



## Technical Note

## یادداشت فنی

## Dynamic Analysis of Water Demand; Case Study of Qom City

## تحلیل دینامیک تقاضای آب؛ مطالعه موردی شهر قم

N. Nahavandi<sup>1\*</sup> and A. Ahmadian<sup>2</sup>نسیم نهاوندی<sup>۱\*</sup> و علی احمدیان<sup>۲</sup>

## Abstract

Water scarcity is now one of the most critical challenges in most countries around the world, and in particular in Iran. One of the key ways to control and manage this issue is to investigate water demand. Qom city has always been encountered with water shortage threat due to its location in the dry area of the country and in the absence of proper management in the near future, there will face serious hazards in this regard. The purpose of this research is the investigation of water demand dynamics in Qom city using system dynamics method. Dynamic of various variables such as population, water demand, surface water resources, ground water, and water supply have been incorporated in VENSIM software. The maximum relative difference of this model for estimation of water demand was found to be 7%. The change of birth rate from 4% to 2% would result in 29% reduction of water demand level in year 1405 in comparison to current trend. Base on the result, the policy of population control had the most important effect on water demand. On the other side, the effect of price on water demand is negligible, so that, 20% increase in price would lead to 2.04% reduction in level of water demand in 1405 compared to current trend.

**Keywords:** Water Scarcity, Water Demand Management, System Dynamics, VENSIM Software.

Received: May 28, 2018

Accepted: December 8, 2018

## چکیده

کمبود منابع آب همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های اغلب کشورهای جهان به‌ویژه کشور ایران است. یکی از راهکارهای اساسی برای کنترل و مدیریت این موضوع، بررسی تقاضای آب است. شهر قم به دلیل قرارگیری در منطقه خشک کشور همواره با تهدید مواجه بوده است و در صورت عدم مدیریت صحیح در آینده نزدیک با خطرات جدی در این زمینه مواجه خواهد بود. هدف از این تحقیق، بررسی دینامیک تقاضای آب با روش پویایی سامانه‌ها در شهر قم بوده است. دینامیک متغیرهای مختلفی نظیر جمعیت، منابع آب سطحی، عرضه آب و تقاضای آب در این مدل با استفاده از نرم‌افزار VENSIM به کار رفته است. حداکثر درصد اختلاف نسبی این مدل برای تخمین تقاضای آب ۷ درصد بوده است. تغییر نرخ زاد و ولد از میزان ۴ درصد به ۲ درصد منجر به کاهش ۲۹ درصدی میزان تقاضای آب در سال ۱۴۰۵ در مقایسه با روند فعلی شده است. بر اساس این نتیجه، سیاست کنترل جمعیت، بیشترین تأثیر را بر تقاضای آب دارد. اثر قیمت بر میزان تقاضا ناچیز است به طوری که افزایش ۲۰ درصدی قیمت، ۲/۰۴ درصد کاهش در میزان تقاضا در سال ۱۴۰۵ در قیاس با روند فعلی ایجاد کرده است.

**کلمات کلیدی:** کمبود آب، مدیریت تقاضای آب، پویایی سیستم‌ها، نرم‌افزار VENSIM.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۱۷

1- Associate Professor, Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: nasim\_nahavandi@yahoo.com  
n\_nahavandi@modares.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Industrial Engineering, Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

حوضه‌ای، قیمت آب و ابزارهای حفاظتی) را در نظر گرفته است. در این مدل قیمت آب برای مصارف خانگی متغیر است تا تأثیر آن بر کمبود آب مشخص شود. همچنین این مدل تأثیر گسترش شبکه فاضلاب بر منابع آب زیرزمینی را تحلیل می‌کند. بر اساس نتایج مطالعه هم انتقال آب بین حوضه‌ای و هم ابزارهای مدیریت تقاضای آب، کمبود آب در سال ۲۰۲۰ را تا ۴۵ درصد کاهش می‌دهند اما اثر انتقال آب از حوضه‌های دیگر بیشتر است.

Gohari et al. (2017) مدل پویایی سیستم را برای تحلیل استراتژی‌های انطباق با در نظر گرفتن بازخورد بین توسعه منابع آب و زیرسیستم‌های بیوفیزیکی و اجتماعی- اقتصادی مورد استفاده قرار دادند. نتایج مدل نشان می‌دهد که گرمایش جهانی بر عرضه آب اثر می‌گذارد و فشار تقاضای آب را افزایش می‌دهد تا مانع توسعه اجتماعی و اقتصادی و رشد جمعیت شود. افزایش میزان عرضه آب از طریق انتقال آب بین حوضه‌ای به باید فقط به‌عنوان یکی از آخرین راه‌حل‌ها باشد و مکمل سیاست‌های مدیریت تقاضای آب باشد.

با توجه به اینکه سیستم منابع آب و تقاضای مربوط به آن یک سیستم پیچیده و در ارتباط با عناصر مختلف است به نظر می‌رسد تحلیل و مدیریت آن تنها از طریق روش‌های بررسی جزئی ساختار و شبیه‌سازی آن امکان‌پذیر باشد. این امر محقق نمی‌شود مگر اینکه هر دو عامل عرضه و تقاضا و زیرسیستم‌های مربوط به آن‌ها در کنار هم بررسی و مدل شوند این امر در مقالات مورد بررسی انجام نشده است و یا به صورت ناقص صورت گرفته است. هدف از این پژوهش ایجاد پر کردن شکاف در مقالات بررسی شده است.

۳- روش‌شناسی تحقیق

روش انجام تحقیق موضوع این تحقیق از نظر بعد زمانی، یک پژوهش تجربی (گذشته‌نگر) است چرا که در این مطالعه تلاش شده است تا با استفاده از اطلاعات وضع موجود، مدلی برای پیش‌بینی تحلیل و بررسی میزان تقاضا و مصرف آب و عوامل مؤثر بر آن در محدوده جغرافیایی مشخص معرفی شود و سپس نتایج مدل شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی از طریق حداکثر میزان خطا به دست آمده مقایسه و تطبیق شده است. این پژوهش از نظر هدف یک پژوهش کاربردی است چرا که با ایجاد یک مدل پویایی سامانه فرایند عرضه و تقاضا را در محدوده جغرافیایی مشخص در واقعیت دنبال می‌کند.

تکنیک مورد استفاده در این پژوهش تحلیل پویایی سیستم‌ها است که یک روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد و اتفاقات شیء‌گراست. هنر

آب از دیرباز و از بدو پیدایش حیات، نقش اساسی در ادامه زندگی و طبیعتاً در موجودیت انسان ایفا کرده است و در طول تاریخ عامل مهمی در شکل دادن به روش زندگی بشر و توسعه فناوری، زبان و فرهنگ بوده است. نقش آب در پیدایش و رشد حیات در نظریه‌های علمی نیز تا مدت‌ها مورد توجه دانشمندان قرار گرفته و امروزه همه در آن اتفاق نظر دارند. آب در هر کشور و منطقه به‌عنوان یکی از سرمایه‌های ملی آن کشور و منطقه محسوب و جزء احتیاجات حیاتی بشر قلمداد می‌شود که قابل جایگزینی به‌وسیله هیچ‌کدام از منابع طبیعی و مصنوعی دیگر نیست (Roohparvar, 2011).

ذخایر آب از منابع تجدیدشونده محسوب شده و فرایند تجدیدپذیری به تبعیت از چرخه آب در طبیعت است. با این وجود، مقدار آبی که از این طریق در سطح کره زمین یا هر منطقه جغرافیایی مشخص پدید می‌آید، صرف‌نظر از تغییرات بین سالی، معین و ثابت است. به بیان دیگر مقدار آب تجدیدشونده که سطح کره زمین هم‌اکنون و به‌طور سالانه دریافت می‌کند، برابر همان آبی است که شاید هزاران سال پیش و از بدو به وجود آمدن تمدن‌های بشری دریافت نموده است. این در حالی است که توزیع زمانی و مکانی مقدار آب تجدیدشونده کاملاً متغیر بوده و متناسب با توزیع جمعیت و نیازهای آبی جوامع بشری نیست (Mohammadjanni and Yazdani, 2014).

بنابراین، به نظر می‌رسد تلاش انسان برای استفاده بهینه از این نعمت خدادادی ضروری باشد و این کار باید در صدر اولویت‌های کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران قرار گیرد. این روند برای شهر قم، به دلیلی موقعیت جغرافیایی این شهر در منطقه خشک و نیمه‌خشک و نیز کمبود بارش سالیانه که میانگین آن کم‌تر از ۲۰ درصد بارش و افزایش رو به رشد جمعیت آن به‌طوری‌که در سال ۱۳۸۹، ۱۰۳۷۴۹۶ نفر بوده مسأله مدیریت تقاضای آب را از اهمیت خاصی برخوردار می‌کند (Roohparvar, 2011).

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

Zarghami and Akbariyeh (2012) سیستم منابع آب شهر تبریز را با روش پویایی سامانه‌ها مدل کردند. این مدل برای شبیه‌سازی شرایط آینده تا سال ۲۰۲۰ استفاده می‌شود. مدل سیستم دینامیکی شهر تبریز منابع عرضه بالقوه آب شهر تبریز شامل (آب‌های زیرزمینی، آب شیرین وارداتی، آب حاصل از فاضلاب تصفیه‌شده) منابع بالقوه تقاضای منابع آب (مصرف خانگی، مصارف آبیاری و صنعتی) و ابزارهای مدیریتی (استفاده مجدد و بازیافت از فاضلاب، انتقال آب بین

از مدل جهت بررسی جزئی‌تر و دقیق‌تر انتخاب شده و نمودارهای علت و معلولی و حالت جریان برای این بخش‌ها توسعه داده شده است و سپس با استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود مدل حل شده است. مدل ارائه شده در برگزیده‌ی زیرسیستم‌های مختلفی از جمله زیرسیستم‌های جمعیت، منابع آب سطحی، منابع آب زیرزمینی، عرضه آب و تقاضای آب است. این مدل در نرم‌افزار VENSIM کار شده است. در شکل ۱ نمودار کلان علت و معلولی مدل قابل مشاهده است. شکل ۲ نمودار حالت و جریان برای انجام شبیه‌سازی است.

مدل‌سازی مبتنی بر پویایی سامانه کشف و نمایش فرایندهای بازخوردی است که همراه با ساختارهای انباشت و جریان، تأخیرهای زمانی و ساختارهای غیرخطی که دینامیک سامانه را تعیین می‌کند (Sterman, 2000).

پژوهش حاضر با به‌کارگیری مدل‌سازی پویا و روش تحلیل پویایی‌های سیستم، به دنبال آن است که با دیدی جامع به سیستم عرضه و تقاضای آب در شهر قم بنگرد و مدیریت جامع آن را تسهیل کند.

۵- تشریح مدل

۴- مدل‌سازی

در این قسمت مهم‌ترین متغیرهای مدل و معادله‌های مربوط به آن‌ها معرفی می‌شوند.

در این تحقیق ابتدا به صورت کلان به موضوع نگاه شده و بعد از ارائه یک مدل کلی برای بررسی رفتار و برهم‌کنش متغیرهای کلان بر عرضه و تقاضای آب با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها بخش‌هایی

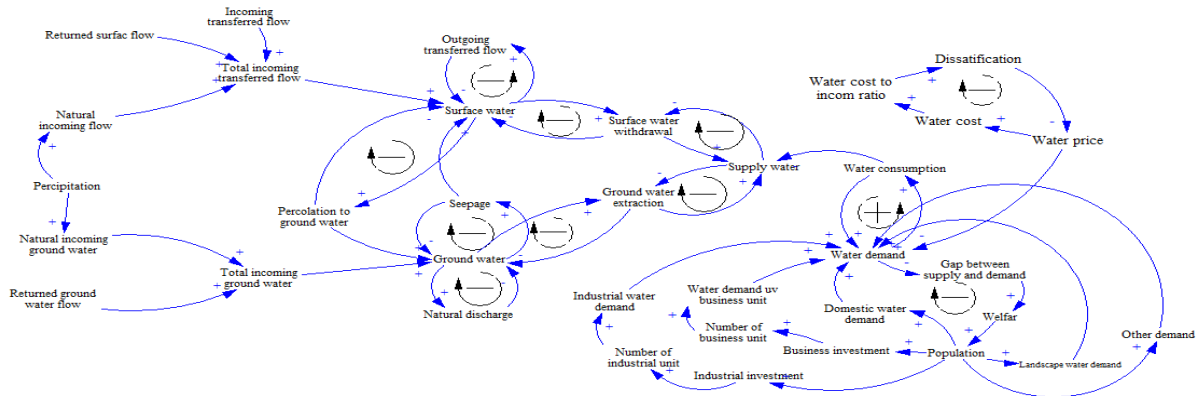


Fig. 1- Major cause and effect diagram  
شکل ۱- نمودار کلان علت و معلولی

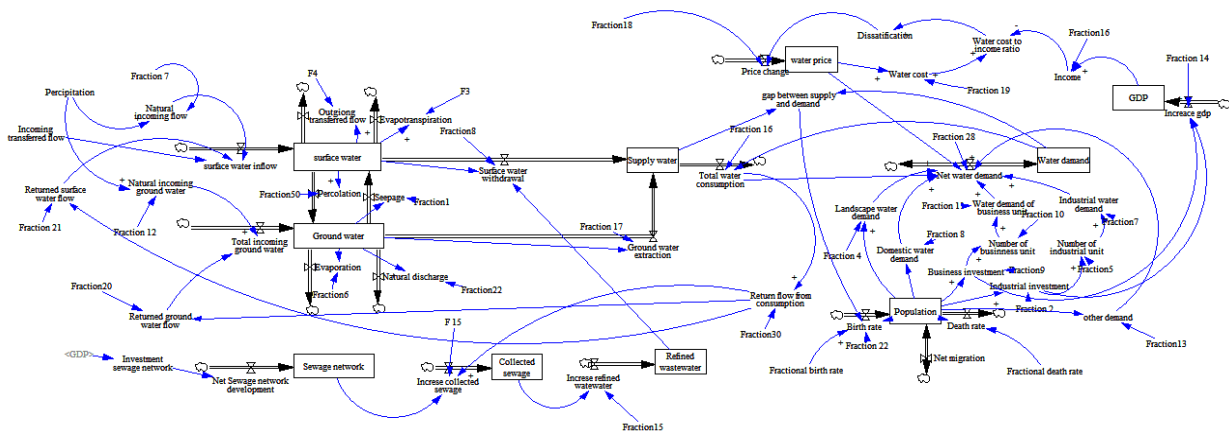


Fig. 2- Diagram stock and flow of supply and demand of water  
شکل ۲- دیاگرام حالت و جریان عرضه و تقاضای آب

۵-۱- معادلات مدل

مطلق خطا به ازای مقادیر مختلف برای تقاضای آب صورت گرفته است.  $\beta$  درصد اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی است که طبق رابطه زیر به دست آمده است. در این رابطه  $D_{\text{simulation}}$  مقدار تقاضای شبیه‌سازی شده و  $D_{\text{observed}}$  مقدار تقاضای آب مشاهده شده است.

$$\beta = \frac{D_{\text{simulation}} - D_{\text{observed}}}{D_{\text{observed}}} \times 100 \quad (6)$$

مقادیر  $\beta$  به ازای مقادیر مختلف از سال ۸۵ تا ۹۵ برای تقاضای آب ۷ درصد است که تطابق خوبی با داده‌های واقعی دارد. شکل ۳، اعتبارسنجی مقدار تقاضای آب را نشان می‌دهد.

۷- نتایج مدل

در این قسمت با توجه به اینکه شبیه‌سازی صورت گرفته است. ابتدا روند متغیر تقاضای آب در افق زمانی ۲۰ ساله بررسی می‌شود (۱۳۸۵-۱۴۰۵) سپس با توجه به روند مذکور سناریوسازی صورت می‌گیرد. سناریوسازی به اتخاذ سیاست‌های اثربخش در موضوع مدیریت بحران آب و در کل مدیریت منابع آب کمک زیادی می‌کند.

۷-۱- تقاضای آب

همانطور که ذکر شد در این قسمت شکل کلی تقاضای آب تا سال ۱۴۰۵ نشان داده می‌شود سپس سناریوهای جمعیتی، قیمتی بر روی آن امتحان می‌شوند. شکل شماره ۴ نشان‌دهنده این پیش‌بینی در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۵ است.

همان‌طور که در شکل چهار مشاهده می‌شود تقاضای آب تا سال ۱۴۰۵ روند صعودی دارد. در شکل ۵ تأثیر سناریوهای جمعیتی بر مقدار تقاضا و اثر آن بر شکاف عرضه و تقاضا مشخص شده است.

$$\text{Population} = \int \text{Birth rate } dt - \int \text{Death rate } dt + \text{Net migration} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Water demand} = & \int \text{Domestic water demand } dt + \\ & \int \text{Industrial water demand } dt + \\ & \int \text{Landscape water demand } dt + \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \int \text{Water demand of business unit } dt + \\ & \int \text{other demand } dt - \text{Fraction } 28 \times \text{water price} \\ \text{Ground water} = & - \int \text{Natural discharge } dt \\ & + \int \text{Percolation } dt \\ & + \int \text{Total incoming ground water } dt - \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \int \text{Evaporation } dt - \\ & \int \text{Ground water extraction } dt - \int \text{Seepage } dt \\ \text{Surface water} = & \int \text{Seepage } dt \\ & + \int \text{Surface water inflow } dt - \\ & \int \text{Evapotranspiration } dt - \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \int \text{Outgoing transferred flow } dt - \\ & \int \text{Percolation } dt - \\ & \int \text{Surface water withdrawal } dt \\ \text{Supply water} = & \int \text{Ground water } dt + \\ & \int \text{Surface water } dt \end{aligned} \quad (5)$$

۶- اعتبارسنجی مدل

در این قسمت به بررسی صحت شبیه‌سازی شده برای تقاضای آب در سال‌های مختلف پرداخته می‌شود. اعتبارسنجی به دنبال بررسی سودمند بودن مدل بر اساس صورت مسأله و هدف تحقیق است. برای این منظور آزمون تکرار برای صحت‌سنجی مدل انجام شده است.

۶-۱- آزمون تکرار رفتار

در این آزمون داده‌های تخمینی و مشاهده‌ای توسط مدل مقایسه می‌گردند. این بررسی با استفاده از ابزارهای آماری میانگین درصد

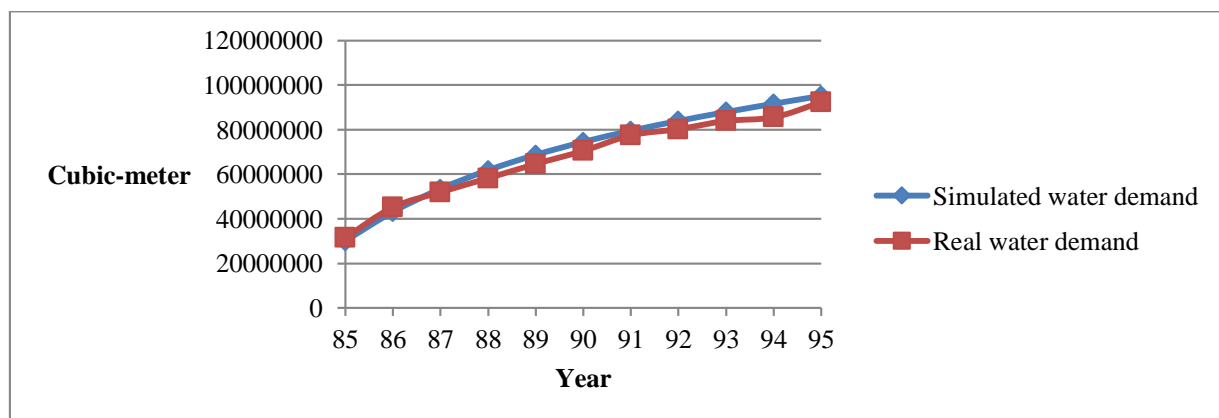


Fig. 3- Validating the amount of water demand

شکل ۳- اعتبارسنجی مقدار تقاضای آب

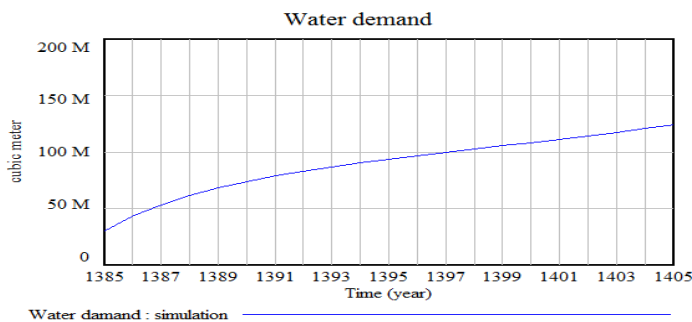


Fig. 4- Water demand Forecast  
شکل ۴- پیش‌بینی تقاضای آب

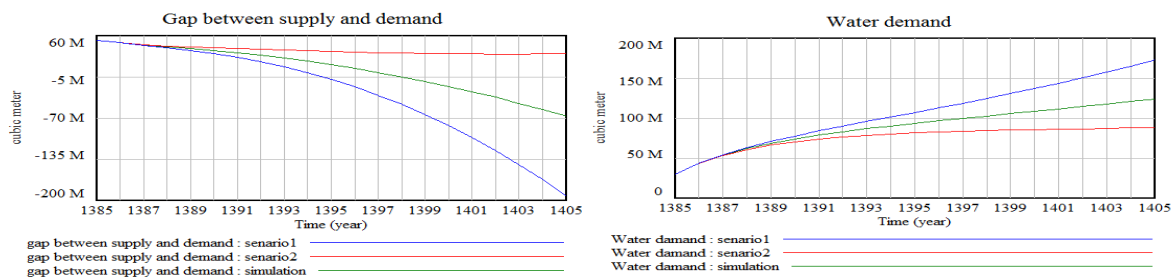


Fig. 5- Simulation of demographic scenarios on water demand and their effects on the gap between supply and demand

شکل ۵- شبیه‌سازی سناریوهای جمعیتی بر تقاضای آب و تأثیر آن‌ها بر شکاف عرضه و تقاضا

میانگین ۲۸۸۵ ریال برای هر متر مکعب در نظر گرفته شده است. با تعریف سه سناریو، افزایش ۳۰ درصدی (سناریو ۴)، افزایش ۲۰ درصدی (سناریو ۳) و روند فعلی است. شکل ۶، تأثیر این سناریوها بر میزان تقاضای آب و تأثیر آن‌ها بر شکاف بین عرضه و تقاضا را نشان می‌دهد.

همانطور که قابل ملاحظه است تأثیر قیمت بر کاهش میزان تقاضای آب ناچیز است علت آن هم وجود یک حلقه منفی در مدل در رابطه با قیمت آب است.

کاهش نرخ زاد و ولد تا نرخ ۲ درصد (سناریو شماره ۲) می‌تواند تا حد زیادی میزان تقاضای آب را کاهش دهد و از روند رو به رشد تقاضای آب جلوگیری به عمل آورد و اختلاف این میزان در سال ۱۴۰۵ با روند معمولی در حدود ۳۵ میلیون مترمکعب خواهد بود. در این شکل همچنین تأثیر هر یک از این سیاست‌ها را بر شکاف بین عرضه و تقاضا قابل مشاهده مقدار این شکاف در صورت اجرای سناریوی دوم (کاهش نرخ زاد و ولد) در سال ۱۴۰۵، ۳۱ میلیون متر مکعب و در قسمت مثبت محور yها است.

یکی دیگر از سیاست‌های کنترل تقاضای آب، سیاست‌های قیمتی است. در این مطالعه تعرفه آب برای کلیه گروه‌های مصرف به صورت

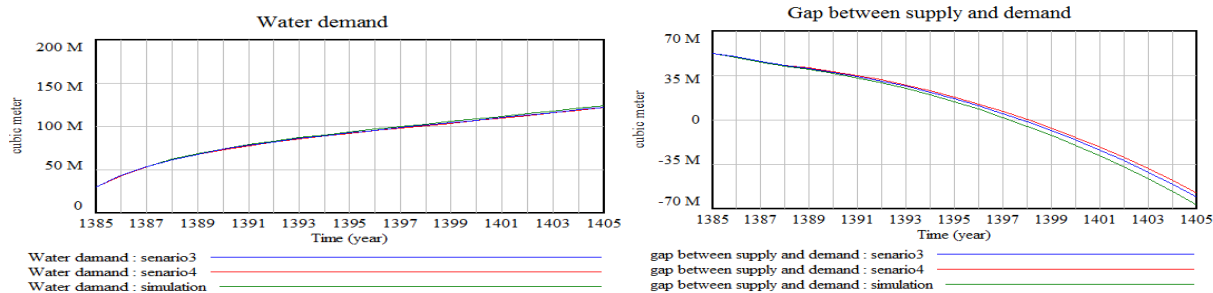


Fig. 6- The effect of price scenarios on water demand and gap between supply and demand  
شکل ۶- تأثیر سناریوهای قیمتی بر تقاضای آب و شکاف عرضه و تقاضا

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق تقاضای آب با روش پویایی سامانه‌ها و با نگاه سیستمی در شهر قم بررسی شد. با توجه به خشک‌سالی‌های طولانی در مناطق مختلف کشور ایران و محدودیت منابع آب و ثابت و یکنواخت بودن چرخه تأمین آب لازم به نظر می‌رسد که سیاست‌گذاران این بخش نگاه کلان‌تری به موضوع مدیریت تقاضای آب داشته باشند. در این تحقیق سعی شده تا با نگاه سیستمی این موضوع مورد بررسی و کنکاش قرار گیرد برای این امر متغیرها و زیرسیستم‌های مختلف تأثیرگذار اقتصادی، اجتماعی تعریف شده و اثرات هر یک از آن‌ها بر عرضه و تقاضای آب مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیب سیاست‌های کنترل جمعیت، توسعه شبکه فاضلاب، قیمت و جریان آب انتقالی می‌تواند از مؤثرترین راهکارها برای مدیریت عرضه و تقاضای آب باشند.

بنابراین، ابتدا برای این منظور مدل‌سازی صورت گرفت و سپس نتایج صحت‌سنجی شد و در انتها نتایج مدل بررسی شد. نتایج حاصل به این شرح هستند.

- اثر قیمت بر میزان تقاضا ناچیز است به طوری که افزایش ۲۰ درصدی قیمت، ۲/۰۴ درصد تغییر در میزان تقاضا در سال ۱۴۰۵ در قیاس با روند فعلی ایجاد کرده است؛ اما در بلندمدت اثر قابل توجهی دارد و می‌توان یکی از راهکارهای مدیریت مصرف باشد.

- سناریوهای جمعیتی و کاهش جمعیت به نحو مؤثری اثرگذار هستند به گونه‌ای که کاهش ۵۰ درصدی در نرخ زاد و ولد کاهش ۲۹ درصدی را در میزان تقاضا در سال ۱۴۰۵ در مقایسه با روند فعلی ایجاد کرده است.

## ۹- مراجع

- Gohari A, Mirchi A, Madanik K (2017) System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources Management in Central Iran. *Water Resources Management* 31:1413-1434
- Mohammadjanni E, Yazdani N (2014) Analysis of the state of water crisis in the country and its management requirements. *Journal of Ravand* 21(65-66):117-144 (In Persia)
- Roohparvar A (2011) Estimation of water consumption in Qom using artificial neural networks. M.Sc. Thesis, Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University (In Persia)
- Sterman J (2000) *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Education; HAR/CDR edition (February 23, 2000)
- Zarghami M, Akbariyeh S (2012) System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recyclin* 60:99-106