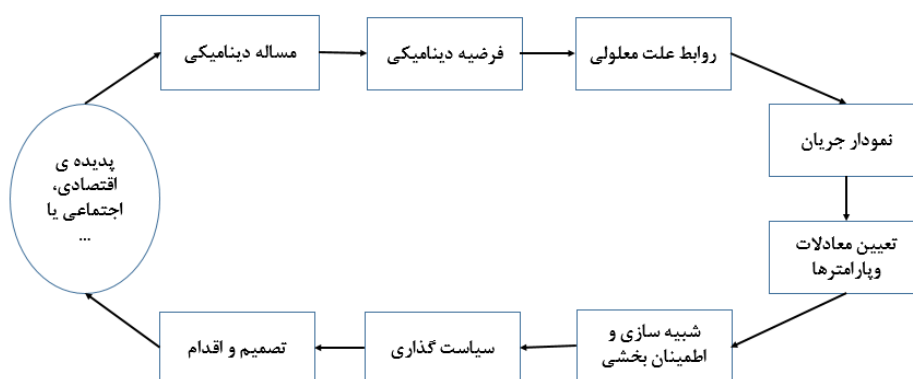
یکی از بحران‌های اصلی در کشورهای مختلف جهان بحث کمبود منابع آبی است؛ چرا که آب عنصر حیاتی بشر است و مستقیم یا غیر مستقیم بر وضعیت زندگی او تأثیر می‌گذارد. کمبود منابع آبی تنها مشکل نیست بلکه بحث مدیریت ناصحیح منابع آبی باعث بروز مشکلات دیگری اعم از آلودگی منابع آب و تغییرات و پدیده‌های زیست‌محیطی است (انجمن جهانی آب<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳). در گذشته، سیستم تأمین منابع آب شهری بسیار ساده بود ولی امروزه با مشکلات به وجود آمده در تأمین آب مورد نیاز شهری روش‌های جدیدی ابداع و به کار گرفته شده است که موجب پیچیده شدن سیستم‌های مدیریت آب شده است.

در تحلیل یک سیستم دو نوع پیچیدگی جزییات و پویایی مد نظر است. پیچیدگی جزییات به تعداد اجزای سیستم و پیچیدگی پویایی به اثرات متقابل اجزای یک سیستم که بعضاً در فواصل زمانی و مکانی از هم قرار دارند، بر می‌گردد (سنگه<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲). پیچیدگی‌های ناشی از پویایی در سیستم‌های تأمین آب شهری مشکلاتی را در مدیریت منابع آب شهری به وجود آورده است. پویاشناسی سیستم به عنوان یک ابزار کارآمد امکان تحلیل سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌کند. با استفاده از این ابزار، می‌توان سناریوهای مختلف مدیریتی را برای یک دوره مشخص زمانی، بر روی یک سیستم پیچیده پیاده کرد و اثرات آنها را مشاهده و مقایسه کرد (سالکه و جاکوبسن<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵).

## پویایی‌شناسی سیستم‌ها

پویایی‌شناسی سیستم یک ابزار پشتیبان تصمیم محسوب می‌شود. از این ابزار می‌توان برای ارزیابی تصمیمات و سیاست‌های کلان و راهبردی بهره برد. پویایی‌شناسی سیستم‌ها بر پایه تفکر سیستمی و ایجاد حلقه‌های بسته از روابط علت و معلولی استوار است. این ابزار در سال ۱۹۶۰ میلادی از سوی پروفسور فارستر ارائه شد (فارستر<sup>۴</sup>، ۱۹۶۹). جریان تحلیل مسائل به روش پویایی سیستم‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است:

1. World Water Forum
2. Senge
3. Sahlke and Jacobson
4. Forrester



شکل ۱: فرایند مدل‌سازی دینامیکی

در تحلیل هر پدیده اقتصادی و اجتماعی ابتدا مسئله دینامیکی ساخته می‌شود که بیانگر حد و مرز مسئله است. بر مبنای مسئله دینامیکی فرضیه‌های دینامیکی ارائه می‌شود. با استفاده از فرضیه دینامیکی که در حقیقت توصیفی ذهنی از مسئله است، روابط علت و معلولی بین متغیرهای مختلفی که در پدیده دخیل هستند، ایجاد می‌شود. با انتخاب برخی متغیرها به عنوان متغیر انباشت و برخی به عنوان متغیر نرخ نمودار علت و معلولی مسئله تبدیل به نمودار جریان می‌شود. مرحله بعدی تعیین معادلات و مقداردهی به متغیرها با استفاده از داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی آن است. شبیه‌سازی باید رفتار تاریخی پدیده را در یک دوره زمانی مشخص نشان دهد که این کار با کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل همراه خواهد بود. در این شرایط، می‌توان با اضافه کردن راهبردها و سیاست‌های جدید در قالب حلقه‌های علت و معلولی اثر سیاست‌های اتخاذشده را قبل از اجرا شبیه‌سازی کرد.

#### استفاده از پویایی‌شناسی در مدیریت منابع آبی

در تحقیقات بسیاری از پویایی‌شناسی سیستم‌ها به عنوان ابزار مناسب تحلیل سیستم‌های منابع آبی استفاده شده است (کوجیری<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸؛ مدنی و مارینو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹؛ گوهری، ۲۰۱۳؛ ژانگ و ژانگ<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸؛ مدنی، ۲۰۱۴؛ ژیا و پوها<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳؛ چنگ<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰؛ سوسنیک<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲).

1. Kojiri
2. Marino
3. X.H. Zhang a, H.W. Zhang a
4. Xi Xia and Kim Leng Poha

بخشی از تحقیقات انجام‌شده در حوزه مدیریت منابع آبی شهری است. استاو<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) تأثیر استفاده از ابزارهای مدیریتی تقاضا بر کمبود آب را در محیط‌های مشارکتی بررسی و راهکارهایی ارائه کرده است. بررسی تغییرات در زیرساخت‌های منابع آب صورت گرفته است (هو و همکاران، ۲۰۰۵). ژانگ<sup>۴</sup> (۲۰۰۸) با استفاده از پویایی‌شناسی، مدلی برای مدیریت یکپارچه منابع آبی و اتخاذ سیاست‌ها و تصمیم‌های کلان برای تخصیص مناسب منابع آبی ارائه داده است. باقری و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم‌ها اثر سیاست‌های مدیریت آب بر بهبود سیستم آب شهری را به منظور افزایش میزان عرضه آب آزمایش کرده‌اند. در ایران نیز تحقیقات زیادی در حوزه تحلیل دینامیکی منابع آبی مناطق مختلف انجام شده است (پیمزد و همکاران، ۲۰۱۰؛ فرتوک زاده و رجبی، ۲۰۰۹؛ شمشادی و ویسی، ۲۰۱۲؛ فرتوک زاده و قجاوند، ۲۰۱۴؛ حسینی و باقری، ۲۰۱۲).

از سوی گوهری و همکاران (۲۰۱۳)، حوزه آبریز گاوخونی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ضرغامی و اکبری (۲۰۱۳) مدل پویاشناسی آب شهر تبریز را مورد بررسی قرار داده‌اند. شمشادی و ویسی (۲۰۱۲) با استفاده از مدل دینامیکی در سیستم‌های آبرسانی شهری، ابعاد بهینه مخازن ذخیره آب را تعیین کرده‌اند.

به طور کلی در این تحقیق، یک مدل پویاشناسی سیستم به منظور شبیه‌سازی سیستم آب شهر قم ارائه شده و تأثیرات پنج سناریوهای مختلف شامل توسعه شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، انتقال آب از حوزه‌های آب خارجی، انتقال پساب شهر تهران، انتقال آب از دریای خزر به کویر مرکزی ایران، انباشت چهار سناریو با هم و در نهایت، سیاست اصلاح کشاورزی و آبیاری بر منابع آبی بررسی شده است.

## منطقه مطالعاتی

### ۱. جغرافیای استان قم

شهر قم که جزو کلان‌شهرها محسوب می‌شود، در یکی از شاه‌راه‌های اصلی ایران قرار گرفته است و دارای تولیدات کشاورزی و صنعتی رو به رشدی است. میانگین درازمدت بارندگی قم ۱۶۰ میلی‌متر است که در مقایسه با میانگین جهانی ۸۰۰ میلی‌متر، مقدار بسیار پایینی است. از طرفی، میانگین دمای سالانه‌ی این شهر ۱۸/۱ درجه سانتیگراد است؛ بنابراین، با توجه به شاخص خشکی دومارتن، منطقه به

1. Cheng
2. Sušnik
3. Stave
4. Zhang

عنوان یک منطقه خشک طبقه‌بندی می‌شود. قم در سال ۸۵ دارای جمعیت ۹۵۹ هزار و ۱۱۶ نفر بوده است که این جمعیت پس از پنج سال در سال ۹۰ به یک میلیون و ۷۰ هزار و ۹۴۹ نفر رسیده است. این شهر با نرخ رشد جمعیت ۱۱/۷٪ از جمله شهرهایی است که نرخ متوسط رشد جمعیت شهری را دارد. به دلیل افزایش جمعیت، تقاضای آب افزایش یافته است؛ بنابراین، شهر برای تأمین نیازهای آبی به منابع آب بیشتری احتیاج دارد.

## ۲. منابع آبی استان قم

منابع آبی استان قم را یکی منابع آب ناشی از سفره‌های زیرزمینی و دیگری منابع آب سطحی ناشی از وجود سدها و روان آب‌ها تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین منبع آب استان قم منابع زیرزمینی آن است. در سال‌های اخیر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از این منبع برای مصارف کشاورزی کیفیت و کمیت آب کاهش یافته است. وضعیت منابع آب زیرزمینی استان قم برحسب تعداد، تخلیه سالانه و به تفکیک نوع منبع و بر اساس آخرین آماربرداری سال ۱۳۸۸ در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: وضعیت منابع آب زیرزمینی قم بر اساس آماربرداری سال ۱۳۸۸

| منابع آب زیرزمینی | تعداد | تخلیه سالانه<br>(میلیون متر مکعب) | درصد تخلیه<br>منابع |
|-------------------|-------|-----------------------------------|---------------------|
| چشمه              | ۱۳۹۷  | ۱۸                                | ۲                   |
| قنات              | ۷۵۳   | ۱۶۴                               | ۱۹                  |
| چاه               | ۴۹۴۰  | ۷۰۰                               | ۷۹                  |
| کل                | ۷۰۹۰  | ۸۸۲                               | ۱۰۰                 |

به منظور جبران کمبود منابع آبی استان، یک طرح انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز اجرا شده که این طرح در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۰ به بهره‌برداری رسیده است. دبی پیش‌بینی شده برای این طرح ۲,۵ متر مکعب بر ثانیه است ولی دبی انتقالی تاکنون در هر ماه متفاوت بوده است. طرح دیگر پروژه انتقال آب‌های سطحی مازاد و پساب استان تهران به دشت مسیله قم است که هدف از آن، احیا و بهبود کشت آبی در بخشی از اراضی دشت مسیله و احیاء سفره آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی دشت عنوان شده است. تغذیه مصنوعی با تخصیص ۶۰ میلیون متر مکعب آب در سال که ۴۰ درصد آن به‌صورت استفاده مستقیم آبیاری و ۶۰ درصد به‌صورت تغذیه مصنوعی همراه با پیش‌آبیاری محقق خواهد شد. در حال حاضر، مطالعات فاز یک طرح به پایان رسیده است. طرح دیگر، پروژه انتقال آب از دریای خزر به کویر مرکزی ایران است. هدف پروژه تأمین آب مورد نیاز شرب و صنعت استان‌ها و شهرهای سمنان، قم، اصفهان، کاشان، یزد و خراسان جنوبی است. در

مرحله اول پروژه سالانه ۳۰۰ میلیون متر مکعب در سال آب شیرین‌سازی و انتقال صورت می‌گیرد که در مراحل بعد حجم آب انتقالی به یک میلیارد متر مکعب افزایش خواهد یافت.

### ۳. مصارف آبی استان قم

سهام مصرف آب بخش‌های مختلف در استان براساس آخرین آماربرداری در جدول (۲) نشان داده شده است:

| جدول ۲: سهم مصرف آب بخش‌های مختلف در قم |        |                            |
|-----------------------------------------|--------|----------------------------|
| نوع مصرف                                |        | حجم بر حسب میلیون متر مکعب |
|                                         |        | آب زیرزمینی                |
|                                         |        | آب سطحی                    |
| کشاورزی                                 | ۸۰۳,۴۴ | ۸۸,۰۸                      |
| خانگی                                   | ۴۰,۰۶  | ۵۸,۷۴                      |
| صنعت                                    | ۲۱,۴۳  | ۱,۲۶                       |
| کل                                      | ۸۶۴,۹۳ | ۱۴۸,۰۸                     |

بخش کشاورزی با مصرف ۹۳ درصد از منابع آب زیرزمینی و ۶۰ درصد منابع آب سطحی بیشترین سهم مصرف منابع آبی استان را داراست.

### ۴. هیدروگراف و کموگراف دشت‌های استان

بررسی وضعیت هیدروگراف دشت‌های استان نشانگر افت مداوم سطح ایستابی دشت‌های مختلف استان است. برای مثال، سطح ایستابی دشت قم از مهر ۵۲ تا شهریور ۹۳ (۴۱ سال گذشته) ۳۴ متر افت داشته که به طور متوسط سالانه ۰,۸۳ متر است. کاهش سطح ایستابی باعث تغییر جهت جریان آب زیرزمینی شده است. به دلیل بر داشت بی رویه و پایین افتادن سطح ایستابی در محدوده دشت قم، جهت جریان آب زیرزمینی از دریاچه نمک به سمت دشت قم معکوس شده است و ادامه این روند، قطعاً موجب وارد آمدن آسیب‌های جدی به آبخوان آب شیرین خواهد شد. بررسی وضعیت کموگراف دشت‌های استان قم به دلیل تغییر جهت جریان های آب زیرزمینی از دریاچه نمک به سمت دشت قم را نشان می‌دهد. بیش از ۸ درصد افزایش در شوری متوسط آب زیرزمینی رخ داده است که این مقدار برای ارتفاعات به حدود ۱۹ درصد افزایش می‌رسد.

## مدل‌سازی

گام اول در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک تعیین متغیرهای کلیدی سیستم و بیان روابط علت و معلولی بین آنهاست. این روابط به صورت حلقه‌های بازخورد مثبت و منفی بیان می‌شود (استرمن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰). در حلقه‌های بازخورد مثبت تغییرات متغیر معلول همسو با متغیر علت است. در حالی که در حلقه‌های منفی متغیر معلول در جهت مخالف با متغیر علت تغییر می‌کند. حلقه‌های بازخورد مثبت سعی در تغییر وضعیت سیستم دارند. هرگاه وضعیت سیستم در اثر حلقه‌های بازخورد مثبت دچار تغییر شود، حلقه‌های بازخورد منفی اثرات عللی را که موجب این تغییر در سیستم شده‌اند، خنثی کرده و سیستم را به حالت اولیه برمی‌گردانند. از طرف دیگر، حلقه‌های بازخورد مثبت، حلقه‌های محرک سیستم محسوب می‌شوند که بسته به شرایط سیستم رشد و یا زوال سیستم را ایجاد میکنند (استرمن، ۲۰۰۰؛ سیمونویک<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹؛ میرچی و همکاران، ۲۰۱۲).

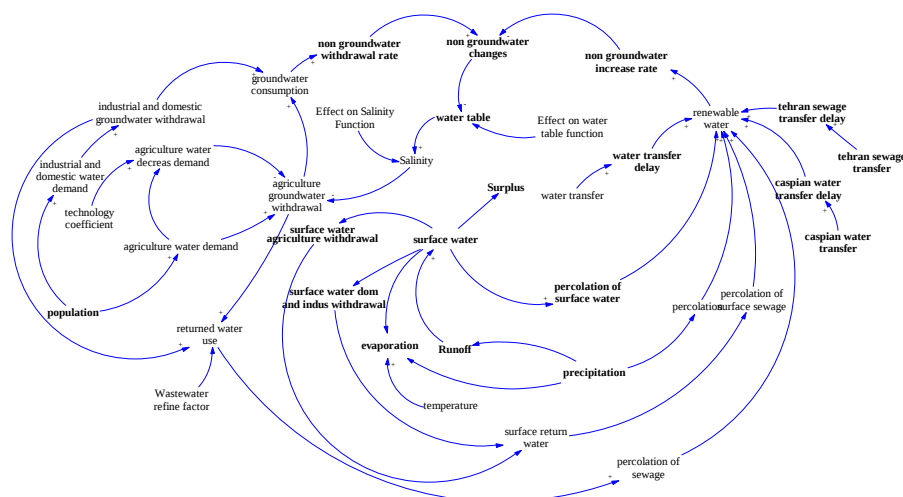
مدل‌سازی در پویایی‌شناسی سیستم‌ها معمولاً در دو فاز مختلف صورت می‌پذیرد. در فاز اول، با تحلیل علت و معلولی سیستم یک نمودار علت و معلولی به دست می‌آید. در این فاز، پس از ایجاد درک جامعی از کلیت سیستم متغیرهای کلیدی سیستم و مرزهای زمانی و مکانی مشخص می‌شود (سیمونویک، ۲۰۰۹). در فاز دوم، از روی مدل علت و معلولی نمودار جریان استخراج می‌شود. در این فاز، ساختار ایجادشده با استفاده از متغیرهای جریان و انباشت تصویر روشنی از سیستم را ایجاد می‌کند. متغیر انباشت وضعیت سیستم را نشان می‌دهد و تغییرات آن با متغیرهای جریان کنترل می‌شود (مدنی و مارینو، ۲۰۰۹). برای مثال، میزان ذخیره آب یک مخزن را می‌توان با نرخ جریان‌های ورودی و خروجی آن تغییر داد.

### ۱. نمودار علت و معلولی

در شکل (۲) نمودار علت و معلولی مربوط به مدل پویایی‌شناسی سیستم آب استان قم نشان داده شده است. در این مدل عناصر آب‌شناسی منطقه نشان داده شده است. پروژه انتقال آب خارج از حوزه، اثر متقابل آب سطحی و زیرزمینی، آب‌شناسی منطقه و تقاضای آب اجزای اصلی این مدل هستند.

1 Sterman

2 Simonovic



شکل ۲: نمودار علت معلولی سیستم یکپارچه آب قم

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه مانند: دما، بارش، تبخیر و تعرق، رواناب و همچنین جریان طبیعی به اندازه تغذیه آب‌های زیرزمینی بر تعادل آب طبیعی حوضه تأثیر گذارند. حلقه‌های علت و معلولی پویایی بین این اجزا را با استفاده از پیکان‌های جهت‌دار مثبت و منفی که بیانگر روابط علت و معلولی است، نشان می‌دهد. علاوه بر این نمودار علت و معلولی مداخلات بشر را در جهت تأمین آب مورد نیاز حوزه آبریز به دلیل افزایش تقاضا نشان می‌دهد. طرح‌های انتقال آب از این دست مداخلات است. تخصیص آب به سه حوزه: مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی انجام شده است. آب‌های سطحی انتخاب اول برای پاسخگویی به این خواسته است. در حالی که آب‌های زیرزمینی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که آب سطحی در دسترس نیست. با توجه به اقلیم منطقه حجم آب سطحی در مقایسه با آب زیرزمینی قابل توجه نیست؛ بنابراین، بخش اعظم نیاز آبی منطقه به وسیله برداشت از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. جریان برگشتی آب آن بخشی از آب استفاده نشده بخش‌های مختلف است که به صورت بازخورد آب سطحی یا زیرزمینی به سیستم بر می‌گردد.

رشد اقتصادی سریع‌تر نسبت به حوزه‌های کناری که در پی ایجاد فرصت‌های شغلی، افزایش کالاها و خدمات به وجود می‌آید، رضایت از سکونت در منطقه را به دنبال داشته و باعث افزایش مهاجرت به منطقه می‌شود (مدنی و مارینو، ۲۰۰۹). حاصل این اتفاق افزایش سرانه تقاضای آب حوزه آبریز است. بنابراین، تقاضای کل آب که حاصل جمع تقاضای آب در سه بخش: کشاورزی، صنعت و خانگی است، افزایش می‌یابد. افزایش مصرف آب‌های زیرزمینی تجدیدناپذیر سطح

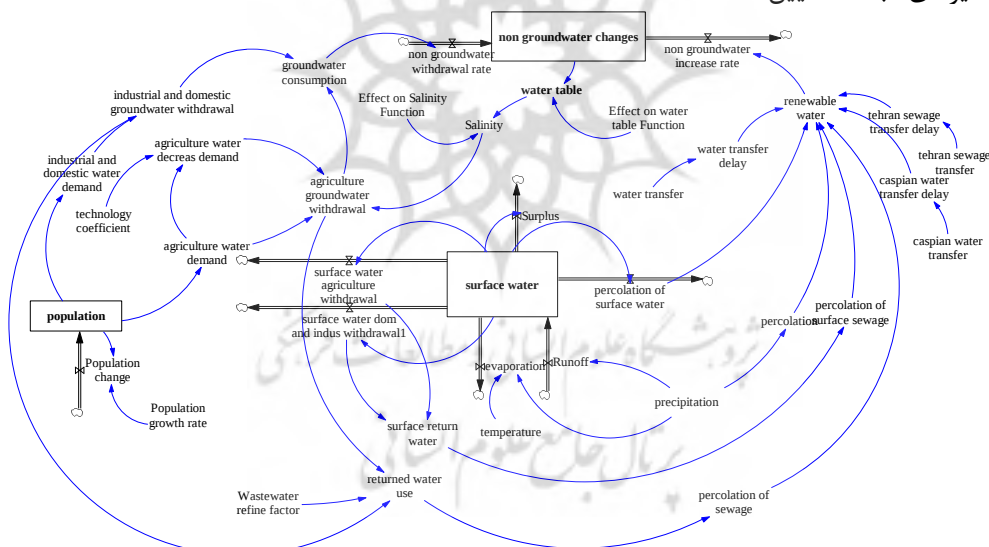
ایستایی آب را کاهش می‌دهد که این خود منجر به شوری آب می‌شود و به طور طبیعی کاهش کیفیت آب برداشت کمتری را به دنبال دارد.

بیش از ۹۰ درصد آب عرضه‌شده به بخش کشاورزی حوزه آبریز تخصیص داده شده است. محصولات متنوعی در حوزه آبریز کشت می‌شود. تقاضای آب کشاورزی و عرضه آب روابط مثبتی با میزان مصرف آب در بخش کشاورزی دارند. مصرف زیاد آب کشاورزی وقتی که با افزایش بهره‌وری سیستم آبیاری همراه شود، تلفات آب را کم می‌کند. از طرفی، افزایش سطح زیر کشت مصرف آب حوزه کشاورزی را افزایش می‌دهد.

متغیرهای مدل مقدار برداشت از آب زیرزمینی، مقدار آب سطحی، نرخ مصرف آب، مقدار آب انتقالی از حوزه‌های خارجی، مقدار تقاضای آب هستند. اطلاعات کمی از آمار آب منطقه‌ای استان قم به دست آمده است.

## ۲. نمودار جریان

نمودار جریان سیستم آب‌شناسی استان قم در شکل (۳) نشان داده شده است. متغیرهای انباشت سیستم میزان آب سطحی، میزان مصرف از منابع آب زیرزمینی و جمعیت است. این متغیرهای انباشت در پاسخ به تغییر متغیرهای جریان وارد شونده و خارج شونده به هر یک افزایش یا کاهش می‌یابند. این نمودار جریان تقریباً شبیه نمودار علت و معلولی شکل (۲) است؛ با این تفاوت که متغیرهای انباشت تعیین شده‌اند.



شکل ۳: نمودار جریان سیستم آب قم

برداشت از منابع آب زیر زمینی موجب کاهش سطح ایستابی در حوزه می‌شود. کاهش سطح ایستابی باعث تغییر جهت جریان آب‌های زیر زمینی از دریاچه نمک به سمت دشت قم شده است. بنابراین، افزایش میزان شوری آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیمی با میزان برداشت از این منابع پیدا می‌کند. رابطه بین سطح ایستابی و میزان برداشت و همچنین اثر سطح ایستابی بر شوری منبع آب شیرین آبخوان به وسیله تابع جست و جو تعریف شده است.

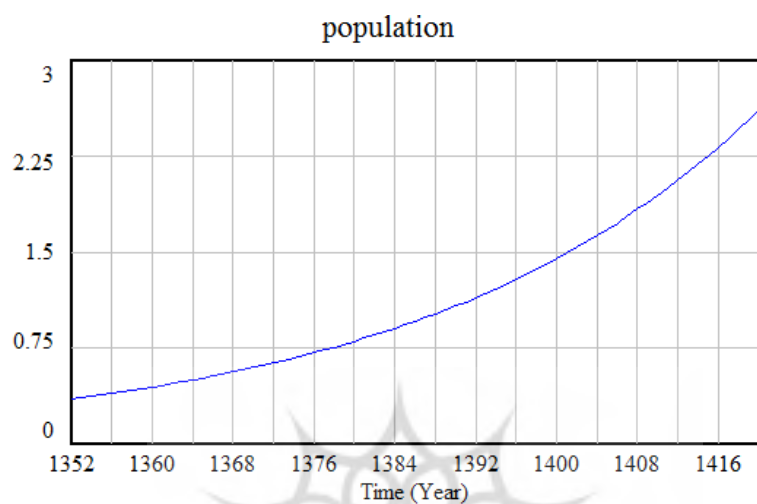
### ۳. اعتبارسنجی و تنظیم مدل

تا پیش از سال ۹۰ آب شرب استان قم به طور عمده از طریق منابع زیرزمینی شامل: چاه‌ها، چشمه‌ها، قنات‌ها و منابع سطحی تأمین می‌شد ولی در اردیبهشت ماه ۹۰ با بهره‌برداری از پروژه اضطراری انتقال از سرشاخه‌های رود دز بخش عمده‌ای از آب شرب قم از طریق این منبع تأمین می‌شود. دبی پیش‌بینی شده برای این طرح ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه است ولی دبی انتقالی تاکنون در هر ماه متفاوت بوده است. طی مطالعات انجام شده در سال‌های ۹۱-۹۳ به طور متوسط ۲ درصد آب شرب مورد نیاز استان از منابع سطحی، ۶۰ درصد از انتقال آب و ۴۰ درصد از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. توانایی مدل در شبیه‌سازی سیستم از طریق آزمون ساختاری و رفتاری مدل اعتبارسنجی شده است. در آزمون ساختاری مدل کفایت مرز مدل، ارزیابی ساختار مدل، ارزیابی طرفین معادلات، ارزیابی پارامترها و آزمون شرایط حدی بررسی شده است. در آزمون رفتاری توانایی مدل در بازتولید رفتار و ایجاد رفتار شرایط مشابه بررسی می‌شود. پس از تنظیم مدل می‌توان از آن برای ارزیابی راهبردهای مختلف مدیریت منابع آبی استفاده کرد.

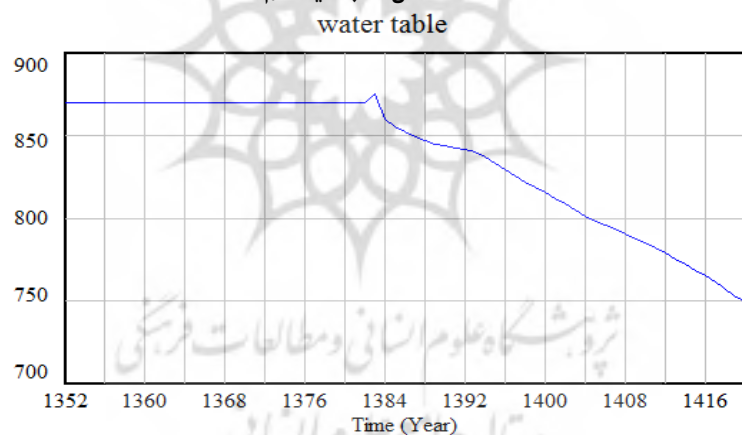
مرزهای فضایی مدل بر اساس مرزهای حوضه آبریز و افق زمانی آن ۳۰ ساله تعیین شده است (۱۳۹۲-۱۴۲۰). مدل با فرض برقراری روند تاریخی داده‌ها در آینده آب‌شناسی برای دوره ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۳ شبیه‌سازی شده است. در این مدل، تبخیر و نفوذ به زمین نیز به ترتیب به عنوان توابعی از دما و بارندگی در نظر گرفته شده‌اند. جریان‌های زیرزمینی، نشت زیرزمینی جریان‌های خروجی متغیرهای ثابت مدل در نظر گرفته شده‌اند. جمعیت اولیه و میزان تقاضای بخش‌های مختلف بر اساس داده‌های سال ۱۳۹۲ در نظر گرفته شده است.

ظرفیت‌های آب سطحی و برداشت آب زیرزمینی به ترتیب ۲۰۰ و ۶۰۰ میلیون متر مکعب در سال بر اساس سطح مصرف آب کنونی در حوزه آبریز در نظر گرفته شده و برای دسته‌بندی منابع آب سطحی و زیرزمینی داده‌های عرضه آب شرکت آب منطقه‌ای استان قم استفاده شده است.

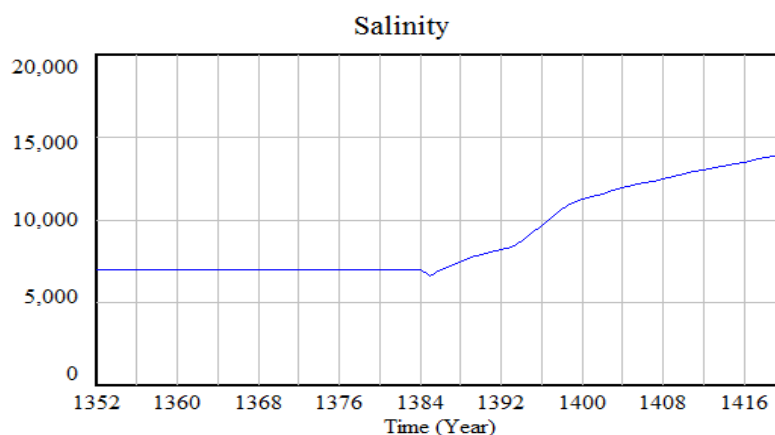
در گام اول تنظیم مدل، بیشتر متغیرهای مدل ثابت نگه داشته شده و شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن حلقه‌های بازخورد سیستم اجرا شد. در مرحله بعد، فرایند بازتولید روند تاریخی سیستم با بازخورد پویا به وسیله تنظیم برخی از متغیرهای هیدرولوژیکی و اجتماعی و اقتصادی آغاز شد. در نهایت، با اجرای مدل همراه با تمام حلقه‌های بازخورد تغییرات بیشتری از پارامترهای به منظور پیروی از روند رفتارهای مشاهده شده در حوضه بر اساس داده‌های تاریخی در دسترس ساخته شده است.



شکل ۴: جمعیت قم



شکل ۵: هیدروگراف دشت قم



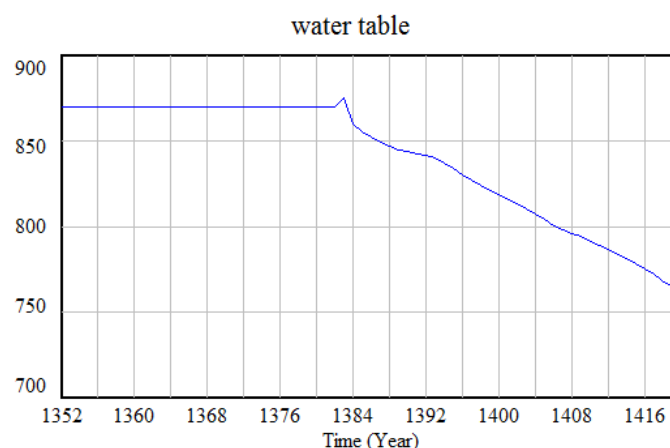
شکل ۶: کموگراف دشت قم

### شبیه‌سازی و ارزیابی سیاست‌های مختلف مدیریت منابع آب

به خاطر تقاضای رو به رشدی که برای منابع آبی وجود دارد، اگر راهکارهایی برای تأمین یا مدیریت آب اندیشیده نشود، استان قم با بحران جدی منابع آبی مواجه خواهد شد. سناریوهای مختلفی برای تأمین منابع آبی استان قم پیشنهاد و بعضی از آنها مانند: طرح انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز نیز در چند ساله اخیر اجرایی شده است. بررسی و ارزیابی این سناریوهای پیشنهادی را می‌توان با مدل ارائه‌شده انجام داد که می‌تواند کمک شایانی برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران حوزه مدیریت منابع آب منطقه باشد.

#### ۱. طرح انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز

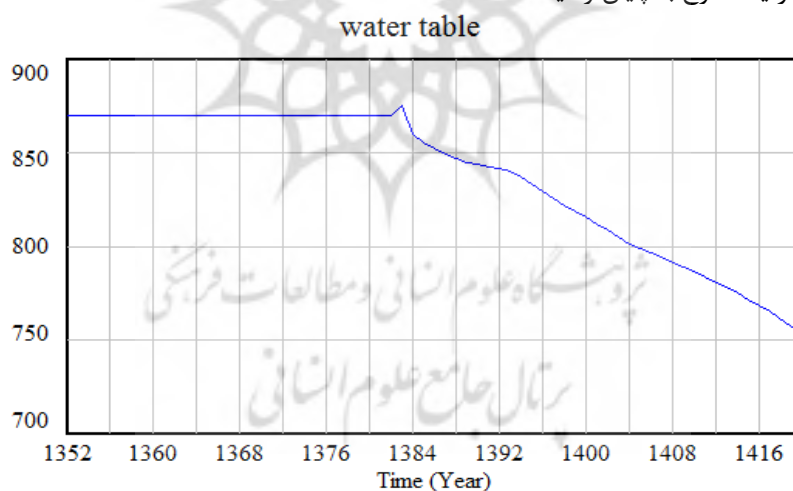
به منظور تأمین آب شرب و صنعت استان قم یک طرح انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز اجرا شده که این طرح در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۰ به بهره‌برداری رسیده است. دبی پیش‌بینی شده برای این طرح ۲,۵ متر مکعب بر ثانیه است ولی دبی انتقالی تاکنون در هر ماه متفاوت بوده ولی سالیانه حداکثر ۱۰۰ میلیون متر مکعب آب منتقل شده است. این انتقال آب از سایر حوزه‌های آبریز با منافع سایر ذی‌نفعان که آب خود را از دست می‌دهند، سازگار نیست. به همین دلیل، می‌تواند موجب نارضایتی‌های اجتماعی در حوزه‌های آبریز مجاور شود؛ بنابراین، ممکن است، ابزار مناسب و پایداری برای جبران کمبود آب نباشد.



شکل ۷: تأثیر طرح انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز بر سطح ایستابی

همان طور که مشاهده می‌شود، انتقال آب از سرشاخه‌های رود دز به تنهایی تأثیر چندانی بر هدر رفت منابع آب زیرزمینی ندارد.

۲. پروژه انتقال آب‌های سطحی مازاد و پساب استان تهران به دشت مسیله قم هدف از اجرای این پروژه احیا و بهبود کشت آبی در بخشی از اراضی دشت مسیله و احیاء سفره آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی و تخصیص ۶۰ میلیون متر مکعب آب در سال است. در حال حاضر، مطالعات فاز یک طرح به پایان رسیده است.



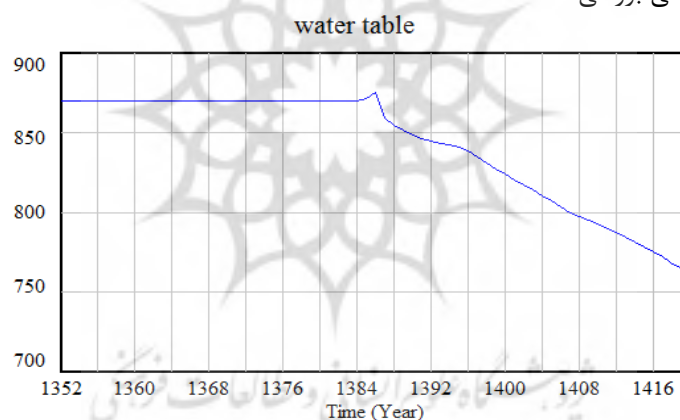
شکل ۸: تأثیر پروژه انتقال آب‌های سطحی مازاد و پساب استان تهران بر سطح ایستابی

همان‌طور که مشاهده می‌شود پروژه انتقال آب‌های سطحی مازاد و پساب استان تهران به تنهایی تأثیر چندانی بر هدر رفت منابع آب زیرزمینی ندارد.

### ۳. تأثیر جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه آن

مجموعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب فوری اضطراری شهر قم با ظرفیت ۱۱۰۰۰۰ نفر به صورت کامل اجرا شده و در حال بهره‌برداری است. حجم پساب خروجی این مجموعه ۸ میلیون متر مکعب در سال است. این در حالی است که میزان فاضلاب تولیدی در شهر قم ۷۴ میلیون متر مکعب در سال است. به وسیله مدل ارائه‌شده یک شبیه‌سازی معنی‌دار از تأثیر ایجاد سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب موجود بر منابع آب نشان داده شده است.

تصفیه‌خانه جامع شهر قم در طراحی نهایی در ۶ واحد با جمعیت تحت پوشش یک و نیم میلیون نفر اجرا خواهد شد که در حال حاضر، واحد اول آن با ظرفیت ۲۵۰۰۰ نفر در حال بهره‌برداری است. حجم پساب برای هر واحد تصفیه‌خانه ۱۸ میلیون متر مکعب است که در مجموع، ظرفیت تولید ۱۰۸ میلیون متر مکعب پساب خروجی را ایجاد خواهد کرد. طبق برنامه تعیین‌شده این امر برای افق ۱۴۱۵ محقق خواهد شد که با توجه به رشد جمعیت شهر قم، میزان فاضلاب تولیدی به ۱۱۶ میلیون متر مکعب خواهد رسید. تأثیر ایجاد شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب به روش پویایی‌شناسی بررسی شده است.

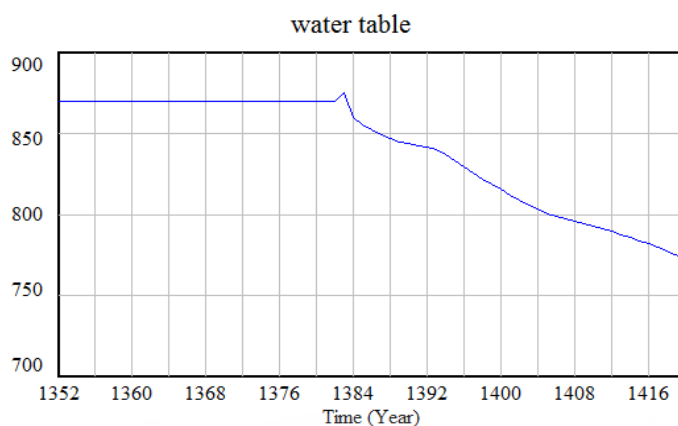


شکل ۹: تأثیر ایجاد شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب بر سطح ایستابی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری به تنهایی تأثیر چندانی بر هدر رفت منابع آب زیرزمینی ندارد.

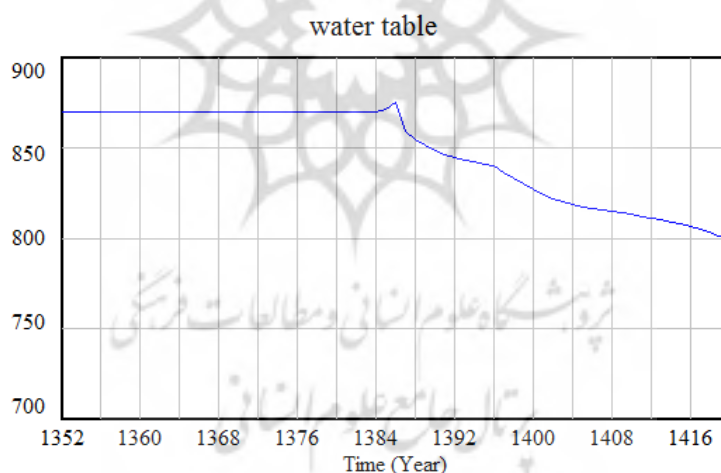
#### ۴. پروژه انتقال آب از دریای خزر به کویر مرکزی

هدف پروژه تأمین آب مورد نیاز شرب و صنعت استان‌ها و شهرهای: سمنان، قم، اصفهان، کاشان، یزد و خراسان جنوبی است. در مرحله اول پروژه سالانه ۳۰۰ میلیون متر مکعب در سال آب شیرین‌سازی و انتقال صورت می‌گیرد که در مراحل بعد حجم آب انتقالی به یک میلیارد متر مکعب افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۰: تأثیر اجرای پروژه انتقال آب از دریای خزر به فلات مرکزی بر سطح ایستابی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اجرای پروژه انتقال آب از دریای خزر به فلات مرکزی به تنهایی تأثیر چندانی بر هدر رفت منابع آب زیرزمینی ندارد.

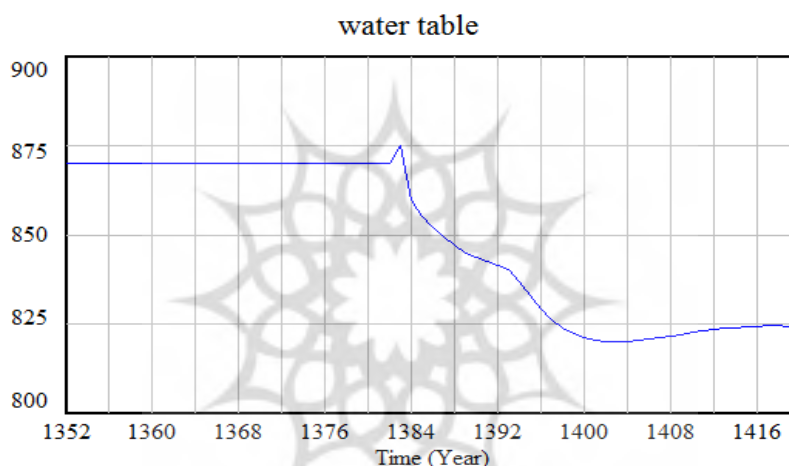


شکل ۱۱: اثر مجموع سناریوهای انتقال و تسویه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اجرای مجموع سناریوهای انتقال و تسویه هدررفت منابع آب زیرزمینی را کند می‌کند ولی در دراز مدت آن را متوقف نمی‌کند و تأثیر چندانی بر حفظ منابع آبی ندارد.

### ۵. اصلاح و سیستم آبیاری و تغییر الگوی کشاورزی

میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی ۸۸۲ میلیون متر مکعب در سال است. سهم بخش کشاورزی ۷۵۶٫۸ میلیون متر مکعب است. این ارقام نشان می‌دهد که بخش کشاورزی سهمی ۸۶ درصدی در تخلیه آب‌های زیرزمینی دارد. از طرفی، ۷۴ درصد کشاورزی قم به صورت سنتی و ۲۶ درصد آن به صورت نیمه مدرن انجام می‌شود؛ بنابراین، یکی دیگر از سیاست‌ها اصلاح سیستم کشاورزی است. اثر این عامل بر کمبود منابع آب با فرض توسعه شیوه‌های مدرن کشاورزی و آبیاری در بازه زمانی ۱۰ ساله و استفاده از سیستمی با ۷۰ درصد تقاضای آب سیستم موجود سناریوی دیگری است که بررسی شده است.



شکل ۱۲: اثر اصلاح و سیستم آبیاری و تغییر الگوی کشاورزی بر سطح ایستابی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اصلاح و سیستم آبیاری و تغییر الگوی کشاورزی روند هدررفت منابع آب زیرزمینی را متوقف می‌کند و تأثیر بسزایی در حفظ و بازسازی منابع آب زیرزمینی دارد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل پویاشناسی برای مدیریت یکپارچه منابع آبی استان قم ارائه شده است. رشد جمعیت و عدم وجود فرهنگ مصرف از چالش‌های اصلی شهرهای بزرگی است که در نواحی خشک و نیمه

شک واقع شده‌اند. این مناطق، معمولاً با کمبود منابع آبی مواجه هستند. به وسیله این مدل سناریوهای مختلفی بررسی شده است. نتایج ارزیابی سناریوها نشان می‌دهد که توسعه سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری عرضه آب را افزایش می‌دهد و در نتیجه، بر کاهش کمبود آب مؤثر است. اگر چه این سیستم مقدار آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد. طرح انتقال آب به تأمین منابع آب استان کمک می‌کند ولی تأثیر چندانی در احیای منابع آبی زیرزمینی ندارد، ضمن اینکه می‌تواند با نارضایتی استان‌های مجاور همراه باشد. طرح انتقال آب از پساب‌های استان تهران و همچنین طرح انتقال آب از دریای خزر به فلات مرکزی ایران نیز هر چند که بخشی از آب مصارف کشاورزی را تأمین می‌کند ولی تأثیر چندانی در برآورده کردن نیاز آبی استان ندارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بررسی راهبردی اصلاح شیوه کشاورزی نشان می‌دهد که این سیاست می‌تواند نقش مؤثری در حفظ و بهبود منابع آب زیرزمینی استان داشته باشد. نگاه کلی به مدل ارائه‌شده برای مدیریت منابع آب قم نشان می‌دهد که این مدل یک ابزار قوی برای تحلیل سیاست‌ها و راهبردهای حوزه مدیریت آب در منطقه است. برای ادامه تحقیق و بررسی بیشتر علاوه بر سناریوهای بررسی‌شده از این مدل می‌توان سناریوهای دیگری مانند: تأثیرات تغییرات قیمت و یا تغییر اقلیم منطقه را نیز با استفاده از این مدل بررسی کرد؛ بنابراین، مدل پویایی‌شناسی ارائه‌شده را می‌توان به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم مؤثر مورد استفاده قرار داد.



## منابع

- Bagheri , Darijani, Asgary and Morid (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 Res Manage*;24(1):2567–96.
- Fartookzadeh and Ghojavand, (2014).” Dynamic Modeling of the Water Supply System in Tehran Region Aimed at a More Effective Management” *J. of Water and Wastewater*, 2, 23-36. (In Persian)
- Fartokzadeh and Rajabi Nahoji, (2009). “Dynamic modeling of entrepreneurship opportunity “Urban physical distribution underlying metropolises traffic.” *J. of Entrepreneurship Development*, 2(6), 97-124. (In Persian)
- Forrester (1969). *Urban Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Gohari (2013). Water transfer as a solution to water shortage A fix that can Backfire. *Journal of Hydrology* 491 23–39
- Gohari, Eslamian, Mirchi, Abedi-Koupaei, Massah Bavani and Madani, (2013). “Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire”. *Journal of Hydrology* 491 (2013) 23–39.
- Ho CC, Yang CC, Chang LC, Chen TW (2005). The Application of system dynamics modeling to study impact of water resources planning and management in Taiwan. In: *The 23rd International Conference of the System Dynamics Society*.
- Hosseini and Bagheri, (2012).” System Dynamics Modeling of the Water Resources System in Mashad Plain to Analyze Strategies for Sustainable Development” *J. of Water and Wastewater*,4, 28-39. (In Persian)
- Kojiri(2008). World continental modeling for water resources using system dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth* 33 304–311
- Li CHENG (2010). System dynamics model of Suzhou water resources carrying capacity and its application. *Water Science and Engineering*, 3(2): 144-155
- Madani (2014). Water management in Iran what is causing the looming crisis. *J Environ Stud Sci*. DOI 10.1007/s13412-014-0182-z
- Madani and Marino (2009). System dynamics analysis for managing Iran’s Zayandeh-Rud river basin. *Water Res Manage*;23(11):2163–87.0
- Mirchi, Madani, Watkins, Ahmad, S.(2012). Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resour. Manage*. 26 (9), 2421–2442.
- Paymozd, S., Morid, S., and Moghadasi, M. (2010). “Nonlinear planning and systems dynamic in agricultural water allocation (case study: The basin of Zayanderood).” *J. of Irrigation and Drainage*, 1(4), 42-55. (In Persian)

- Sahlke and Jacobson (2005). System dynamics modeling of transboundary system: the Bear River basin model. *Groundwater*;43(5):722–30.
- Senge, (1992). *The Fifth Discipline: The Art & Practice of the Learning Organization*. Doubleday Currency Press, New York.
- Shemshadi and Veysi, (2012). "The Optimum Dimension of Water Storage Tanks in Urban Water Supply Systems using a Dynamic Model" *J. of Water and Wastewater*, 4, 129-134. (In Persian)
- Simonovic, (2009). *Managing water resources, methods and tools for a system approach*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO Publishing, Paris, p. 640.
- Stave (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *J Environ Manage*;67(4): 303–13.
- Sterman, (2000). *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for A Complex World*. McGraw-Hill, Boston.
- Sušnik (2012). Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment Case study of the Kairouan region. *Science of the Total Environment* 440 290–306
- World Water Forum(2003) (The 3rd), Final Report, 16–23 March, Kyoto, Japan.
- X.H. Zhang a, H.W. Zhang a (2008). Water resources planning based on complex system dynamics: A case study of Tianjin city. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 13 2328–2336
- Xi Xia, Kim Leng Poha ( 2013 ). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science* 16 157 – 166
- Zarghami and Akbariyeh, (2013). "System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran". *j. Resources, Conservation and Recycling* 60 (2012) 99– 106
- Zhang XH, Zhang HW, Chen B, Chen GQ, Zhao XH (2008). Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city. *Commun Nonlinear Sci Numerical Simul*;13:2328–36.