Extracting Sustainable Urban Water Policies with Dynamic System Approach (Case Study: Qom City)

H. Farmani Entezam [1], F. Movahedi Sobhani [2], M. Vaez Tehrani [3], S. E. Najafi[4]

1. PhD Student, Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding Author) fmovahedi@iau.ac.ir
3. Head of Water Operation Group, Deputy of Operation Management, Water and Wastewater Company, Tehran, Iran
4. Assist. Prof., Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received Sep. 9, 2017 Accepted Jan. 29, 2018)

To cite this article :
Farmani Entezam, H., Movahedi Sobhani, F., Vaez Tehrani, M. & Najafi, S. E., 2018, "Extracting sustainable urban water policies with dynamic system approach (Case study: Qom City)." Journal of Water and Wastewater, (In press). Doi: 10.22093/wwj.2017.97800.2488 (In Persian)

Abstract

Qom city (located in the central desert of Iran) has always faced the problem of water shortage. In recent years, due to various reasons such as urbanization, increased immigration and tourism prosperity, this problem has become a more serious trending water crisis. In spite of the steps taken to maintain the sustainability of potable water, predictions indicated that if the existing situation persists, in 2022 the city will be in a state of unstable water. To overcome this dilemma, this paper aims to identify and present sustainable urban Potable water policies on a thirty-year horizon through system dynamics and the use of Vensim software. These policies are generally presented in two parts: Supply and Demand. The supply policies include separation of potable water from non potable water, using fresh water or wastewater, and managing the water supply losses. In demand management, the policies are to control the population, control the pattern of domestic demand, and control the Exempt Demand. The new policy investigated and proposed by this research which is proportional to the problem was the separation of potable water from non potable water and control the exempt demands over time and their impact on the sustainability of urban potable water.

Keywords: Sustainability of Potable Water, System Dynamics, Crisis, Qom City.

Archive of SID

www.SID.ir

 dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

استخراج سیاست‌های پایدار آب شرب شهری با رویکرد پویایی سیستم
(مطالعه موردی: شهر قم)

حسن فرمانی انتظام[۱]، فرزاد موحدی سبحانی[۲]، مهسا واعظ تهرانی[۳]، سید اسماعیل نجفی[۴]

۱- دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول) fmovahedi@iau.ac.ir
۳- رئیس گروه بهره‌برداری آب، معاونت راهبری و نظارت بر بهره‌برداری، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران، ایران
۴- استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۶/۶/۱۸ پذیرش ۹۶/۱۱/۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
فرمانی انتظام، ح.، موحدی سبحانی، ف.، واعظ تهرانی، م.، نجفی، س. ا.، ۱۳۹۷، "استخراج سیاست‌های پایدار آب شرب شهری با رویکرد پویایی سیستم (مطالعه موردی: شهرقم)" مجله آب و فاضلاب، (در انتظار چاپ). Doi: 10.22093/wwj.2017. 97800.2488

چکیده

شهر قم به‌دلیل موقعیت جغرافیایی و واقع شدن در کویر مرکزی ایران همواره با مشکل کمبود آب روبرو بوده است و در سال‌های اخیر به دلایل مختلف از جمله گسترش شهرنشینی، افزایش مهاجرت و رونق گردشگری، این مشکل تبدیل به بحران شده است. با وجود اقدامات انجام شده به‌منظور پایداری آب شرب از جمله انتقال آب از سر شاخه‌های دز به قمرود، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد در صورت ادامه وضعیت موجود، در سال ۱۴۰۱، این شهر در شرایط ناپایداری آبی قرار خواهد گرفت. برای رفع این معضل، در این پژوهش با به‌کارگیری پویایی سیستم و استفاده از نرم‌افزار Vensim ، سیاست‌های پایداری آب شرب شهری در یک افق سی ساله شناسایی و ارائه شد. در چنین پژوهش‌هایی، این سیاست‌ها اصولاً در دو بخش ارائه می‌شود: بخش عرضه که عبارت است از جداسازی آب شرب از آب غیر شرب، استفاده از پساب یا آب جدید و مدیریت تلفات شبکه آبرسانی؛ و بخش تقاضا که عبارت است از کنترل جمعیت، کنترل الگوی مصارف خانگی و کنترل مصارف معاف از قیمت. اما سیاست تازه و متناسب با این مشکل که در این پژوهش بررسی و پیشنهاد شده است، عبارت است از جداسازی آب شرب از آب بهداشتی و کنترل مصارف کاربری‌های معاف از قیمت و تأثیر آن‌ها بر پایداری آب شرب شهری.

واژه‌های کلیدی: پایداری آب شرب، پویایی سیستم، بحران، شهر قم

۱- مقدمه

آب از مؤلفه‌های اساسی در پایداری محیط زیست است و مدیریت آن به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار ضروری است (UN-Water, 2009). برنامه‌ریزی و مدیریت خردمندانه به‌منظور بهره‌برداری از منابع آب، و توسعه اقتصادی و اجتماعی، فقر را کاهش می‌دهد و باعث افزایش عدالت می‌شود.

در مدیریت عرضه منابع آب، مسئولان با احداث زیرساخت‌های دارند، در صورتی که در نقطه مقابل و در مدیریت تقاضا، سعی می‌شود الگوهای مصرف به گونه‌ای تغییر پیدا کند که با منابع موجود، تقاضاهای مختلف تأمین شود. مدیریت سیستم‌های منابع آب و تخصیص آن به بخش‌های مصرف، همواره چالش و تضادهایی را به‌همراه داشته است (Madani and Mariño, 2009).

کی و چانگ در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ در شهر فلوریدا با

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

استفاده از پویایی سیستم‌ها، اقدام به ارزیابی تقاضای آب خانگی نمودند. این پژوهش نشان داد که بین نرخ بیکاری و درآمد متوسط سالانه، به‌عنوان دو شاخص اصلی اقتصاد کلان و دیگر عوامل اقتصادی- اجتماعی تعاملاتی وجود دارد که در نهایت باعث تأثیر بر تقاضای آب خانگی می‌شود(Qi and Chang, 2011).

در پژوهش دیگر با رویکرد پویایی سیستم نشان داده شده است که مؤلفه‌های مؤثر تأمین پایدار آب شرب شهری سنگاپور، استفاده از آب شیرین کن‌های صنعتی و پساب فاضلاب به عنوان یک آب جدید است (Xi and Poh, 2013).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۶ مدل پویایی سامانه مدیریت آب شهری به‌منظور شبیه‌سازی تعاملات تقاضای آب شهری، جامعه، اقتصاد، آب و هوا و اقدامات حفاظت از آب پیشنهاد شد. تمایلات حفاظت از آب در این مدل در نظر گرفته شد و اثر آن بر ذخیره آب اندازه‌گیری شد. نتایج مدل‌سازی شهر ماکائو نشان می‌دهد که جمعیت، اصلی‌ترین نیروی محرکه تقاضای آب است و تغییرات دما و بارندگی اثر محسوسی بر تقاضای آب دارند. خروجی تقاضای آب به تغییر جمعیت، تغییر سرانه آب و تغییر دما وابسته است. افزایش بارش باعث کاهش تقاضای آب و افزایش رشد اقتصادی، باعث افزایش تقاضای آب می‌شود. این مدل نشان می‌دهد با اجرای برنامه یکپارچه حفاظت از آب و افزایش فرهنگ حفاظت از آن، تقاضای آب تا ۱۷/۵ درصد کاهش می‌یابد (Wei et al., 2016).

سان و همکاران یک مدل پویا برای استفاده از منابع آب در چین ارائه نمودند و نتایج پژوهش نشان داد که استفاده حداکثری از پساب فاضلاب و به‌کارگیری مجدد از آب، عامل مهمی در پایداری آب است (Sun et al., 2017). در جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده درباره مدیریت آب شهری با رویکرد پویایی سیستم ارائه شده است.

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که اثرات جداسازی آب شرب و بهداشتی و کنترل الگوی مصارف معاف از قیمت در هیچ یک از پژوهش‌ها بررسی نشده است. با توجه به ویژگی خاص اقلیمی و اجتماعی شهر قم و به‌ویژه فراوانی مشترکان معاف از قیمت از جمله حسینیه‌ها، مساجد، حوزه‌های علمیه و غیره، کنترل مصارف این مشترکان در پایداری آب شرب شهری موثر خواهد بود.

جدول ۱- مطالعات تاریخی مدیریت آب شهری با رویکرد پویایی سیستم

Table1. History of the studies of urban water management with system dynamic approach

Study area	Work field	Reference
Tehran City, Iran	Identify indicators of sustainable development in urban water systems	*Bagheri and Hjorth, 2007*
Tabriz City, Iran	Urban Water Modeling in Tabriz	*Zarghami and Akbariyeh, 2012*
Bam City, Iran	Modeling urban water system management after natural disasters based on sustainable development	*Bagheri et al., 2010*
Las Vegas, America	Simulation model of urban drinking water supply	*Stave et al., 2003*
New Zealand	Surface runoff management in urban water	*Winz, 2009*
World	Investigate changes in mineral resources, organic and human-based human activities on Earth	*Forrester, 1997*
America	Dynamic analysis systems bottled water industry	*System and Moloney, 2013*
Singapore	Sustainability of drinking water systems	*Xi and Poh, 2013*
South Africa - small town	Use dynamic system to find water supply and demand difficulties	*Clifford Holmes et al., 2014*
In the city of Tieling, China	Investigate the availability of water resources for sustainable development based on a system dynamics model	*Yang et al., 2015*
Ghana	Sustainable urban water system with evolution in management reform	*Acheampong et al., 2016*
WaLA - Paris suburban	Life Cycle Assessment of scenarios forecast for Urban Water Management	*Loubet et al., 2016*

Archive of SID

www.SID.ir

۱-۱- وضعیت سیستم آب شرب شهری قم

استان قم به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خود و واقع شدن در کویر مرکزی ایران با اقلیم خشک و بارندگی ۱۶۳/۲ میلی‌متر (معادل ۶۴/۷ درصد بارش متوسط کشور) همواره با کم آبی و نبود آب مناسب شرب مواجه بوده است. این در حالی است که در سال‌های اخیر به دلایل مختلف از جمله افزایش مهاجرت، تأمین آب به‌شدت ضرورت پیدا کرده است. منابع تأمین آب شهر قم تاکنون از سد پانزده خرداد در فاصله ۷۵ کیلومتری شهر با قابلیت هدایت الکتریکی آب بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و چاه‌های آب پراکنده در سطح شهر و دشت علی‌آباد با هدایت الکتریکی بین ۱۳۵۰ تا ۷۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر بوده است. به‌علت خشکسالی سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۷۹، کیفیت آب سد پانزده خرداد و چاه‌های داخل شهر به پایین‌ترین حد خود رسید؛ به‌طوری که این آب طبق هیچ استانداردی قابل آشامیدن نبود و به‌دلیل شوری و تلخی آب، عملاً هیچ کدام از شهروندان قمی از آن برای آب شرب استفاده نمی‌کردند و آب شرب مصرفی را از راه‌های زیر تأمین می‌کردند:

- خرید آب از تانکرهایی که آب آشامیدنی را از اطراف قم به داخل حمل می‌کردند و به‌دلیل عدم نظارت بر نحوه تأمین و سنجش کنترل کیفی، این آب مشکلات بهداشتی زیادی را برای شهروندان ایجاد می‌کرد.
- استفاده از آب معدنی بسته‌بندی که به دلیل هزینه‌بر بودن آن، صرفاً تعداد کمی قادر به تأمین این نوع آب بودند.
- حمل آب با وسایل نقلیه شخصی از شهرها و روستاهای اطراف که روشی کارآمد و به صرفه نبود.

به‌منظور رفع مشکل تأمین آب، راه حل‌های مختلفی از جمله موارد زیر ارائه شده است:

- نمک‌زدایی آب انتقالی از سد پانزده خرداد و اختلاط آن با آب چاه‌های علی‌آباد؛
- ذخیره جداگانه آب با کیفیت مناسب و توزیع نوبتی آنها در ساعاتی مشخص؛
- اختلاط آب سد با آب چاه‌های شهر و چاه‌های علی‌آباد؛
- انتقال آب از مناطق همجوار شهری مانند سد کبار؛
- ایجاد شبکه توزیع دو گانه؛
- جداسازی شبکه آب شرب از آب بهداشتی و توزیع آب مناسب از این شبکه‌ها؛
- ایجاد ایستگاه‌هایی برای توزیع و فروش آب شرب؛
- انتقال آب از دوردست با استفاده از خطوط راه آهن؛
- انتقال آب به‌صورت حوضه به حوضه از طریق تونل‌ها و خطوط انتقال آب.

پس از بررسی‌های لازم، در سال ۱۳۷۹ ایستگاه‌هایی برای توزیع و فروش آب شرب دایر شد و ظرفیت آن در سال ۱۳۸۵ از طریق آب شیرین‌کن صنعتی به میزان ۶۰۰۰ لیتر در روز افزایش یافت که به‌عنوان یک تجربه عملی موفق در ایران اجرا شد و می‌توان آن را به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تأمین پایدار آب شرب شهری مطرح کرد.

۱-۲- رابطه آسیب‌پذیری و پایداری در آب شرب شهری

ارزیابی آسیب‌پذیری، بر فهم زمینه‌های ذاتی و درونی تأثیرپذیری افراد، سیستم‌ها یا جوامع تمرکز دارد و شامل ارزیابی عواملی است که چنین تأثیراتی را ایجاد و تقویت، کم یا تثبیت می‌نمایند. در واقع در مقابل ارزیابی صرف آسیب‌پذیری، شناسایی و توصیف عوامل تأثیرگذار بر ایجاد یا افزایش آن بسیار مهم است زیرا تنها با توجه به علل و عوامل ریشه‌ای است که فرایندهای ایجاد کننده آسیب‌پذیری قابل کنترل می‌شوند (Ghadiri, 2007).

از طرفی پایداری وضعیت یک سیستم به‌عنوان یک هدف ثابت کمّی نیست؛ در نتیجه اندازه‌گیری میزان عدم پایداری یک سیستم غیر ممکن است. پایداری یک فرایند متغیر و توجه به آن به‌عنوان قسمتی از یک کار روزانه است. از این رو در واقع پایش یک سیستم به‌منظور ارزیابی پایداری و پایش فرایندها در مسیر، اقدامی مناسب است (Bagheri and Hjorth, 2007). بنابراین در آسیب‌پذیری سیستم آب شهری، مؤلفه‌های مصرف کل و میزان منابع قابل عرضه از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نشان دادن میزان آسیب‌پذیری از معادله ۱ استفاده می‌شود (Bagheri et al., 2010).

$$V = \frac{CW}{AW} \quad (۱)$$

که در این معادله

V آسیب‌پذیری، CW کل مصرف شامل مصارف مفید و میزان

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

هدررفت آب و AW میزان آب قابل عرضه در سیستم است.

در نقطه مقابل آسیب‌پذیری، پایداری آب شرب شهری قرار دارد که از معادله ۲ به‌دست می‌آید (Xi and Poh, 2013).

$$S = \frac{1}{V} = \frac{AW}{CW} \qquad (۲)$$

که در آن

S پایداری آب شرب شهری است.

۲- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش به منظور شناسایی مکانیسم‌های فعال در تأمین پایدار آب شرب شهری در راستای تشریح وضع موجود، از رویکرد پویایی سیستم‌ها استفاده شده است.

در این رویکرد تمرکز بر الگوهای رفتاری سیستم در طول زمان است که بر درک چگونگی اندرکنش فرایندهای فیزیکی، جریان اطلاعات و سیاست‌های مدیریتی استوار است (Bagheri et al., 2010). این نگرش مبتنی بر مکانیسم‌های باز خورهای پویا در سیستم‌هاست و با تکیه بر حلقه‌های علّی و معلولی به توضیح چگونگی وقوع وقایع می‌پردازد (Hosseini, 2009).

پویایی یک سیستم با استفاده از ساختارهای ذخیره و جریان، تأخیرات زمانی، پسخوران‌ها و رفتارهای غیر خطی بیان می‌شود (Sterman, 2000).

۲-۱- فرایند مدل‌سازی

گام‌های مدل‌سازی در روش تحلیل پویایی سیستم به‌ترتیب زیر است:

- بیان مسئله؛
- رسم منحنی‌های مرجع[1]؛

منحنی‌های مرجع به منحنی رفتارهای عمده سیستم گفته می‌شود. این نمودار لزوماً با اعداد واقعی رسم نمی‌شوند، بلکه بیانگر رفتار کلی سیستم از دید متغیرها هستند.

- تعریف متغیرهای عمده مطرح در مسئله؛
- تعریف ارتباط بین متغیرها؛
- ترسیم مدل علّی معلولی برای سیستم؛
- تعریف مرزهای مدل؛
- ساختار نمودار جریان برای مدل؛
- اجرای مدل؛
- کالیبراسیون و صحت‌سنجی
- شبیه‌سازی رفتار سیستم در برابر سناریوهای مختلف مدیریتی؛
- ارائه نتایج و پیشنهادها (Sterman, 2000).

۲-۲- مدل پویای آب شهری قم

شکل ۱ روند میزان برداشت از منابع مختلف در این پژوهش را نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهد می‌شود استان بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ (معادل سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ میلادی) در شرایط خشکسالی شدیدی قرار گرفت؛ و اگر آب انتقالی در این سال‌ها به قم نمی‌رسید، استان دچار بحران شدید کم آبی می‌شد.

شکل ۲ نشان می‌دهد سطح ایستایی در دشت قم از ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۳ یعنی در ۴۱ سال گذشته، ۳۴ متر افت داشته که به‌طور متوسط سالانه حدود ۰/۸۳ متر بوده است. این موضوع بیانگر افزایش میزان برداشت از آب سفره‌های زیرزمینی و تجاوز از میزان آبدهی مطمئن[2] منابع زیر زمینی است.

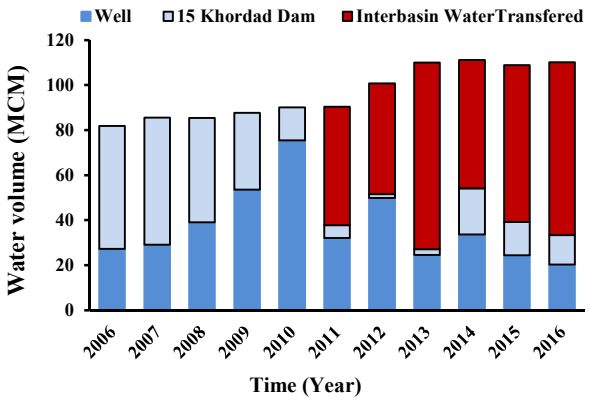

Fig. 1. Urban potable water supply of Qom from 2006 to 2016 (WWCQ, 2016)

شکل ۱- تأمین آب شرب شهری قم از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵

[1] Reference Modes

[2] Safe Yield

www.SID.ir
Archive of SID

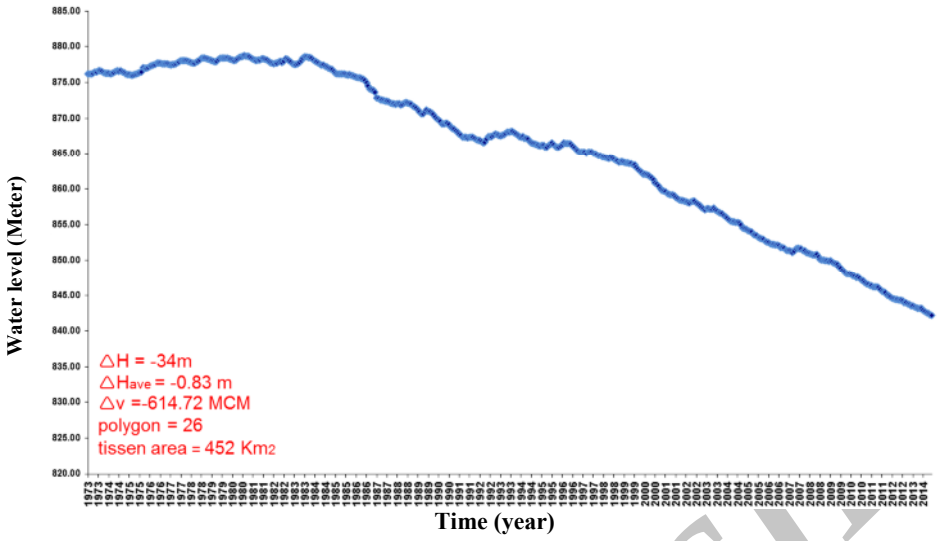

Fig. 2. Variations in Qom Plain aquifer water table level from 1973 to 2014 (QRWA, 2014)

شکل ۲- تغییرات سطح ایستابی سفره آب زیر زمینی شهر قم ازسال ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۳

سطح ایستابی آبخوان، مسیر جریان آب زیرزمینی از دریاچه نمک به سمت دشت قم تغییر یافته است.

بر این اساس با توجه به نرخ رشد جمعیت و در نظر گرفتن تأثیرات مثبت انتقال آب از سرشاخه‌های دز به استان قم و ایجاد راه آهن سریع‌السیر که از استان قم عبور خواهد کرد و همچنین نگرش مثبت مسئولان محترم کشور به‌منظور ارتقای جایگاه علمی و فرهنگی این شهر و با توجه به کلان شهر بودن قم و افزایش استانداردهای زندگی و بهداشت عمومی و سایر مؤلفه‌های تأثیرگذار پیش‌بینی تداوم افزایش جمعیت وجود دارد.

طبق پیش‌بینی به عمل آمده توسط مسئولان استانی نیاز بخش صنعت و کشاورزی استان در افق مطالعه در حال افزایش است (QRWA, 2015). بنابراین ادامه این روند قطعاً به منابع آب شیرین آسیب‌های جدی وارد خواهد کرد.

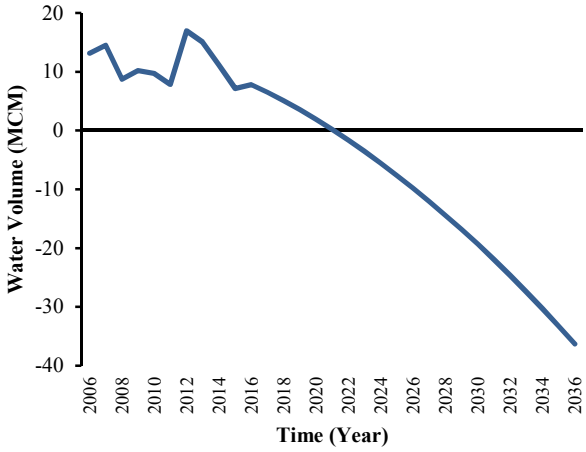

Fig. 3. The behavior of the reference variable with respect to the distance between supply and demand for Qom City from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۳- رفتار متغیر مرجع کمبود آب شرب شهری قم از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

با توجه به شکل ۳ که متغیر مرجع اصلی مطالعه است و فاصله بین عرضه و تقاضا را نشان می‌دهد، در سال‌های آتی با توجه به افزایش جمعیت و برداشت‌های غیر مطمئن از منابع زیرزمینی دشت قم، در صورت بروز مشکل در آب انتقالی به لحاظ کمّی و کیفی، استان دچار بحران خواهد شد. به‌دلیل برداشت بی رویه و پایین آمدن

۲-۳- معرفی منطقه مطالعاتی

استان قم با مرکزیت شهر قم تقریباً در مرکز ایران قرار دارد و از شمال به استان تهران، از شرق به استان‌های سمنان و اصفهان، از جنوب به استان‌های مرکزی و اصفهان و از غرب به استان مرکزی محدود می‌شود و در غرب دریاچه نمک واقع شده است. مساحت

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

استان قم برابر ۱۱۲۳۸ کیلومترمربع است که این مقدار ۰/۶۸ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. در سال ۱۳۹۵ حدود ۸۰ درصد مصرف آب شرب از آب انتقالی سرشاخه‌های دز، واقع در استان لرستان تأمین شده است.

۲-۴- مرزهای مدل

مرزهای مدل شامل موارد زیر است:

۱- مرزهای منابع آب

۱-۱- منابع زیرزمینی دشت قم؛

۱-۲- آب انتقالی از سد پانزده خرداد؛

۱-۳- آب انتقالی از خارج حوضه (سرشاخه‌های دز)؛

۲- مرزهای سیستم مصارف آب شهری قم

۳- ذی نفعان منابع آب در محدوده شهر قم شامل مصرف کنندگان شهری، فضای سبز و صنعت است.

۴- مرز زمانی، تغییرات عوامل طبیعی و انسانی از سال ۱۳۸۵ تا افق سال ۱۴۱۵ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

۲-۵- بررسی زیرمدل‌های پویایی آب شهری قم

۲-۵-۱- سیستم سفره آب زیرزمینی و سطحی شهر قم

سطح آب زیرزمینی دشت قم وابسته به‌میزان نفوذ بارش، نفوذ آب سطحی و آب برگشتی از مصارف خانگی و تغذیه طبیعی آبخوان است.

$$GW_{t+1} = GW_t + RW_t + NR_t - ND_t - GWE_t \qquad (۳)$$

که در این معادله

GW_{t+1} و GW_t میزان ذخیره آب زیرزمینی در دشت قم در سال‌های $t+1$ و t، RW_t شامل میزان آب برگشتی از فاضلاب خانگی منازل که به‌صورت سنتی از طریق چاه‌های جذبی دفع می‌شود و NR_t میزان تغذیه طبیعی آب زیرزمینی در سال t و ناشی از میزان نفوذ آب بارندگی و آب‌های سطحی است که با توجه به احداث سد پانزده خرداد در سال ۱۳۷۵ در ۷۵ کیلومتری دشت قم، این میزان به حداقل خود رسیده است. ND_t میانگین تخلیه طبیعی آب زیرزمینی در سال t و GWE_t میزان استخراج آب توسط چاه‌های شهری در سال t است که این میزان باید کمتر از آبدهی مطمئن باشد.

۲-۶- سیستم مخازن آب سطحی

این سیستم به‌صورت متغیرهای برون زا، با یک الگوی مشخص آب را از مخازن موجود تأمین می‌کند بدون اینکه مدل نسبت به شبیه‌سازی مخازن سدها اقدامی نماید.

۲-۷- جمعیت

جمعیت از جمله عوامل تأثیرگذار بر افزایش مصرف خانگی و نیاز فضای سبز است. مصرف خانگی و نیاز آبی فضای سبز با رشد جمعیت افزایش می‌یابد و منجر به افزایش آب بازگشتی می‌شود. میزان جمعیت متأثر از عوامل تولد، مرگ و میر و مهاجرت است که در معادله ۴ نشان داده شده است. از منظور کردن جمعیت فصلی در مدل صرف نظر شده است.

$$p_{t+1} = p_t + B_t + M_t - D_t \qquad (۴)$$

که در این معادله

p_{t+1} و p_t جمعیت شهر در سال‌های $t+1$ و t، B_t میزان تولد در سال t، D_t میزان مرگ و میر در سال t و M_t میزان خالص مهاجرت به شهر است که باعث تأثیرگذاری بر منابع آبی می‌شود. در این مکانیسم جمعیت به‌عنوان متغیر انباره در نظر گرفته شده است. تولید جمعیت در هر سال به جمعیت سال قبل اضافه می‌شود. دو متغیر نرخ تولد و مهاجرت به‌عنوان ورودی به جمعیت و متغیر نرخ مرگ به‌عنوان خروجی مد نظر قرار می‌گیرد (Zarghami and Akbariyeh, 2012).

۲-۸- تقاضای آب شهری

تقاضای آب شهری شامل تقاضای آب خانگی و غیر خانگی، فضای سبز و صنعتی است. نیاز صنعت تابعی از تعداد واحدهای صنعتی و نیاز متوسط هر واحد است. نیاز فضای سبز در حال حاضر از سفره‌های آب زیرزمینی و آب انتقالی از سد ۱۵ خرداد و سرشاخه‌های دز تأمین می‌شود ولی با تکمیل و توسعه سیستم

Archive of SID

www.SID.ir

فاضلاب شهری به تدریج تخصیص آب فضای سبز از آب سطحی و زیرزمینی به پساب واحدهای تصفیه فاضلاب تغییر خواهد کرد. با توجه به مرز علمی در این پژوهش، از مصارف کشاورزی خارج از مرز مکانی پژوهش صرف‌نظر شد.

۲-۹- سیستم فاضلاب شهری

با توجه به توسعه و تکمیل سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری قم به‌تدریج نفوذ آب برگشتی از مصارف شهری به سفره‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد و از طرف دیگر فاضلاب تصفیه شده به آبیاری فضای سبز و مصارف صنعت اختصاص داده می‌شود.

احداث سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهر قم از سال ۱۳۷۳ شروع شده و پیش‌بینی می‌شود با توجه به سیاست‌های استان مبنی بر کاهش جمع‌آوری فاضلاب و دفع از طریق چاه‌های جذبی، شبکه جمع‌آوری فاضلاب تا سال ۱۴۱۵ به میزان ۵۰ درصد برسد.

۲-۱۰- بیلان آب شهری قم

عامل اصلی در بیلان آب شهری، تفاوت تجمعی عوامل بین خالص عرضه و تقاضا است.

شاخص کمبود آب یک نماد کلی از وضعیت یک سیستم آبی را فراهم می‌کند و آن را به‌عنوان یک ارزش منفی تعادل آب محاسبه می‌کند.

پارامترهایی که بیلان آب تعیین می‌کنند عبارت‌اند از: آب زیرزمینی، آب‌های سطحی، تلفات آب و تقاضای کل آب که در معادله ۵ نشان داده شده است

$$S_{t+1} = S_t + GWE_t + SW_t - l_t + LR_t - D_t \qquad (۵)$$

که در این معادله

S_{t+1} و S_t تراز آب در سال‌های $t+1$ و t، GWE_t آب عرضه شده از تمام چاه در سال t، SW_t آب ارائه شده از تمام منابع آب سطحی، l_t مقدار آب تلف شده در سال t، LR_t مقدار آب ناشی از کاهش تلفات در سال t، D_t مقدار کل آب تخصیص داده شده به متقاضیان در نظر گرفته شده است. تمام متغیرها به‌صورت مترمکعب در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است در مدل توسعه داده شده تقاضا به‌صورت دو بخش شرب و بهداشتی ارائه شده است که آب شرب شامل مصارف خانگی و مصارف معاف از قیمت و آب بهداشتی شامل مصارف صنعتی و فضای سبز است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل‌سازی مکانیسم سرانه مصرف

با فرض اینکه تمام گزینه مدیریت عرضه آب محقق شود و انتقال بین حوضه‌ای نیز انجام شده باشد، در سال‌های آتی چاره‌ای جز مدیریت تقاضا وجود ندارد. معادله ۶ بیانگر مدیریت تقاضاست

$$PC_{t+1} = PC_t - RPC_t \qquad (۶)$$

که در این معادله

PC_{t+1} و PC_t سرانه مصرف در سال‌های $t+1$ و t و RPC_t میزان کاهش سرانه الگوی مصرف در سال t است. در این مکانیسم سرانه الگوی مصرف با متغیر انباره نشان داده شده است. کاهش سرانه الگوی مصرف، تابع دو متغیر باور به کمبود آب و استفاده از کاهنده‌های مصرف است. این دو متغیر ناشی از آگاهی مردم از میزان کمبود منابع آبی است و می‌توان آگاهی مردم را با تخصیص بودجه مدیریت تقاضا افزایش داد. در نتیجه سه عامل آگاهی، در دسترس بودن لوازم کاهنده و اثر قیمت آب در منازل باعث افزایش استفاده از کاهنده‌های مصرف می‌شود. تخمین حداقل نیازهای سرانه آبی ۵۰ لیتر در روز به ازای هر نفر در نظر گرفته شده است و از این میزان حدود ۵ لیتر برای شرب اختصاص دارد. البته این میزان در کشورهای مختلف متفاوت است(Gleick, 1996).

اگر هریک از افراد جامعه باور به کمبود آب داشته باشند می‌توان با استفاده از ابزارهای کاهنده مصرف، ضمن حفظ بهداشت فردی و اجتماعی، سرانه مصرف را کاهش داد. در این پژوهش حداقل نیاز آبی در روز به ازای هر نفر ۹۹ لیتر است.

۳-۲- تخصیص بودجه برای مدیریت عرضه پایدار آب

در مدیریت تأمین آب، بهره‌برداری بهینه از مخازن آبی و همچنین پرداخت هزینه انتقال آب از حوضه‌های دیگر مورد ارزیابی قرار

Archive of SID

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

می‌گیرد؛ این امر خارج از موضوع پژوهش است. در این پژوهش موضوع میزان کاهش نشت، یکی از عوامل مؤثر در مدیریت عرضه است که مدل ریاضی آن به‌صورت زیر ارائه شده است

$$LR_{t+1} = LR_t + LI_t - LD_t \quad (۷)$$

که در این معادله

LR_{t+1} و LR_t نرخ نشت در سال‌های $t+1$ و t و LI_t میزان افزایش نشت به‌دلیل عدم تخصیص بودجه برای کاهش نشت است. نرخ کاهش نشت با تخصیص بودجه مدیریت عرضه، عملیاتی می‌شود.

در صورتی که تخصیص لازم صورت نپذیرد، میزان هدررفت آب افزایش می‌یابد و با کنترل هدررفت، بخشی از تقاضای آب، مدیریت می‌شود و نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر برای انتقال بین حوضه‌ای آب کاهش می‌یابد.

۳-۳- شاخص منفعت به هزینه

این شاخص نسبت درآمد فروش آب به قیمت تمام شده عرضه آب را بر اساس صورت‌های مالی شرکت‌های آب و فاضلاب محاسبه می‌نماید

(۸)

$$\frac{B_t}{C_t} = \frac{DP * DD_t + IP * ID_t + EP * ED_t + LP * LD_t + OP * OD_t + DEP * DED_t}{PT * TS_t + DP * DS_t + GT * GS_t}$$

که در این معادله

B_t درآمد شرکت آب و فاضلاب از بابت فروش آب به انواع مشتریان خود و C_t قیمت تمام شده آب تأمین شده برای آب و فاضلاب شهری در سال t است که از روش‌های مختلف از جمله سد پانزده خرداد، آب انتقالی از سرشاخه‌های دز و چاه‌های شهری محاسبه می‌شود.

DD_t، ID_t، ED_t، LD_t، OD_t، DED_t میزان مصرف کاربری‌های خانگی، صنعتی، معاف از قیمت، فضای سبز و سایر کاربری‌ها و آب شیرین کن صنعتی در سال t است که با ضرب هریک از کاربری‌ها در قیمت فروش آنها، میزان درآمد فروش کل محاسبه می‌شود. TS_t، DS_t و GS_t میزان عرضه آب از منابع مختلف از جمله آب انتقالی از سر شاخه های دز، سد پانزده خرداد و آب چاه‌های شهری در سال t است. پس از شبیه‌سازی مدل، شکل ۴ نشان می‌دهد که در صورت کنترل الگوی مصارف، نسبت منفعت به هزینه کاهش خواهد یافت.

بنابراین لازم است راهکار مناسبی برای کاهش زیان ناشی از کنترل الگو ارائه شود که پیشنهاد مناسب برای آن اخذ بهای واقعی آب از مصرف کنندگان است.

۳-۴- مدل مفهومی

شکل‌های ۵ و ۶ مدل مفهومی وضعیت سیستم آب شهری قم را در شرایط عادی و توسعه یافته ارائه می‌دهد که در شرایط توسعه یافته گزینه‌های جداسازی آب شرب از بهداشتی و کنترل الگوی مصرف خانگی درج شده است. در هر دو مدل ابتدا حلقه رشد هنگام افزایش تقاضا فعال شده است؛ لذا با فعال شدن حلقه‌های تعادلی می‌توان از رشد بی رویه تقاضا جلوگیری کرد.

۳-۵- نمودار انباره‌ها و جریان مدل آب شهری قم

نمودار انباره‌ها و جریان در واقع تبدیل مدل مفهومی به سیستمی مرکب از انباره‌ها، متغیرهای نرخ و روابط بین آنها است. نمودار انباره جریان مدل شهر قم که شامل همه متغیرهای مطرح در نمودار علّی و معلولی است، در محیط نرم‌افزار Vensim در شکل ۷ رسم

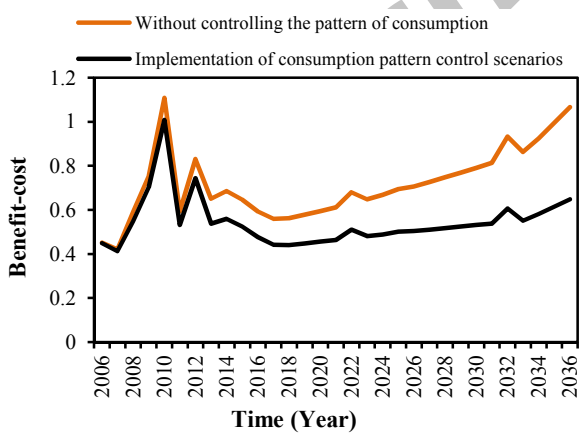

Fig. 4. Benefit-cost trend from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۴- روند منفعت به هزینه از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

Archive of SID

www.SID.ir

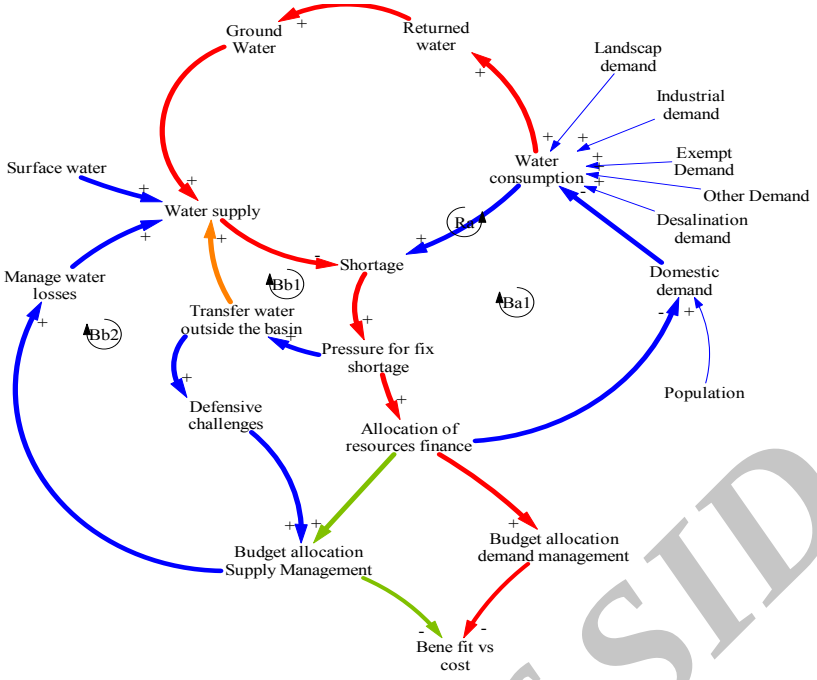

Fig. 5. Causal diagram for Qom SD model

شکل ۵- نمودار علت و معلولی مدل پویایی شهر قم

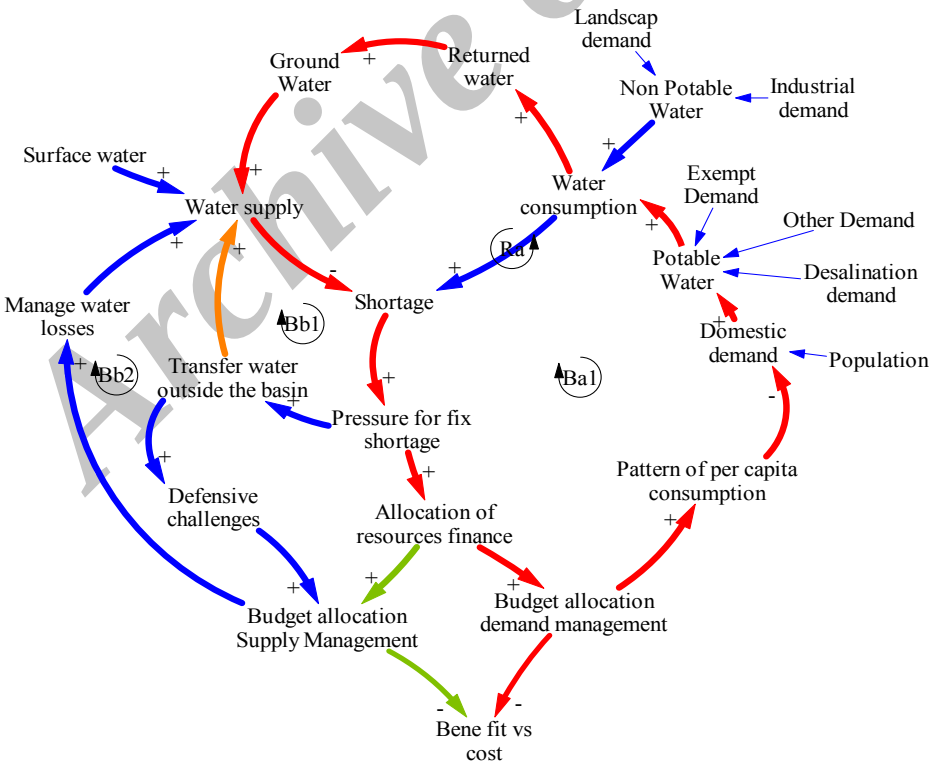

Fig. 6. Causal diagram for the Qom SD improvement model

شکل ۶- نمودار علت و معلولی توسعه یافته پویایی شهر قم

Archive of SID

www.SID.ir

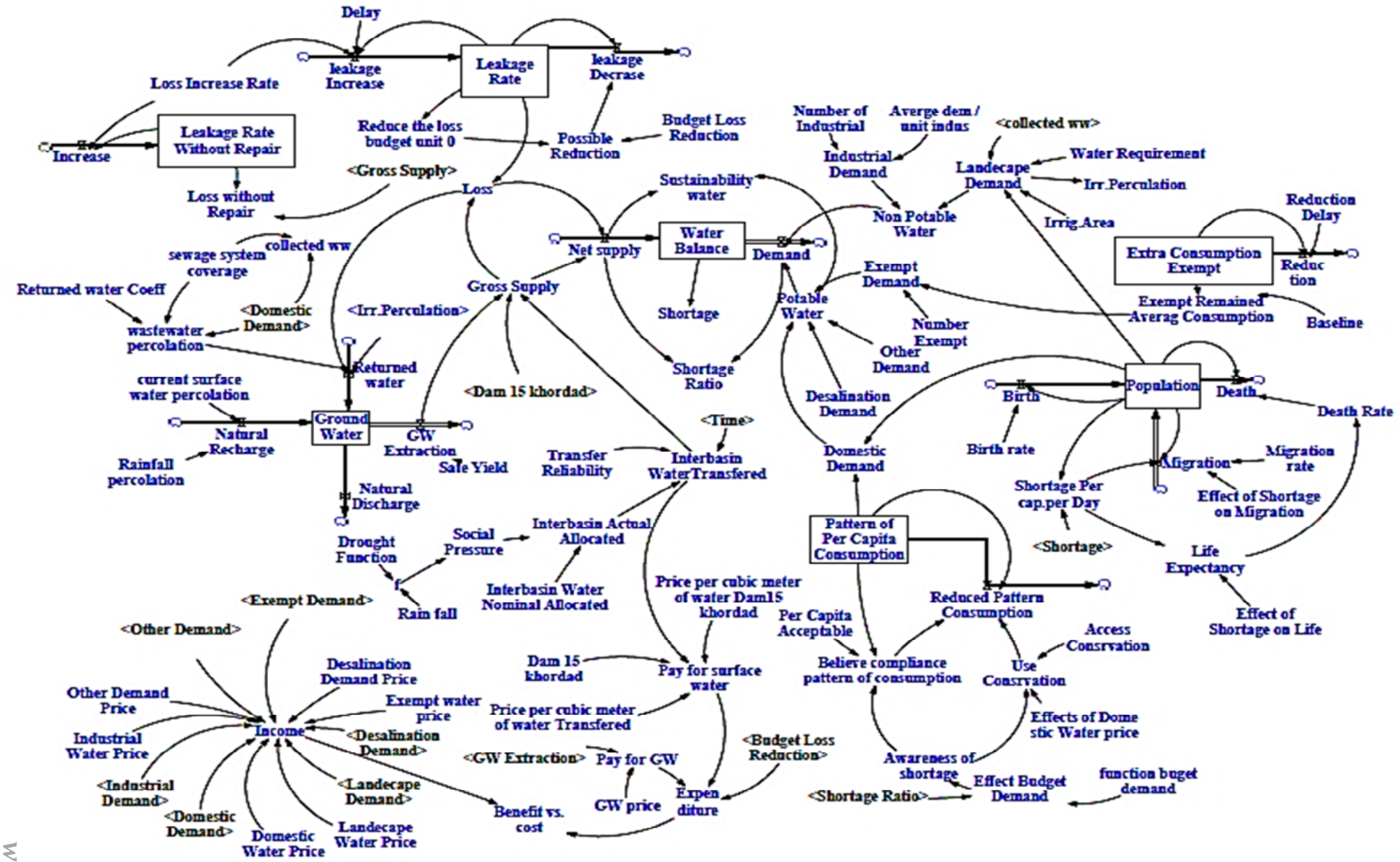

Fig. 7. The stock and flow diagram of the Qom SD model

شکل ۷- دیاگرام انباره و جریان مدل پویایی شهر قم

www.SID.ir

شده است. نرم‌افزارهایی مانند Vensim ، شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم را انجام می‌دهند و تحلیل حساسیت نتایج را به‌صورت تصویری به همراه قابلیت‌های مختلف پشتیبانی تصمیم‌گیری ارائه می‌نمایند (Salavitabar et al., 2006).

۳-۶- اعتبارسنجی و تصدیق مدل

در مدل‌های پویایی، اعتبار ساختار بر اعتبار رفتاری آنها اولویت دارد و در صورت معتبر بودن مدل، می‌توان رفتار الگو را بررسی کرد. سنجش اعتبار ساختار مدل، با برگزاری جلسات و تحلیل متغیرهای درونی مدل و ساختار روابط، عملی شده است. در سنجش اعتبار رفتاری الگو نیز از چندین روش استفاده شد که به چند مورد اشاره شده است.

۳-۶-۱- شبیه‌سازی رفتار حدی

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اعتبار رفتاری مدل بر اساس آزمون شبیه‌سازی رفتار حدی به‌دست آمده است. فاصله عرضه و تقاضا، اختلاف آب تقاضا شده و آب تأمین شده را به‌صورت بیلان آب شرب شهری نشان می‌دهد. با تأمین تمامی آب تقاضا شده همان‌طوری که در شکل ۸ نشان داده شده فاصله عرضه و تقاضا صفر می‌شود و این همان رفتاری است که در صورت برابر شدن تقاضا و عرضه مورد انتظار است.

۳-۶-۲- بازسازی رفتار مرجع

پس از شبیه‌سازی مدل، یکی از مواردی که لازم است مورد توجه قرار گیرد، این است که آیا مدل طراحی شده، رفتاری مشابه با روند گذشته و موجود به‌دست می‌دهد یا خیر. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان گفت رفتار مرجع در محیط شبیه‌سازی شده در این پژوهش، طبق رفتار پیش‌بینی شده بوده است.

۳-۶-۳- آزمون حساسیت

یکی از روش‌های سنجش اعتبار، آزمون حساسیت است. بر اساس این آزمون، تغییرات کوچک و قابل پیش‌بینی در پارامترهای مدل، در حالت عادی، نباید تغییرات شدید و غیر قابل پیش‌بینی در رفتار مدل ایجاد کند (Fartookzadeh et al., 2015). در مدل پژوهش با ۲ درصد افزایش تقاضا، تغییر چشمگیری در فاصله عرضه و تقاضا (بیلان آب) که در شکل ۱۱ نشان داده شده است دیده نشد.

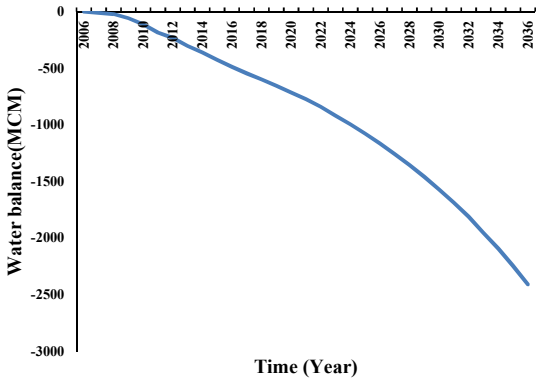

Fig. 8. Qom city water balance from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۸- بیلان آب شهری قم از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

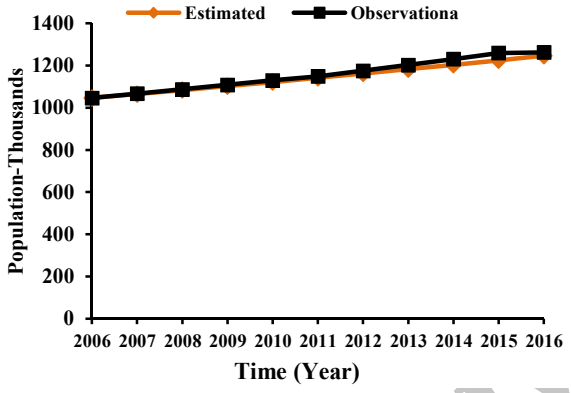

Fig. 9. Population estimates and historical population data from 2006 to 2016

شکل ۹- تخمین جمعیت و اطلاعات تاریخی جمعیت از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵

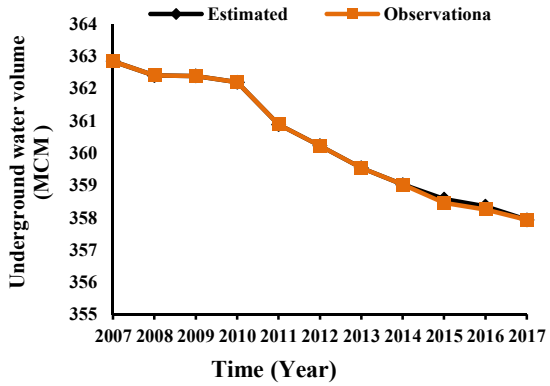

Fig. 10. Estimated storage volume and historical groundwater information from 2006 to 2016

شکل ۱۰- تخمین حجم ذخیره و اطلاعات تاریخی آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵

Archive of SID

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

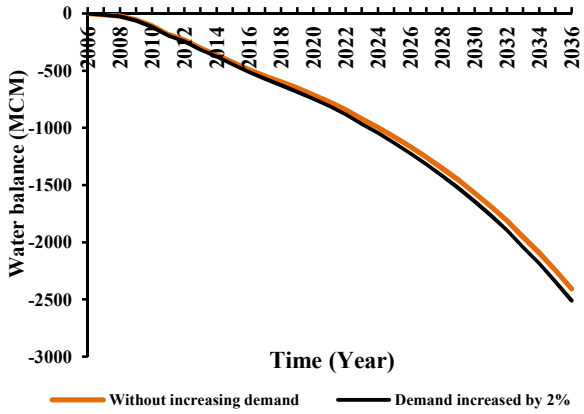

Fig. 11. The effect of 2% increase in demand on water balance from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۱- اثر ۲٪ افزایش تقاضا بر بیلان آب از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

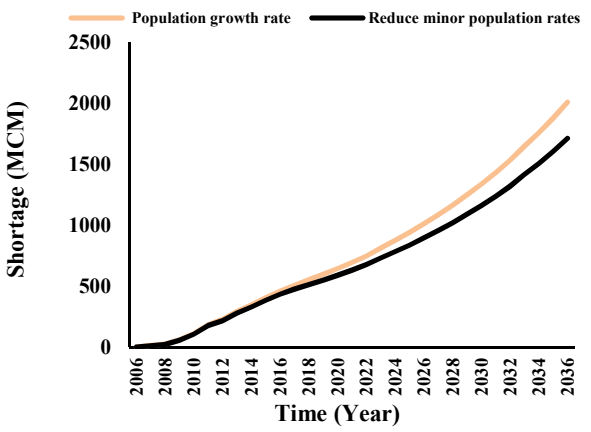

Fig. 12. The effect of population growth rate on water shortage from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۲- اثر نرخ رشد جمعیت بر میزان کمبود از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

۳-۷- نتایج شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف مدیریتی

بعد از واسنجی مدل، پنج سیاست در مدل پویایی سیستم آب شهری قم شبیه‌سازی شد. آثار این پنج سیاست مدیریتی و نتایج و اعمال آنها در مدل بهینه، در ادامه ارائه شده است.

۳-۷-۱- اعمال سناریوهای مرتبط با جمعیت

بررسی سرشماری‌های انجام شده توسط مرکز آمار ایران در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که نرخ رشد سالانه جمعیت استان قم در دهه‌های مختلف به صورت زیر است: ۱۳۳۵ تا ۱۳۴۵ معادل ۱/۱ درصد و ۱۳۴۵ تا ۱۳۵۵ معادل ۵ درصد، دوره ۱۳۵۵ تا ۱۳۶۵ معادل ۷/۷ درصد، دوره ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۵ معادل ۳/۳ درصد و برای دوره ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۵ معادل ۲/۱ درصد می‌باشد؛ و به طور میانگین در طول دوره ۳۰ ساله ۱۳۵۷ تا ۱۳۸۷ جمعیت قم بیش از ۳/۵ برابر شده است. از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ جمعیت ۱/۹۳ درصد رشد داشته و در طول سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵، ۲/۳۳ درصد رشد داشته است؛ اطلاعات جمعیتی مرکز آمار ایران نشان می‌دهد، قم از شهرهای با نرخ بالای مهاجرت است. از طرفی کنترل جمعیت، یکی از فاکتورهای مهم در پایداری آب شرب شهری است و با ازدیاد جمعیت، میزان تقاضای آب شرب شهری نیز به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد (www.amar.org.ir). در نتیجه با اعمال سیاست‌های کنترل جمعیت و با توجه به شکل ۱۲ می‌توان فاصله عرضه و تقاضا (میزان کمبود) را کاهش داد.

۳-۷-۲- اعمال سناریوی اجرایی شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب فقدان شبکه جمع آوری فاضلاب

در صورت فقدان شبکه جمع‌آوری، فاضلاب خروجی مشترکان مجدداً وارد منابع زیرزمینی می‌شود و از افت ایستایی سطح آبخوان جلوگیری می‌نماید و مانع پیشروی آب‌های شور به سمت آب‌های شیرین می‌شود. از سوی دیگر این امر باعث افزایش آلودگی و میزان نیترات موجود در منابع آبی می‌شود.

۳-۷-۳- تکمیل شبکه جمع‌آوری فاضلاب به صورت کامل یا تا ۵۰ درصد

در صورت تکمیل شبکه جمع‌آوری فاضلاب از پساب فاضلاب جمع‌آوری شده می‌توان به‌عنوان یک منبع جدید آبی برای آبیاری فضای سبز و صنعت استفاده کرد یا به‌طور مصنوعی پساب را به منابع زیرزمینی تزریق نمود؛ تا بخشی از افت سطح ایستایی آبخوان برطرف شود. ولی با توجه به هزینه‌بر بودن جمع‌آوری، انتقال، تصفیه فاضلاب و پمپاژ آن به محل مصرف با وجود مزایای قابل توجه این طرح، اجرای آن در یک دوره از نظر اقتصادی به صرفه نیست.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- جمعیت استان قم طی سال‌های مختلف

Table 2. The population of Qom province during different years

Year	1956	1966	1976	1986	1991	1996	2006	2011	2016
Population	160981	179862	293620	616963	757147	853044	1046737	1149099	1262698

(Statistical Center of Iran, 2016)

براساس صورت‌های مالی شرکت آب و فاضلاب قم در سال ۱۳۹۵ قیمت تمام شده در نقطه سر به سر ۱۰۴۴۶ ریال و متوسط قیمت جمع‌آوری هر مترمکعب فاضلاب ۳۱۱۳ ریال می‌باشد؛ بنابراین در هر متر مکعب ۷۳۳۳ ریال به زیان شرکت افزوده می‌شود. در نتیجه علی‌رغم مناسب بودن شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری، با توجه به شرایط موجود شهر قم و کمبود شدید آب، افت سطح ایستایی منابع زیرزمینی، حرکت آبهای شور به سمت شیرین و همچنین تأمین بیش از ۸۰ درصد منابع آب از خارج استان، به نظر می‌رسد درباره اجرای شبکه‌های فاضلاب باید تجدید نظر شود. در نقاطی که امکان جذب فاضلاب وجود ندارد و در حریم رودخانه به‌دلیل وجود چاه‌های آب شرب شهری، باید با رعایت استانداردهای لازم، اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب در اولویت قرار گیرد. تاکنون حدود ۳۵ درصد شهر قم از امکان سیستم جمع‌آوری فاضلاب بهره‌مند شده است.

پیش‌بینی می‌شود تا افق زمانی پژوهش برای ۵۰ درصد مشترکان امکان جمع‌آوری فاضلاب فراهم شود؛ در شکل ۱۳ اثر هریک از سناریوها بر میزان کمبود نشان داده شده است.

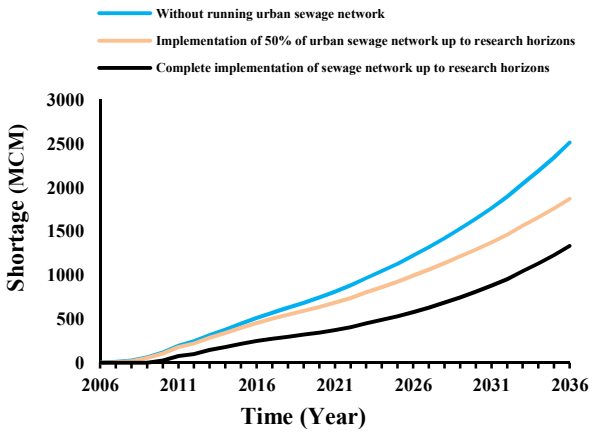

Fig. 13. Effect of different scenarios of wastewater system in water shortage from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۳- اثر سناریوهای مختلف شبکه فاضلاب در میزان کمبود از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

۳-۷-۴- اعمال سناریوهای مدیریت تأمین

بر اساس گزارش بالانس شرکت آب و فاضلاب قم، در شبکه‌های توزیع و انتقال به‌طور متوسط ۱۳ درصد هدررفت وجود دارد که در صورت نفوذ هدر رفت به آبخوان، علاوه بر هزینه بهره‌برداری مجدد، هدایت الکتریکی از ۵۰۰ به بالای ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر خواهد رسید و اگر بودجه لازم برای کنترل این هدررفت وجود نداشته باشد، میزان آن در سال‌های آتی افزایش خواهد داشت (abfa-qom.com)، به‌طوری که با افزایش تقاضا و میزان هدررفت، حتی در صورت تداوم انتقال آب از سرشاخه‌های دز، در سال ۱۴۰۱ شهر دچار بحران کمبود آب خواهد شد.

در شکل ۱۴ وضعیت هدررفت آب با اعمال مدیریت تلفات و بدون آن ارائه شده است.

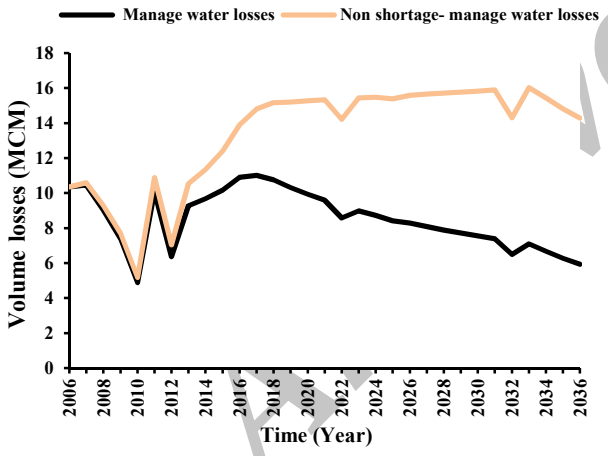

Fig. 14. The effect of casualty management on reducing water shortage from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۴- اثر مدیریت تلفات بر کاهش میزان کمبود آب از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

۳-۷-۵- اعمال سناریوهای مدیریت مصرف

در این بخش دو سناریو ارائه شده است که می‌تواند در مدیریت تقاضا مؤثر باشد. با توجه به محقق شدن کلیه گزینه‌های تأمین آب، چاره‌ای جز کنترل مصرف وجود ندارد.

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

بر همین اساس رسیدن به سرانه‌های مصرف قابل قبول و فرهنگ‌سازی می‌تواند عامل مؤثری در کنترل تقاضا باشد.

۳-۷-۶- سناریوی مدیریت مصارف کاربری‌های معاف از قیمت

در سال ۱۳۸۹ برخی از کاربری‌ها از جمله مساجد، حسینیه‌ها و بقاع متبرکه و همچنین ۵۰ درصد مصارف مدارس تا ظرفیت قراردادی مشخص بر اساس مصوبه مجلس از پرداخت قبوض آب بها معاف شدند. همین موضوع باعث شد این کاربری‌ها انگیزه لازم برای کنترل مصارف خود را نداشته باشند. گزارش‌های شرکت آب و فاضلاب قم موید این موضوع است (WWCQ.ir).

متأسفانه در سال ۱۳۹۴ سقف مصرف بر اساس ظرفیت قراردادی برداشته شد و این گونه کاربری‌ها هیچ محدودیتی در مصرف آب ندارند. همین موضوع باعث افزایش مصرف شد که در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

بنابراین پیشنهاد می‌شود برای کاربری‌های مذکور ظرفیت قراردادی بر اساس نیاز حقیقی تعیین شود تا از مصرف بی رویه آب و به تبع آن کمبود منابع آبی جلوگیری شود.

۳-۷-۷- سناریوی مدیریت مصارف کاربری خانگی

با توجه به اینکه بیش از ۹۰ درصد تقاضا در بخش خانگی است، بنابراین کنترل مصارف این بخش می‌تواند مدیریت آب شهری را به موفقیت برساند و شرایط تأمین پایدار آب شرب شهری محقق شود. در حقیقت کنترل رفتار مصرف کننده در این بخش در سایر کاربری‌ها از جمله کاربری‌های معاف از قیمت نیز مؤثر است. در شکل ۱۶ میزان تقاضا بدون کنترل الگوی مصرف خانگی و با کنترل الگوی مصرف و اثرات آن بر روی میزان کمبود آب نشان داده شده است.

۳-۷-۸- سناریوی جداسازی آب شرب از آب بهداشتی

با توجه به اینکه منابع آب شیرین شهر قم بسیار محدود و در حال کم شدن است، جداسازی آب شرب و آب بهداشتی همیشه مطرح بوده و در این پژوهش اثرات جداسازی آب شرب و آب بهداشتی برای تأمین پایدار آب بررسی شده است.

با توجه به شاخص آسیب‌پذیری و تأمین پایدارآب شرب شهری علاوه بر سناریوهای مطرح شده، سناریو جداسازی در مدل ارائه شده، می‌تواند یکی از گزینه‌های مؤثر در پایداری آب شرب شهری باشد. در شکل ۱۷ با کنترل الگوهای مصرف و جداسازی آب شرب از بهداشتی، پایداری آب شرب شهری تا افق زمانی پروژه حفظ می‌شود. جدول ۳ آثار سناریوهای مختلف در کاهش میزان کمبود آب شرب شهری قم را نشان می‌دهد.

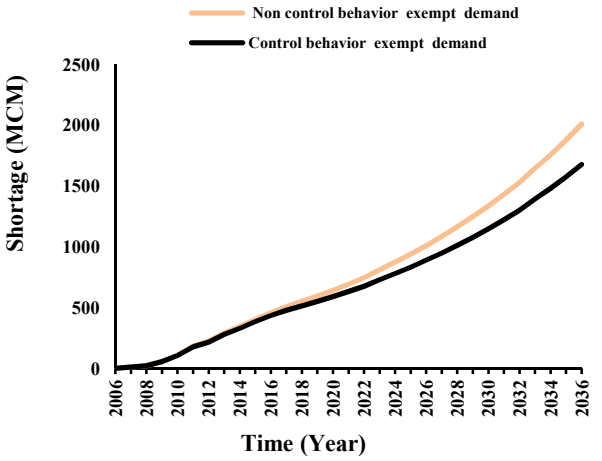

Fig. 15. Impact of consumer behavior exempt demand on the amount of water shortage from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۵- اثر رفتار مصرف کننده معاف بر میزان کمبود از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

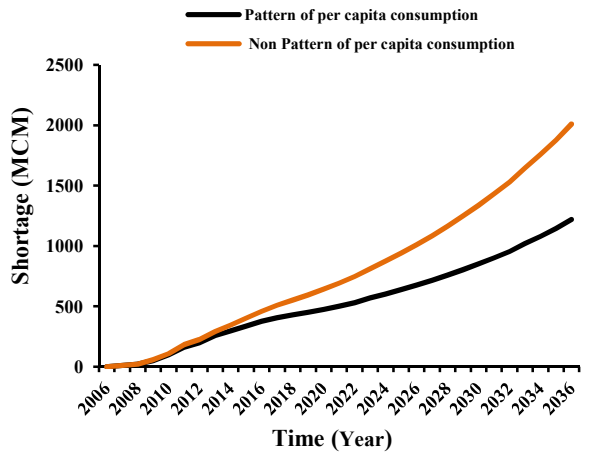

Fig. 16. The effect of controlling the pattern of domestic consumption on water shortage from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۶- اثر کنترل الگوی مصرف خانگی بر میزان کمبود آب از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- آثار سناریوهای مختلف در کاهش میزان کمبود آب شرب شهری قم

Table 3. The effects of different scenarios on the reduction of potable water shortage in Qom city

Scenario	Shortage reduction (%)	Method	Description
1.6	9	Control of immigration and population growth	Reduce population growth by 0.5%
1.2.6	0	Lack of implementation of sewage network	environmental problems
2.2.6	47	Complete sewage network implementation	Due to the low price of water is not economical
2.2.6	17	Run 50% sewage network	Suitable for Qom
3.6	25	Correct worn networks	Use pipes with good quality
1.4.6	9	Establishing contractual capacity for exempted uses	Due to the number of exempted applications, there is a great deal of need
2.4.6	26	Increasing people's beliefs and availability of reducing devices	The use of reducing devices is dependent on the economic value of water, awareness and availability
5.6	0	Separating potable and non-potable water supply	Applying the above mentioned scenarios and separating potable and non-potable water supply, the urban water is stable

می‌کند و با شناخت متغیرهای تأثیرگذار به تدوین سیاست‌های مؤثر برای حل معضلات و مشکلات می‌انجامد.

در این پژوهش، علاوه بر مدل کردن بیلان آب شهر قم با اضافه نمودن مؤلفه مدیریت عرضه و تقاضا، مدل‌های مفهومی نیز به مدلی عینی و کاربردی تبدیل شد. در نتیجه قابلیت شناخت بهتری از لایه‌های پنهان فراهم شد که سر منشا مقاومت در مقابل تصمیم‌ها می‌باشند. کنترل الگوی مصارف خانگی (با افزایش باور مردم به کمبود منابع آبی، استفاده از لوازم کاهنده مصرف و واقعی شدن قیمت آب)، کاهش مصارف کاربری‌های معاف از قیمت، کنترل جمعیت به‌ویژه مهاجرت، مدیریت هدررفت آب، استفاده از پساب به‌عنوان آب جدید با رویکرد حفظ محیط زیست و جداسازی آب شرب و آب بهداشتی، مؤلفه‌های تأمین پایدار آب شرب شهری می‌باشند. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مؤلفه‌های جداسازی آب شرب از آب غیر شرب و کنترل الگوی مصارف کاربری‌های معاف از قیمت در طول زمان سیاست جدیدی است که در این پژوهش به آن پرداخته شد. این مؤلفه‌ها می‌توانند نقش مؤثری در تأمین پایدار آب شرب شهری ایفا کنند.

نتیجه کلی این پژوهش مبین این واقعیت است که به‌دلایل افزایش جمعیت و افزایش سرانه الگوی مصرف خانگی فاصله بین

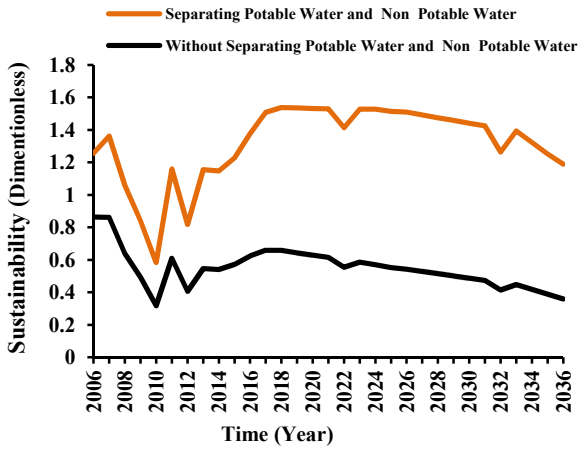

Fig. 17. The effect of separating Potable water and non Potable water networks on the sustainability of urban Potable water from 2006 to 2016 and the forecast to 2036

شکل ۱۷- اثر جدا سازی آب شرب و غیر شرب بر پایداری آب شرب شهری از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۵

۴- نتیجه‌گیری

ایجاد نگرش سیستمی در تحلیل مسائل، منجر به شناخت همه جانبه و درک بهتر مسئله می‌شود. چنین رویکردی در شناخت مسائل آب شهری نیز به درک پویایی و پیچیدگی‌های پنهان در آن کمک

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.97800.2488

عرضه و تقاضا بسیار زیاد شده است؛ بنابراین هیچ یک از راهکارهای مدیریتی به تنهایی قادر به ارائه برنامه جامع تأمین پایدار آب شرب شهری نیست؛ بلکه برای رسیدن به راه حل یکپارچه به مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی نیاز است.

پژوهش حاضر، محیط شبیه‌سازی شده‌ای را ارائه نمود که در آن می‌توان آثار سیاست‌ها را پیش از عمل کردن به آن بررسی و مشخص کرد. مدل ارائه شده برای سیستم آب شرب شهری قم، می‌تواند یک دید کلی برای مدیران و تصمیم‌گیران ارائه دهد و در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری موفق، آنها را یاری کند. با توجه به اینکه هیچ مدلی به‌صورت مطلق کامل نیست، با افزودن متغیرهای تأثیرگذار دیگر، دقت نتایج حاصل از مدل، بالاتر خواهد رفت. لذا پیشنهاد می‌شود با توجه به کمبود منابع آب شرب، رفتار کاربری‌های مختلف برای ارتقای مدل بررسی شود.

References

Acheampong, E. N., Swilling, M. & Urama, K. 2016. Sustainable urban water system transitions through management reforms in Ghana. *Water Resources Management,* 30**,** 1835-1849.

Bagheri, A., Darijani, M., Asgary, A. & 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.

Bagheri, A. & Hjorth, P. 2007. A framework for process indicators to monitor for sustainable development: practice to an urban water system. *Environment, Development and Sustainability*, 9**,** 143-161.

Clifford Holmes, J. K., Slinger, J. H., Musango, J. K., Brent, A. C. & Palmer, C. G. 2014. Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small south african municipality. *32nd International Conference of the System Dynamics Society*, Delft, The Netherlands, 20-24 July 2014; Authors version, System Dynamics Society, Netherlands.

Fartookzadeh, H. R., Ghojavand, S. & Nohooji, M. R. 2015, "Dynamic modeling of Tehran's water system for effective management", *Bimonthly Journal of Water and Wastewater,* 26**,** 23-36.

Forrester, J. W. 1997. Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society,* 48**,** 1037-1041.

Ghadiri, M. 2007. Vulnerability to crisis, the problem of the community or to society? Case study Tehran Metropolis, *2nd Internatioanl conf. on Integrated Natural Disaster*, Tehran, Iran.

Gleick, P. H. 1996. Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water International,* 21**,** 83-92.

Hosseini, S. A. 2009. *Using system dynamics approach in the extraction of water resources sustainable development strategies Case study: Development of water resources Mashhad,* University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)

Loubet, P., Roux, P., Guerin-schneider, L. & Bellon-maurel, V. 2016. Life cycle assessment of forecasting scenarios for urban water management: A first implementation of the WaLA model on Paris suburban area. *Water Research*, 90**,** 128-40.

Madani, K. & Mariño, M. A. 2009. System dynamics analysis for managing iran's Zayandeh-Rud River basin. *Water Resources Management,* 23**,** 2163-2187.

Qi, C. & Chang, N. B. 2011. System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. *Journal of Environmental Management,* 92**,** 1628-41.

QRWA. 2015. *Report Qom Regional water Authority* [Online]. <http://www.qmrw.ir/.>(July 2017).

Archive of SID

www.SID.ir

Salavitabar, Zarghami, M. & Abrishamchi, A. 2006. System dynamics model in urban water management of Tehran. *Journal of Water & Wastewater,* 17**,** 12-28. (In Persian)

Statistical Center of Iran. 2016. *Population* <https://www.amar.org.ir>.

Sterman, J. D. 2000. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*, McGraw- Hill Education. N.Y.

Sun, Y., Liu, N., Shang, J. & Zhang, J. 2017. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production,* 142**,** 613-625.

UN-Water. 2009. *Water in a changing world*. The United Nations Educational, Scientifc and Cultural Organization (UNESCO).

Wei, T., Lou, I., Yang, Z. & LI, Y. 2016. A system dynamics urban water management model for Macau", China. *Journal of Environmental Sciences,* 50**,** 117-126.

Xi, X. & Poh, K. L. 2013. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science,* 16**,** 157-166.

Yang, J., Lei, K., Khu, S. & Meng, W. 2015. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: A case study of Tieling City, China. *Water Resources Management,* 29**,** 885-899.

Zarghami, M. & Akbariyeh, S. 2012. System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling,* 60**,** 99-106.

<<WWCQ.ir>(Apr. 2016)

<<Abfa-qom>> (June 2017)

Archive of SID

www.SID.ir