# مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران

عبدالرحیم صلوی تبار [۱]  مهدی ضرغامی [۲]  احمد ابریشم‌چی [۳]

(دریافت ۸٤/۱۰/۲٦  پذیرش ۸۵/۷/۱۰)

## چکیده

مدیریت منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری آینده نگر با رویکردی جامع است. علم پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی بر اساس این نگرش می‌باشد. این علم قادر است شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب را برای پشتیبانی تصمیم‌گیری انجام دهد. به کمک این شبیه‌سازی، پیامدهای نامشخص تصمیم‌گیریها آشکار می‌شود. هدف عمده این روش شبیه‌سازی، تسریع و تسهیل یادگیری رفتار سیستم‌ها در شرایط فعلی و آینده است. در این مقاله، مدل منابع و مصارف آب شهری با روش پویایی سیستم برای ارزیابی روند منابع و مصارف و عوامل اثرگذار بر آن تهیه و توسعه داده شده است. اندرکنش منابع آب شهری با جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی تأمین و تقاضای آب، سیستم پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که تحلیل آن صرفاً با نگرشی جامع و با روش پویایی سیستم‌ها مقدور می‌باشد. نتایج تحلیل پویایی سیستم آب شهری تهران، مدیران را به یک ابزار قابل فهم و تصویری برای درک علل کاهش منابع رهنمون خواهد نمود. همچنین این مدل روند تغییرات بیلان آب در آینده و تأثیر سناریوهای مدیریتی همچون انتقال بین‌حوضه‌ای آب، اجرای طرح جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و مدیریت تقاضا را ارائه می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** *مدیریت جامع منابع آب، تحلیل پویایی سیستم، شبیه‌سازی، مدیریت آب شهری.*

# System Dynamic Model in Tehran Urban Water Management

*Abdolrahim Salvitabar [1]  Mehdi Zarghami [2]  Ahmad Abrishamchi [3]*

*(Received Jan. 16, 2006 , Accepted Oct. 2, 2006)*

## Abstract

Water management needs to decide for the water resources development project and future planning based on comprehensive and integrated views. One of the management tools is based on system dynamic approach. This technique has the capability of simulating complex water resource systems to support decision making. The undefined outcome of decisions is revealed through this methodology. The main objective of this method of simulation is its simplicity and rapid learning of system behaivior in present and future conditions. In this paper, the model for water resources and urban water demand was developed with dynamic system for evaluating the trend of resources and demands and the effective parameter on them. The feedback of urban water resources due to the economic, socio and environmental aspects of supply and demand brings about a complex system which can only be analyzed through integrated and dynamic views of the system. The results of the dynamic analysis of Tehran urban water system leads to a tool for understanding and visualizing the reasons of the shortages. This model showes the trend of water balance variation in future as well as the effect of management scenario such as interbasin water transfer, collection and treatment of waste water and demand management.

***Keywords:*** *Integrated Water Resources Management, System Dynamic Analysis, Simulation, Urban Water Management.*

---

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،
a.salavitabar@gmail.com
۲- دانشجوی دکترای مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

1-Ph.D Student of Water Engineering, Science and Research Center, Azad Islamic Universiy, a.salavitabar@gmail.com
2-Ph.D Student of Water Engineering, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology
3-Professor, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology

## ۱- مقدمه

کمبود آب شیرین و با کیفیت مناسب، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالشها و مسائل پیش روی تمدن بشری در قرن بیست و یک مطرح است که رفاه اجتماعی، بهداشت عمومی و سلامت اکوسیستم‌ها را تهدید می‌کند. بررسی روند کاهش منابع آب در کشورهای مختلف از سال ۱۹۵۰میلادی تا ۲۰۲۵ که به دو صورت بررسی سوابق تاریخی و پیش‌بینی آینده انجام پذیرفته به خصوص در مورد کشورهای در حال توسعه بسیار قابل توجه و بحرانی است[۱]. البته توجه به مدیریت تقاضا در بعضی از کشورها شکاف بین تأمین و تقاضا را کم کرده است. نحوه کاهش استحصال آب در کشور آمریکا درستی بیانیه نشست سوم جهانی آب مبنی بر این که بحران آب در مدیریت آن است و نه در کمبود آب، را تایید می‌نماید [۲ و ۳].

علی‌رغم توجه به بحران حاد در منابع آب، توانایی ما در ارزیابی صحیح و پیش بینی میزان آب قابل دسترسی هنوز محدود است. بنابراین جهت حل این مشکل نه تنها کارشناسان و مدیران منابع آب بلکه سایر ذی‌نفعان، باید همکاری فعالی در زمینه جبران کمبود کمّی و تخریب کیفی آب داشته باشند. یکی از اولین مراحل کار در برخورد با بحران، برآورد و ارزیابی دقیق منابع و مصارف آب برای پیش‌بینی‌های آتی است. در مطالعات معمول منابع آب روابط بین پارامترهای مهم به صورت صریح بوده و اهمیت دینامیک زمانی و مکانی آنها در بیلان در نظر گرفته نمی‌شود. روش برخورد با مسئله در مطالعات متعدد مانند برآورد مقدار منابع آب تجدید شونده با توجه به آمار و اطلاعاتی است که از آبدهی رودخانه‌ها و بیلان سفره آبهای زیرزمینی وجود دارد[۱، ۴ و ۵]. فعالیتهای محدودی در زمینه مدل‌سازی منابع آب با لحاظ کردن ارتباطات دینامیکی بین خصوصیات کمّی و کیفی آب از یک طرف و مسائل اقتصادی- اجتماعی از طرف دیگر انجام شده است.

شهر تهران نظیر بسیاری از کلان شهرهای دنیا با افزایش تقاضا برای آب شیرین و محدودیت منابع موجود مواجه است. موقعیت جغرافیایی شهر تهران و رشد بی‌رویه تقاضای آب برای مصارف جدید، علی‌رغم استفاده از منابع آب مجاور و اطراف شهر، مدیریت آب شهری تهران را با شرایطی دشوار مواجه نموده است. راه حل پایدار برای مسئله آب در شهر تهران باید مبتنی بر نگرش جامع و پویایی سیستم[1] باشد. مدل پویایی سیستم آب تهران این امکان را فراهم می آورد تا بازخورد[2] های فعالیتهای انسانی، تغییرات اکوسیستمی و عوامل اجتماعی و اقتصادی را مطالعه نماید. در این مطالعه مدل منابع ومصارف آب تهران توسط روش پویایی سیستم برای ارزیابی روند تغییرات منابع ومصارف وعوامل اثرگذار بر آن توسعه داده شده است. در این مدل اثرات انتقال بین‌حوضه‌ای آب، تأثیر استفاده از مدیریت تقاضا و نیز اثر طرح جمع‌آوری فاضلاب مدل شده و شبیه‌سازی رفتار متغیر بیلان آب ارائه شده است. به علاوه این مدل می‌تواند اثر دوره‌های خشک و مرطوب هیدرولوژیکی، آلودگی آب، مدیریت آب شهری، اثرات فرسودگی و کاهش بازده سیستم و اثرات اجتماعی و اقتصادی را بررسی و شبیه‌سازی کند. این مدل همچنین می‌تواند با اعمال تغییراتی، برای پشتیبانی تصمیم‌گیری در مسائل آب شهری در سایر شهرها استفاده گردد.

## ۲- ادبیات فنی استفاده از پویایی سیستم در مدیریت منابع آب

از میان مدل‌های متعدد در مدیریت منابع آب، برخی از مدل‌ها دارای خصوصیت پویایی هستند. در این مدل‌ها درک مسائل و تغییرات به صورت حلقه‌ای و بازخورد است. به کمک این شیوه شبیه‌سازی، پیامدهای نامشخص و پیش‌بینی‌نشده تصمیم‌گیریها آشکار می‌شود. هدف عمده این روش، شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در شرایط فعلی و آینده برای تسریع و تسهیل یادگیری است. در ادبیات تحلیل پویایی سیستم‌ها، مدل‌های زیر قابل توجه هستند:

مدل جهانی۳[3] توسط فارستر[4]، بنیان‌گذار روش تحلیل پویایی سیستم، در سال ۱۹۷۳تهیه شده است [۶]. این مدل به بررسی تغییرات منابع کانی، آلی و انسانی بر اساس فعالیتهای بشر در روی زمین می پردازد. مدل جهانی۳ بعداً توسط میدوز[5] و همکاران در سالهای ۱۹۷۴ و۱۹۹۲ در مؤسسه تکنولوژی ماساچوست تکمیل شد [۷ و ۸].

مدل پویایی آب شهری[6] توسط فارستر در سال ۱۹۹۹ در کتابی به همین نام ارائه شده است. این مدل به بررسی پویایی سیستم اجتماعی و اقتصادی یک شهر و اثر آن بر منابع مربوط می‌شود [۹].

مدل هدف[7] توسط روتمنز و دووریه[8] در سال ۱۹۹۷ در مؤسسه ملی بهداشت عمومی و زیست محیطی هلند[9] توسعه داده شده است [۱۰]. این مدل از چندین قسمت تشکیل شده که عبارت است از: جمعیت، بهداشت، انرژی، زمین، غذا، آب و گردش عناصر

[1] System Dynamics
[2] Feedback
[3] World3
[4] Forrester
[5] Meadows
[6] Urban Dynamics
[7] Target
[8] Rotmans & De Vories
[9] Institute of Public Health and Environment, Netherland

بیولوژیکی. بخش آب آن دارای توابعی مربوط به مسائل انسانی شامل تأمین آب برای مصارف شهری، کشاورزی صنعتی، نیروی برق و حفاظت سواحل می‌باشد. توابع محیطی شامل تأمین آب برای اکوسیستم خشکی و حفظ کیفیت اکوسیستم آبی است و بخشی نیز شامل تأثیر تنشهای اجتماعی ، اقتصادی و زیست محیطی بر سیستم آب است. ساختار عملکرد این مدل عمدتاً وابسته به تغییرات اقلیم[1] است.

مدل جهانی آب[2] توسط سیمونویچ[3] تهیه شده و ایشان از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ هر سال ویرایش جدیدی از آن را ارائه کرده است. این مدل، بیلان آب را در مقیاس جهانی در پنج بخش صنعت، جمعیت، کشاورزی، منابع تجدید ناپذیر و آلودگی تحلیل می‌نماید. اهداف اصلی این مدل عبارت‌اند از:

ارتقای روش پویایی سیستم برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده منابع آب؛

بهره‌گیری از چارچوب مدل جهانی و توسعه یک مدل محلی؛

سعی در توانمندسازی تطابق سیستم منابع آب به صورت مدل ارزیابی منابع آب محلی.

نتیجه شبیه‌سازی مصارف آب دنیا در صد سال آینده با لحاظ رفتار مدل در صد سال گذشته نشان می‌دهد که کیفیت آب از مهم‌ترین چالشهای سالهای آتی خواهد بود [۱۱].

مدل آب کانادا[4] کل منطقه کانادا و قسمتی از کشور آمریکا در اطراف جزایر بزرگ را به وسعت ۱۰ میلیون کیلومتر مربع در نظر می‌گیرد. برای رسیدن به این مدل منطقه‌ای از مدل جهانی استفاده شده است. مدل کانادا نُه زیرمدل (جمعیت، سرمایه، کشاورزی، غذا، آب، کیفیت آب، انرژی، آلودگی ماندگار، و منابع آب تجدید ناپذیر) را به صورت به‌هم‌پیوسته در نظر می‌گیرد. هدف این مدل، شبیه‌سازی روابط بین کمّیت و کیفیت آب کانادا با متغیرهای عمده اجتماعی- اقتصادی در یک بازه فراتر از صدسال است. دوازده سناریو برای سیاستهای مختلف (تغییرات آب در دسترس، تصفیه فاضلاب، رشد اقتصادی، تولید انرژی و تولید غذا) شبیه‌سازی شده‌است. نتایج این مدل نشانگر کمبود گاز برای تولید انرژی و نیز افت شدید کیفیت آب در سالهای آتی برای این کشور است [۱۲].

سیمونویچ و همکاران در سال ۱۹۹۷ از روش فوق برای ارزیابی درازمدت منابع آبی و تحلیل سیاستهای اعمالی در حوضه رودخانه نیل در مصر بهره جستند [۱۳]. علاوه بر این سیمونویچ و احمد در سال ۲۰۰۰ با استفاده از این روش، بهره‌برداری از یک مخزن را برای سال پرآبی و چندین سیل رخداده برای یک سد بررسی و رفتار مخزن را در برابر سیل شبیه‌سازی کردند [۱۴].

مدل سیستم پویای اراهی[5] توسط گو[6] و همکاران برای بررسی تغییرات کیفیت آب دریاچه اراهی در کشور چین ایجاد شده است. اثرات منفی توسعه سریع اجتماعی- اقتصادی بر کیفیت دریاچه باعث نگرانیهایی در بین مدیران منطقه است. در این مدل، سیستم جامعی از مؤلفه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دریاچه تهیه شده و اثرات چهار برنامه مدیریتی بررسی شده است. حُسن و توانایی این مدل، بازتاب نتایج شبیه‌سازی تصمیمات در کیفیت آب دریاچه برای مدیران است [۱۵].

استیو[7] برای تصمیم‌گیری مشارکتی در حل کمبود آب برای شهر لاس‌وگاس[8] در ایالت نوادای آمریکا مدلی مبتنی بر پویایی سیستم ساخته است. در این مدل روشهای مختلف مدیریت تقاضا از دید مردم بررسی شده و نتایج و اثرات آنها بر کاهش شکاف بین تأمین و تقاضا بررسی شده است. حسن این مدل توانایی آن در ارائه نتایج تصمیم‌گیری قبل از اجرای تصمیم است [۱۶].

راس و پیپر[9] مدلی مبتنی بر پویایی سیستم برای بررسی شکل ساحل و دماغه کاد[10] در ایالت ماساچوست آمریکا ساخته‌اند. این مدل با توجه به تغییر اقلیم در دنیا به نحوه پیشروی آب دریا در دماغه می‌پردازد. فرسایش دماغه و ساحل، مسئله‌ای پویاست و مدل مبتنی بر پویایی سیستم کمک شایانی در شبیه‌سازی تغییرات این فرآیند در سالهای آینده می‌کند. این مطالعه در واقع تلفیق سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی[11] با پویایی سیستم است [۱۷].

کاسل و کلاوسن[12] مدلی به نام فسفر مزرعه[13] را تهیه کرده‌اند. این مدل به بازخورد و شبیه‌سازی کاربرد مواد فسفری در کشاورزی یک منطقه و تأثیر درازمدت آن بر کیفیت آبهای زیرزمینی و سطحی می‌پردازد. این مدل تأثیر برنامه‌های بهینه‌سازی کشاورزی را در کاهش فسفر در منابع آبی بررسی می‌کند [۱۸].

سودهیر[14] و همکاران برای مدیریت پایدار مواد زائد جامد، مدلی مبتنی بر پویایی سیستم ساخته‌اند. این مدل برای شهرهای هند تنظیم شده و در آن پویایی چرخه‌های بهداشت، اقتصاد،

[1] Climate Change
[2] World Water
[3] Simonovic
[4] Canada Water

[5] Erahi SD
[6] Guo
[7] Stave
[8] Las Vegas
[9] Ruth and Pieper
[10] Cod
[11] GIS
[12] Cassel and Clausen
[13] Field Phosphorus
[14] Sudhir

محیط‌زیست و رفتارهای انسانی تنظیم شده است. این مدل می‌تواند نتایج و آثار برنامه‌های مدیریتی را شبیه‌سازی کند [۱۹]. مشایخی نیز در سال ۱۹۹۳ مدلی برای مدیریت مواد زائد جامد شهر نیویورک ساخته است [۲۰].

فورد[1] در سال ۱۹۹۹ کتابی برای مدل سازی پویایی مسائل زیست‌محیطی نوشته است. در این کتاب آموزشی، مدل‌های بسیار متنوعی در مسائل مختلف آب و محیط زیست ارائه شده است. نویسنده این کتاب، برنده جایزه سال ۱۹۹۶ از بنیاد "دینامیک سیستم" بوده است [۲۱].

ولفندن[2] در سال ۱۹۹۹، مدلی برای مدیریت فرابخشی منابع در قلمرو حوضه آبریز تهیه کرده است. خصوصیات این مدل عبارت‌اند از: مدل سازی محیطهای پیچیده، مشارکت مردمی و یادگیری آنان و نیز در نظر گرفتن معیارهای چندگانه [۲۲].

هیورتا[3] و همکاران در سال ۲۰۰۱ از این روش در مدیریت یک حوضه آبریز در مکزیک استفاده کردند. مدل تهیه شده ابزار توانمندی در حل اختلاف بین پنج استان و ادارات آب ملّی بر سر توزیع آب سطحی بوده است [۲۳].

هو[4] و همکاران در سال ۲۰۰۵ از روش تحلیل پویایی سیستم برای بررسی اثرات تصمیمهای مدیریت آب برای تایوان جنوبی استفاده کرده‌اند. مدل تهیه شده تأثیر افزایش ظرفیت تأسیسات آب، تصفیه آب و آب زیرزمینی را ارائه می‌کند [۲۴].

اورز[5] در سال ۲۰۰۵ مدلی برای تخصیص بهینه آب در حوضه آبریز سان وان[6] بین ایالت کلرادو و مکزیکو در آمریکا بین ذی‌نفعان مختلف تهیه کرده است. این مدل اندرکنشهای اقتصادی برای مصارف مختلف آب را کمّی می‌کند. به علاوه، این مدل، اثر تغییر اقلیم را بر آورد رودخانه اصلی نیز در نظر می‌گیرد [۲۵].

سَلک و جکوبسن[7] در سال۲۰۰۵ مدل پویایی سیستم برای حوضه بیر[8] که در سه ایالت واقع شده ساختند. این مدل برای مدیریت جامع آب‌سطحی و زیرزمینی این حوضه با تلفیق اطلاعات هیدرولوژیکی با سایر اطلاعات (اجتماعی، اقتصادی و سیاسی) ساخته شده است. این مدل می‌تواند پشتیبانی لازم برای تصمیم‌گیری در مورد سناریوهای مدیریتی را ارائه کند [۲۶].

مجتهدزاده در سال ۱۳۷۰ مدلی برای شبیه‌سازی دینامیکی مسائل آب شهر یزد در محیط نرم‌افزار دینامو تهیه کرده است. در این مدل رفتار متغیرهای مهم مدل تحت سیاستهای کنترل جمعیت، کنترل صنعت، انتقال آب، محدود کردن گسترش بخش کشاورزی و بهبود روشهای آبیاری بررسی شده است [۲۷].

صادقی در سال ۱۳۸۳ پویایی سیستم را برای مدل‌سازی بهره برداری مخازن مورد استفاده قرار داد. از جمله نقاط قوت این روش شبیه سازی، به افزایش سرعت توسعه مدل‌سازی، افزایش اعتماد به مدل بر اثر مشارکت کاربر و ارتباط مؤثر با نتایج می‌توان اشاره نمود. آسانی ایجاد تغییر در مدل و توانایی انجام آنالیز حساسیت، این روش را از سایر روشهای تحلیل مدل‌سازی بهره برداری از مخازن، متمایز کرده است. گامهای مدل‌سازی روش تحلیل پویایی سیستم برای کنترل سیل رودخانه سیستان با پیک ۲۲۰۰ مترمکعب در ثانیه بر روی مخازن چاه نیمه توسعه داده شده است. در نهایت اعتبار مدل به روشهای مختلفی چون تحلیل حساسیت، آزمونهای حدی و غیره صحت‌سنجی شده است [۲۸].

جلالی و افشار در سال ۱۳۸۳ برای بهره برداری از سدهای برقابی مدلی بر اساس پویایی سیستم‌ارائه کردند [۲۹]. در این مدل به راحتی می‌توان سناریوهای مدیریتی و منحنیهای فرمان را اعمال کرده و با سرعت پردازش بالایی به حل مسئله پرداخت. قابلیتهای تحلیل حساسیت و فضای تصویری از اجزای مختلف سیستم منابع آب در یک سد از امتیازهای این روش نسبت به روشهای متداول مدیریت مخازن سدهاست [۳۰]. جلالی و همکاران در سال ۲۰۰۵ در مطالعه دیگری، به کمک تحلیل پویایی سیستم، روندیابی سیل را درسیستم‌های چند مخزنی (دریچه‌دار و بدون‌دریچه) بر روی رودخانه کارون شبیه‌سازی کرده و توانایی این روش را نسبت به روشهای متداول نشان دادند[۳۱].

## ۳- مراحل مدل‌سازی در تحلیل پویایی سیستم

مراحل مدل سازی در روش تحلیل پویایی سیستم به ترتیب زیر است:

- شناخت و تعریف مسئله؛
- رسم نمودارهای مرجع[9]: نمودار مرجع به نمودار رفتارهای عمده سیستم گفته می‌شود. این نمودارها لزوما با اعداد واقعی رسم نمی‌شوند، بلکه بیانگر رفتار کلی سیستم از دید متغیرها هستند.
- تعریف متغیرهای عمده مطرح در مسئله؛
- تعریف ارتباط بین متغیرها؛
- رسم نمودار علّت و معلولی بین متغیرها؛

[1] Ford
[2] Wolfenden
[3] Huerta
[4] Ho
[5] Ewers
[6] Sun Juan
[7] Sahlke and Jacobson
[8] Bear Basin
[9] Reference Modes

- تعریف مرزهای مدل؛
- ساخت نمودار جریان برای مدل: در این نمودار متغیرهای نرخ و انباره‌ای از هم تفکیک شده و سپس مبتنی بر نمودار علّت و معلولی و ارتباط بین متغیرها شکل کاملی از مدل رسم می‌گردد. در این نمودار خصوصیات مسئله مانند تأخیر[1]، رفتارهای غیرخطی، شروط و ... اعمال می‌شود.
- اجرای مدل؛
- بررسی اعتبار مدل: تست‌های مختلفی مانند تحلیل حساسیت، آزمونهای حدی، ارزیابی متغیرها، ارزیابی ساختار مدل، سازگاری بُعد متغیرها، ارزیابی خطاهای تجمیع[2]، برای بررسی اعتبار مدل وجود دارد [۳۲]. بعد از ارزیابی اعتبار مدل گام بعدی کالیبره کردن مدل برای پارامترهاست.

## ۴- اهمیت و نقش سفره آب زیرزمینی تهران در تأمین تقاضای آب شهری

آب شهر تهران از طریق منابع سطحی شامل رودخانه‌های کرج، لار و جاجرود و منابع زیرزمینی موجود در سطح شهر تأمین می‌گردد. آب رودخانه‌های فوق توسط سدهای مخزنی تنظیم شده از طریق خط لوله، کانال و تونل به چهار تصفیه‌خانه شهر هدایت می‌شود. ظرفیت نهایی سالیانه انتقال آب از سدهای کرج ۳۹۰ و در مورد لتیان و لار ۲۸۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. در واقع ظرفیت سالیانه انتقال آب ۷۵۰ میلیون مترمکعب (۲۳/۸ مترمکعب در ثانیه) می‌باشد. سفره آب زیرزمینی دشت تهران یکی از منابع اصلی تأمین آب شهر تهران است. قبل از سال ۱۳۴۵ برداشت آب از سفره زیرزمینی مقدار ناچیزی بوده است و سهم این منبع روز به روز افزایش یافته است (شکل ۱). نقش منابع آب زیرزمینی تهران در سالهای خشک مهم‌تر می‌شود، به طوری که در یک سال خشک (۱۳۷۹) آب زیرزمینی ۵۰ درصد تقاضای آب تهران را تأمین کرده است (شکل ۲) [۳۳ و ۳۴].

اهمیت سفره آب زیرزمینی دشت تهران را در موارد زیر می‌توان بیان کرد:
- تأمین حداقل ۴۰ درصد نیاز مصرف شهر تهران در سالهای خشک ؛
- تأمین نیاز آبی کشاورزی در دشت تهران؛
- تأمین نیاز آبی صنایع در دشت تهران؛
- منبع پذیرنده فاضلاب شهری.

علاوه بر این، موارد زیر از دید مدیریت آب شهری اهمیت دارند:
- تعیین و بررسی بازخورد تصمیمهای مدیریتی مثل اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب تهران روی سفره آب‌زیرزمینی تهران.
- رشد جمعیت باعث افزایش استفاده از منابع آبی می‌گردد و شناخت اثر این متغیر روی بیلان منابع آبی شهر لازم است.
- تکیه بر آب زیرزمینی دشت تهران برای رفع تقاضا، می‌تواند تبعات ناگواری داشته باشد. سناریوهای مختلف بهره‌برداری با در نظر گرفتن بیلان و رفتارهای اجتماعی باید بررسی شود. این بررسی باید در یک مدل جامع و به صورت پویا در سالهای آینده صورت بگیرد.
- افزایش انتقال آب از سدهای مجاور به شهر تهران و نیز از سایر حوضه‌ها، تغییرات مهمی در بیلان منابع آبی شهر تهران خواهد داشت. منابع جدید که باید نیاز سالهای آینده تهران را تأمین کنند عبارت‌اند از: سد لار (در صورت جلوگیری از فرار آب)، افزایش حقابه شرب از سد لتیان (با اجرای طرح فاضلاب و تخصیص پساب تصفیه شده به کشاورزی ورامین)، ساخت سد دروازه بر روی رودخانه دماوند و رودخانه طالقان از سرشاخه‌های حوضه آبریز شاهرود. این منابع باید به صورت مشترک و به تدریج، تفاوت آب مورد نیاز و قابل تأمین از منابع موجود را که بر اساس تخمین در سال ۱۴۰۰ به حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد تأمین کنند [۳۳].

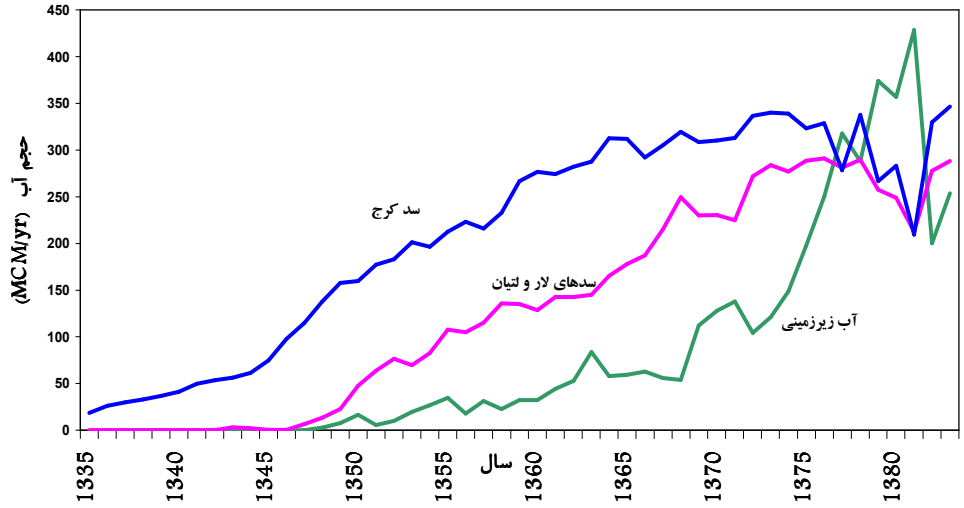
رشد جمعیت، افزایش مصرف آب و وقوع دوره‌های خشکسالی، فشار فزاینده‌ای بر تأسیسات تأمین آب شهری تهران وارد نموده است. بدین لحاظ بررسی پویایی سیستم منابع آب زیرزمینی در گذشته و پیش بینی آن در آینده با توجه به سناریوهای محتمل منابع و مصارف آب می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیران تصمیم‌گیر در وزارت نیرو برای اقدامات به موقع جهت رفع مشکلات آتی باشد. در این مقاله مدل لازم برای سیستم آب شهری تهران مبتنی بر تحلیل پویایی سیستم تهیه و توسعه داده شده است.

## ۵- مدل پویایی منابع آب زیرزمینی تهران

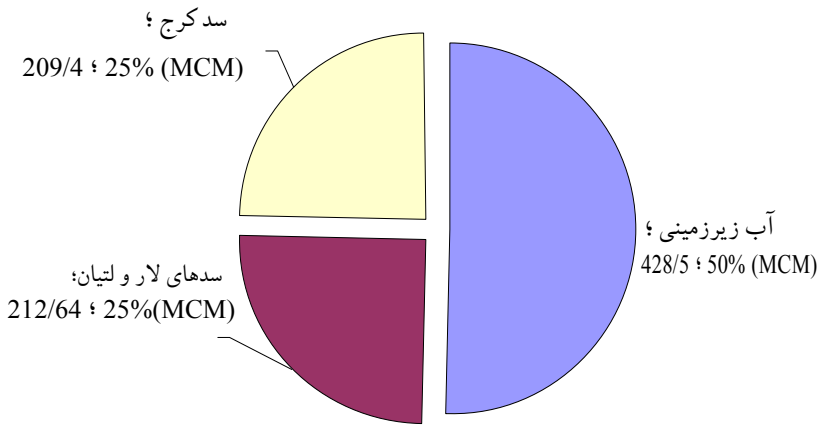
### ۵-۱- بررسی نمودارهای مرجع

شکل ۱ ، نمودار مرجع اصلی در این مطالعه است. در این شکل مشاهده می‌شود که استفاده از سفره آب‌زیرزمینی دشت تهران در حال افزایش است. این افزایش در سالهای خشک شدیدتر می‌شود و در واقع از مقدار آبدهی مطمئن و پایدار سفره[3] تجاوز می‌کند. برداشت بیش از حد از سفره، اثر خود را به صورت افت سطح ایستابی سفره نشان می دهد. سطح آب سفره به طور متوسط

[1] Delay
[2] Integration Error Test
[3] Safe Yield




**شکل ۱**- روند استفاده از منابع آب برای تأمین آب شهر تهران از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۳ بر حسب میلیون مترمکعب در سال [۳۳]

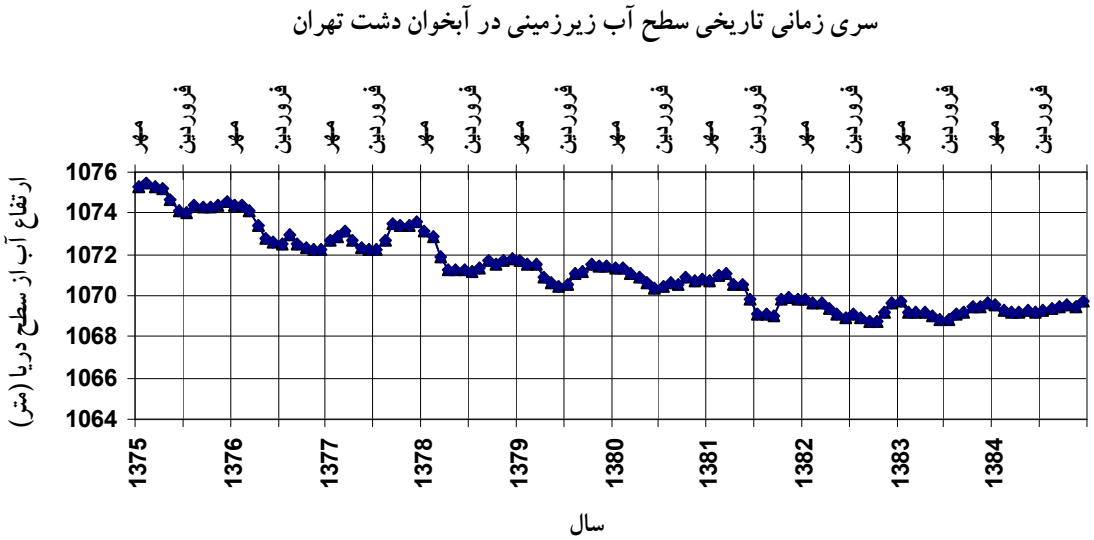



**شکل ۲**- سهم منابع آبی مختلف در تأمین تقاضای آب شهر تهران در یک سال کم‌آبی (۱۳۸۱)

سالانه در حدود ۰/۵متر افت کرده است [۳۴و ۳۵]. این وضعیت در شکل ۳ برای سالهای ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۵ رسم شده است.با توجه به شکل ۳ این سؤال پیش می آید که در سالهای آتی با توجه به افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش برداشت از سفره، آب زیرزمینی تهران به لحاظ کمّی و کیفی چه حالتی خواهد یافت. در جدول ۱ جمعیت شهر تهران و مصرف روزانه هر نفر و در نتیجه مصرف سالانه شهر ارائه شده است. همان طور که از جدول ۱ مشاهده می شود، مصرف سرانه آب طی ۳۰ سال حدود ۴ برابر و میزان مصرف سالانه بیش از ۸ برابر شده است [۳۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۹]. نکته قابل توجه این است که برخلاف رشد حدود ۳/۵ درصدی جمعیت شهر تهران در این دوره، مصرف آب با رشد سالانه تقریباً هشت درصد همراه بوده است[۴۰]. در شکل ۴ نمودار مرجع به صورت مفهومی برای نمایش افزایش تقاضای آب در مقایسه با وضع تأمین منابع آب در تهران رسم شده است [۳۳].

شکل ۴ نشان می‌دهد که از حدود سال ۱۳۸۰ شهر وارد کمبود آبی شده است. به عنوان یک نمودار مرجع دیگر باقری و همکاران در سال ۱۳۸۳ برای سنجش پایداری سیستم آب شهری تهران معیارهای : فنی، زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی، استقلال و همزیستی را پیشنهاد کردند و برای کمّی کردن هریک از آنها شاخص متناظری تعریف نمودند [۴۱]. برای تلفیق این معیارها و رسیدن به یک شاخص کلی برای بیان پایداری در یک سیستم آب شهری، یک مدل استنتاج‌گر فازی مطابق با مدل فازی ممدانی[1] ساخته شده و برای هر یک از معیارها و شاخص پایداری

[1] Mamdani

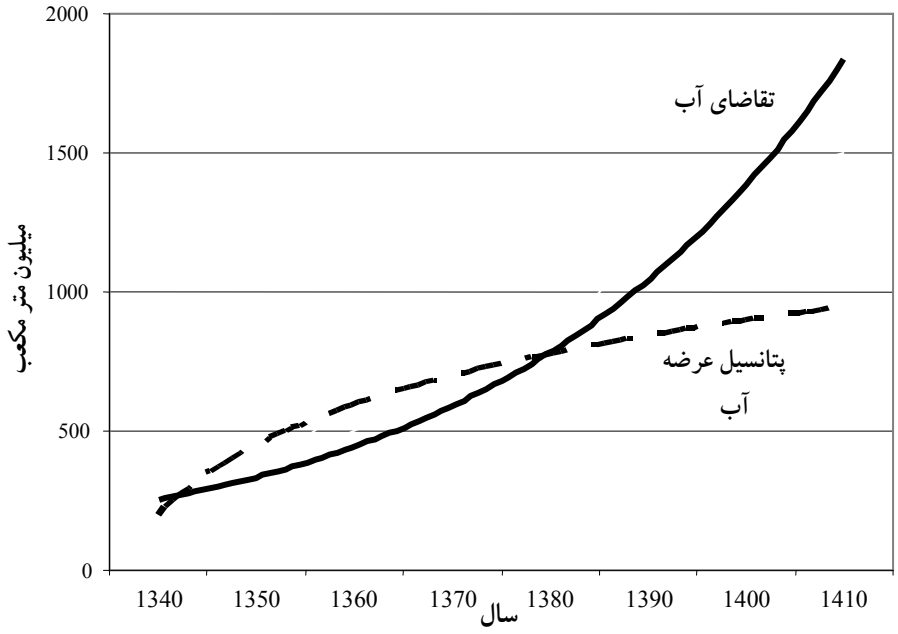



**شکل ۳**- تغییرات سطح ایستابی سفره آب زیرزمینی شهر تهران از سال ۱۳۷۵ تا۱۳۸۴ [۳۴]

**جدول ۱**- جمعیت تهران و مصرف سرانه آب طی سالهای ۱۳۴۵ تا ۱۳۷۰ [۳۶-۳۹]

| سال | جمعیت (۱۰۰۰ نفر) | مصرف سالانه آب (میلیون مترمکعب) | مصرف سرانه (لیتر در روز)* |
|---|---|---|---|
| ۱۳۴۵ | ۲۷۲۰ | ۹۸ | ۹۹ |
| ۱۳۵۵ | ۴۵۳۰ | ۳۴۶ | ۲۰۹ |
| ۱۳۵۹ | ۵۴۵۴ | ۴۴۳ | ۲۲۲ |
| ۱۳۶۵ | ۶۰۴۲ | ۵۴۲ | ۲۴۴ |
| ۱۳۷۰ | ۶۴۷۵ | ۶۸۱ | ۲۸۸ |
| ۱۳۷۵ | ۶۷۵۹ | ۷۸۰ | ۳۵۲ |

* غیر از مصرف فضای سبز عمومی




**شکل ۴**- مقایسه تأمین و تقاضای آب در تهران [۳۳]

کل نیز، توابع عضویت فازی برای استفاده در مدل مزبور تعریف شده است. معیارها و مدل طراحی شده به صورت موردی برای شهر تهران با استفاده از داده‌های آماری از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۷۹ به کار گرفته شدند. طبق نتیجه این مدل (شکل ۵)، سیستم آب این شهر در ابتدا در وضعیت پایدار قرار داشت ولی از اواخر دهه ۴۰ روند آن سیر نزولی پیدا کرد به طوری که از اواخر دهه ۵۰ سیستم مزبور در حالت نیمه پایدار قرار گرفت. شایان ذکر است که تغییرات احتمالی در تأمین منابع و همچنین مصارف آینده شهر تهران می‌تواند شبیه گذشته نباشد و تغییرات مختلف در هر یک از پارامترها اثرات متفاوتی بر روی عملکرد کل سیستم داشته باشند. در واقع کاربرد اصلی روش تحلیل پویایی سیستم، پیش‌بینی تغییرات نمودارهای مرجع در آینده می‌باشد.

**۵-۲- مرزهای مدل**

مرزهای مدل پویای سیستم منابع آب زیرزمینی و مصارف تهران به شرح زیر است:

۱- مرزهای سیستم منابع آب زیرزمینی تهران:

- مرز شمالی به دامنه ارتفاعات البرز واقع در شمال تهران؛
- مرز شرقی به رودخانه سرخه حصار؛
- مرز غربی به رودخانه کن؛
- مرز جنوبی به دشت ورامین؛
- آب انتقالی از سدهای لار ، لتیان و کرج به محدوده شهر تهران نیز داخل مرز محسوب شده است.

۲- مرزهای سیستم مصارف آب شهری تهران شامل کلیه ذی‌نفعان منابع آب در محدوده شهر تهران شامل مصرف‌کنندگان آب شهری، فضای سبز، صنعتی، کشاورزی و زیست محیطی است.

۳- مرز زمانی، تغییرات عوامل طبیعی و انسانی را تا افق سال ۱۴۰۰ مورد بررسی و تحلیل قرار می دهد.

**۵-۳- بررسی زیرمدل‌های مدل پویای آب شهری تهران و رسم نمودار علّت- معلولی**

مدل منابع و مصارف آب زیرزمینی تهران شامل شش زیرمدل مخزن آب زیرزمینی، مخازن آب سطحی، جمعیت، نیاز آبی، بیلان آب و بودجه مدیریت است. زیرمدل‌های این مدل و متغیرهای آنها در مدل پویای آب شهری تهران، عبارت‌اند از :

**۵-۳-۱- سیستم سفره آب زیرزمینی شهر**

شامل منابع تغذیه کننده با متغیرهای بارندگی، رودخانه، ذوب برف، برگشتی از مصارف کشاورزی، تغذیه از طریق گرادیان هیدرولیکی، آبهای برگشتی ناشی از مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی و منابع تخلیه کننده با متغیرهای تخلیه آب زیرزمینی توسط گرادیان هیدرولیکی، تخلیه توسط چاهها، چشمه‌ها و قنوات است. لازم به ذکر است ۹۰ درصد تخلیه سفره تهران توسط چاهها و بقیه توسط قنات و چشمه است[۳۴]. تغذیه و تخلیه از طریق گرادیان هیدرولیکی به صورت متغیر برون‌زاد و معلوم به مدل وارد می‌شود. مدل هیدرولیکی آب زیرزمینی در این مطالعه تهیه نشده و آب زیرزمینی به صورت یکجا و توده‌ای[1] درنظر گرفته شده است.

**۵-۳-۲- سیستم مخازن آب سطحی**

این سیستم به صورت متغیرهای برون‌زاد، با یک الگوی مشخص آب را از مخازن موجود تأمین می‌نمایند، بدون آنکه مدل نسبت به شبیه‌سازی مخازن سدها اقدامی نماید.

**۵-۳-۳- جمعیت**

جمعیت که متقاضی اصلی آب در شهر تهران است، تابعی از متغیرهای نرخ تولد، مهاجرت، امید به زندگی، تأمین آب به ازای هر نفر و اثر کمبود آب بر میزان مرگ ومیر می‌باشد.

**۵-۳-۴- تقاضای آب**

شامل تقاضاهای آب شهری، کشاورزی و صنعتی می‌باشد. نیاز صنعت تابعی از تعداد واحدهای صنعتی و نیاز متوسط هر واحد می‌باشد. نیاز کشاورزی شامل اراضی در دست کشاورزی و الگوی مصرف برای هر هکتار می‌باشد. نیاز کشاورزی در حال حاضر از سفره آب زیرزمینی تأمین می‌شود ولی با احداث سیستم فاضلاب شهری به‌تدریج تخصیص آب کشاورزی از آب زیرزمینی به پساب واحدهای تصفیه فاضلاب تغییر خواهد کرد.

**۵-۳-۵- سیستم فاضلاب شهری**

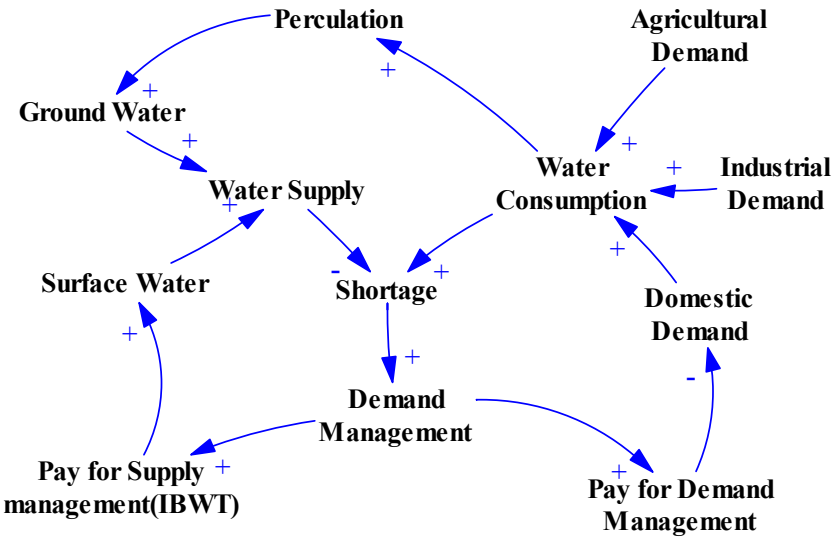
با احداث سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری تهران، به تدریج نفوذ آب برگشتی از مصارف شهری به سفره زیرزمینی کاهش یافته و از طرف دیگر فاضلاب تصفیه شده به نیاز کشاورزی اختصاص داده می‌شود. احداث سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهر تهران از سال ۱۳۸۰ شروع و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ ادامه یابد.

**۵-۳-۶- بیلان آب**

در این زیرسیستم، تقاضای آب از یک طرف و تأمین آن از طرف

[1] Lumped Model

**شکل ۵** - تغییرات شاخص پایداری منابع آب شهر تهران از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۷۹ [۴۱]




**شکل ۶**- نمودار علّت و معلولی مدل تهران

دیگر، مقایسه و در صورت کمتر بودن مقدار تأمین آب از مقدار تقاضا، تفاوت به صورت کمبود معرفی می‌گردد. مقدار کمبود آب، میزان "تخصیص بودجه برای کاهش کمبود" را مشخص می‌نماید.

### ۵-۳-۷- تخصیص بودجه برای کاهش بحران[1]

این بودجه مربوط به مدیریت تأمین و تقاضا برای کاهش کمبود آب می‌باشد. در مدیریت تقاضا، اختصاص بودجه برای بهسازی سیستم انتقال، توزیع و کاهش مصرف آب مد نظر قرار گرفته است. در مدیریت تأمین آب، بهره برداری بهینه از مخازن آبی (مخازن سدها و مخزن آب زیرزمینی) و همچنین پرداخت هزینه انتقال آب از حوضه‌های دیگر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

براساس این مؤلفه‌ها و روابط آنها، نمودار علّت و معلولی در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۵-۴- نمودار انباره- جریان مدل تهران

نمودار انباره- جریان در واقع تبدیل شکل ۶ به سیستمی مرکب از انباره‌ها[2]، متغیرهای نرخ و روابط بین آنها می‌باشد. نمودار انباره - جریان مدل تهران که شامل همه متغیرهای مطرح در نمودار علّت- معلولی است در محیط نرم‌افزار ون سیم[3] در شکل ۷ رسم

[1] Pay for Shortage Reduction

[2] Stocks
[3] Vensim

شده است. نرم افزارهایی مانند ون سیم شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم را انجام داده و تحلیل حساسیت نتایج را به صورت تصویری به همراه قابلیتهای مختلف پشتیبانی تصمیم‌گیری، ارائه می‌دهند [۴۲].

## ۵-۵- واسنجی[1] و تصدیق[2] مدل

یکی از مراحل مهم مدل‌سازی، واسنجی و تصدیق مدل است. در مرحله واسنجی پارامترهای مدل شامل :

- پارامترهای تغذیه کننده سیستم با توجه به توزیع مکانی، زمانی و مقدار آنها، شامل آبدهی ورودی و تنظیم شده از مخازن سدها، آب ورودی به مخازن زیرزمینی و آبهای برگشتی حاصل از مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی است.
- پارامترهای تخلیه کننده سیستم با توجه به توزیع مکانی، زمانی و مقدار آنها شامل مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی است.
- خصوصیات هیدرولیکی سیستم شامل آبخوان دشت تهران و ارتباط بین تأمین از آب سطحی و آب زیرزمینی است.
- سری زمانی مصرف کنندگان آب شهری تهران.

با توجه به این که حدود ۹۸ درصد جمعیت تهران تحت پوشش شبکه آب شهری هستند، افزایش نیاز آب شهری متناسب با افزایش جمعیت در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی تطابق عملکرد سیستم، سری زمانی، روند تاریخی افزایش جمعیت (مشترکین آب شهری) و نوسانات سطح آب و ذخیره آب در آبخوان دشت تهران بین سالهای ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۴ با مقادیر شبیه سازی شده مقایسه و مدل بر این اساس کالیبره، صحت سنجی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکلهای ۸ و ۹ سری زمانی افزایش سالانه جمعیت و شکلهای ۳ و ۱۰ نوسانات سطح و ذخیره آب در آبخوان دشت تهران در سری زمانی تاریخی و شبیه سازی شده را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است برای تطابق ذخیره آبخوان آب زیرزمینی از مقایسه سری زمانی هیدروگراف واحد آب زیرزمینی (اندازه گیری شده) و نوسانات ذخیره آبخوان آب زیرزمینی در محاسبات شبیه‌سازی شده استفاده شده است که برای تبدیل ذخیره آب زیرزمینی به نوسانات سطح آب باید از ضریب ذخیره آب زیرزمینی دشت تهران ( برابر ۶ درصد) و از مساحت آبخوان که برابر ۴۹۶ کیلومتر مربع می باشد استفاده نمود.

پس از تصحیح و تدقیق پارامترها و روابط، مدل واسنجی می‌شود. این مدل به عنوان نمایشگر سیستم واقعی در طبیعت در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۱ نحوه رفتار متغیرهای اصلی برای دوره ۱۰ ساله (دوره واسنجی) و سپس شبیه‌سازی آنها برای یک دوره دراز مدت تا سال ۱۴۰۰ (دوره مورد مطالعه) ارائه شده است. سناریوی مورد نظر در این شبیه‌سازی، ادامه وضعیت گذشته و فعلی از جهت منابع آبی و منابع مالی، تغییرات جمعیت و نیز ابزارهای مدیریتی می‌باشد. همان طور که ملاحظه می‌گردد کمبود آب در سالهای آتی به شدت افزایش خواهد یافت. منابع آب‌زیرزمینی به شدت کاهش یافته و بیلان آب منفی خواهد بود.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی سیاستهای مختلف مدیریتی

بعد از واسنجی مدل، سه سیاست مدیریتی در مدل پویایی سیستم آب شهری تهران شبیه‌سازی شد. این سه سیاست مدیریتی و نتایج اعمال آنها در مدل مزبور عبارت‌اند از:

### ۶-۱- تأثیر اجرای شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب

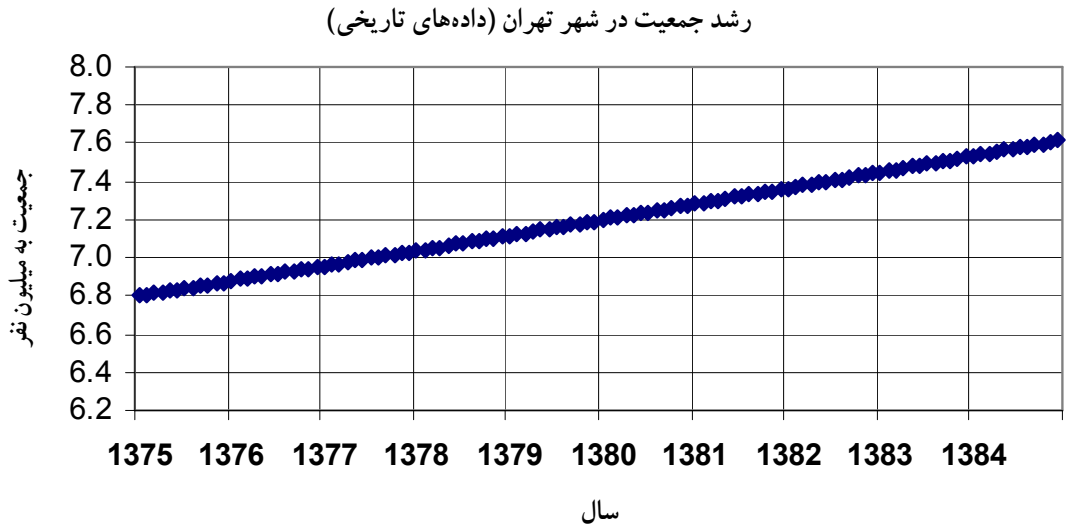
یکی از سؤالات مهم و نگرانیهای مدیران آب شهری عدم اطلاع از اثرات آتی اجرای شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب است. در این طرح، فاضلاب منازل و مناطق صنعتی پس از تصفیه برای مصارف فضای سبز و یا کشاورزی به کار خواهد رفت.

در شهر تهران شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در بعضی قسمتها در حال بهره‌برداری و در جاهای دیگر در حال اجراست. در این مدل دینامیکی، دو سناریو برای بررسی اثر اجرای شبکه فاضلاب و استفاده از آب حاصل برای تأمین حقابه‌های کشاورزی در دشت تهران در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول فرض شده که شبکه فاضلاب در تهران اجرا نشود. در این حالت، جذب عمده فاضلاب از طریق چاههای جاذب است. در سناریوی دوم فرض شده که از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ شبکه به مرحله اجرا درآمده و به صورت خطی از صفر تا ۱۰۰ درصد در طول این ۲۰ سال تحقق یابد. در شکلهای ۱۲ و ۱۳ اثرات این دو سناریو با شبیه‌سازی توسط مدل دیده می‌شود. از شکل ۱۲ این نتیجه حاصل می‌شود که سهم آب برگشتی ناشی از فاضلاب شهری (چاههای جذبی) اهمیت زیادی در تعادل سفره آب زیرزمینی تهران دارد. از طرف دیگر احداث سیستم شبکه فاضلاب تهران موجب می‌شود تا از یک طرف فاضلاب شهری به‌جای تغذیه سفره زیرزمینی وارد واحدهای تصفیه فاضلاب شده و تغذیه سفره زیرزمینی کاهش یابد و از طرف دیگر نیاز کشاورزی به جای برداشت از سفره زیرزمینی از فاضلاب تهیه شده، تأمین گردد و بدین لحاظ سفره زیرزمینی کمتر تخلیه شود. با توجه به اینکه میزان آبی که در حال حاضر بر اثر مصرف آب شهری به سفره آب زیرزمینی نفوذ می نماید بیشتر از بهره‌برداری آب زیرزمینی توسط مصارف کشاورزی است، پس از احداث و

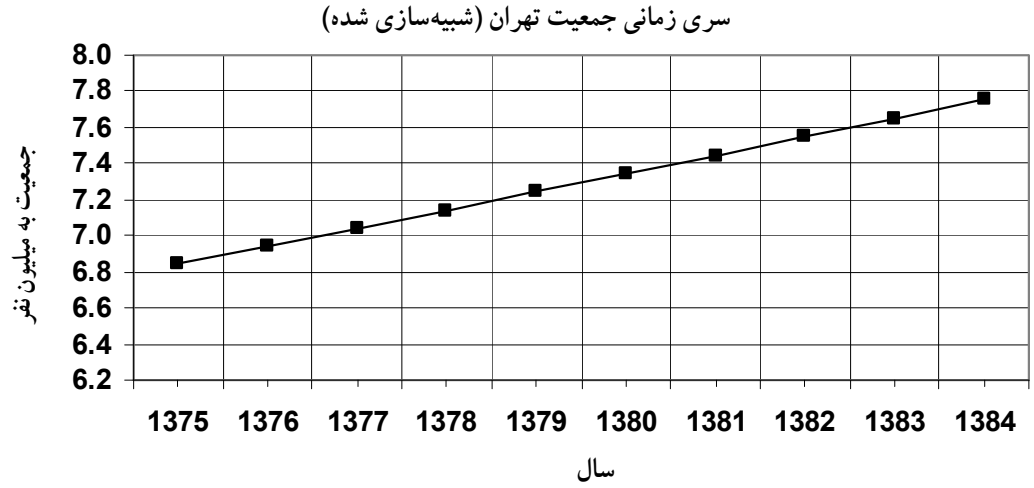
[1] Calibration
[2] Verification

**شکل ۷**- نمودار جریان مدل پویایی سیستم آب شهری تهران

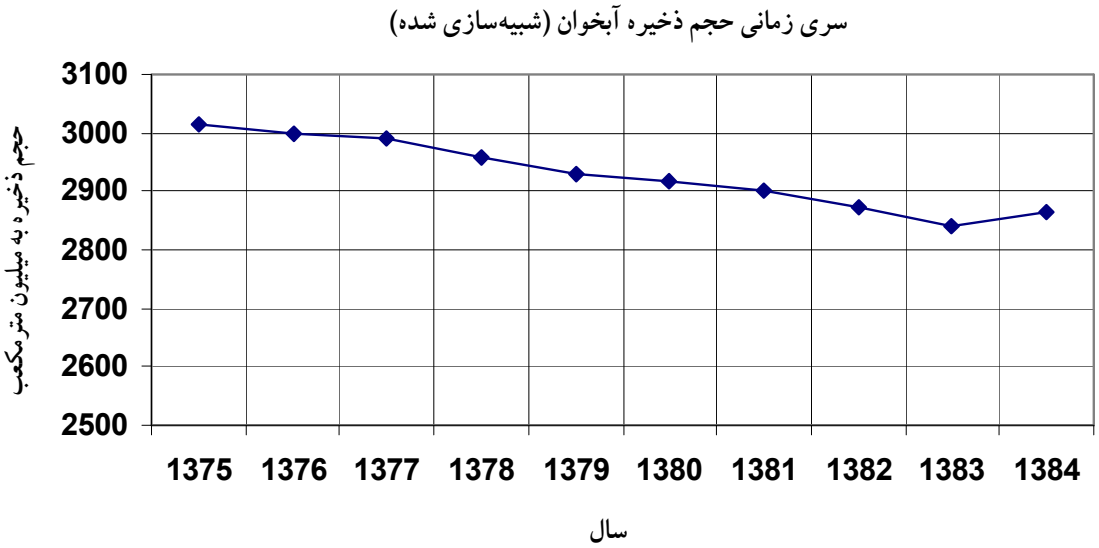
psmc: pay for surface managenet coefficient



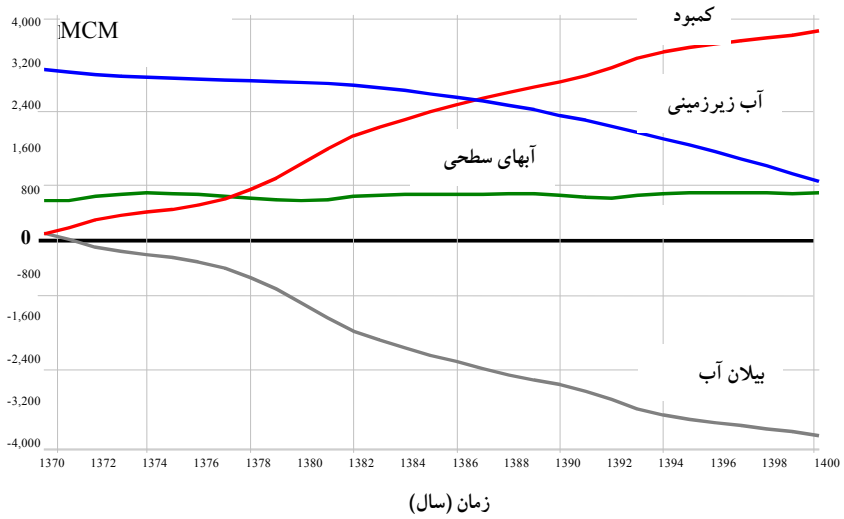

**شکل ۸**- سری زمانی آمار تاریخی جمعیت ( مصرف کنندگان آب شهری) تهران در دوره واسنجی مدل




**شکل ۹**- سری زمانی مقادیر شبیه سازی شده جمعیت ( مصرف کنندگان آب شهری) تهران در دوره واسنجی مدل




**شکل ۱۰**- سری زمانی مقادیر شبیه سازی حجم ذخیره آب در آبخوان تهران در دوره واسنجی مدل

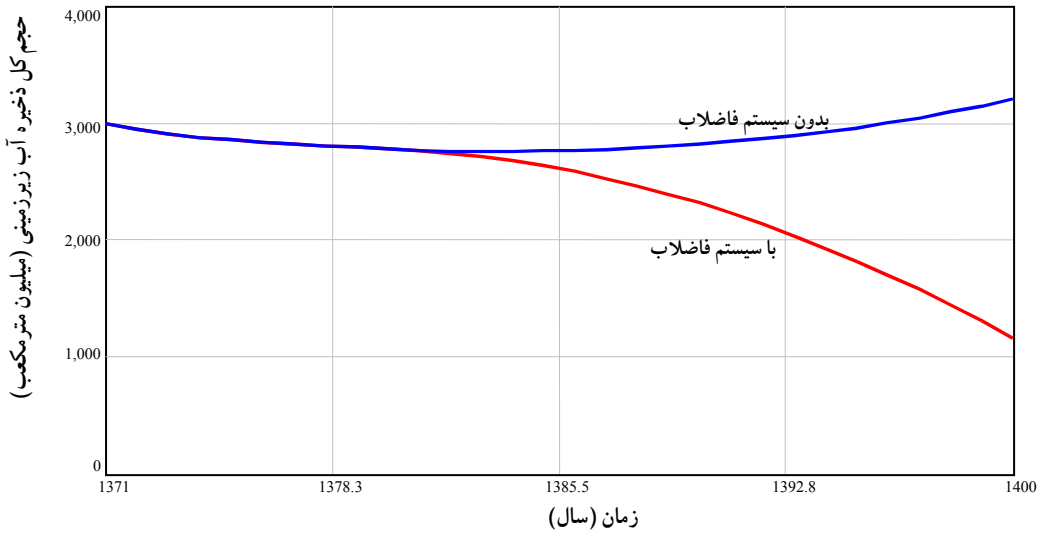



**شکل ۱۱**- تحولات مقادیر داده‌های کلیدی مدل براساس شبیه‌سازی یک دوره درازمدت

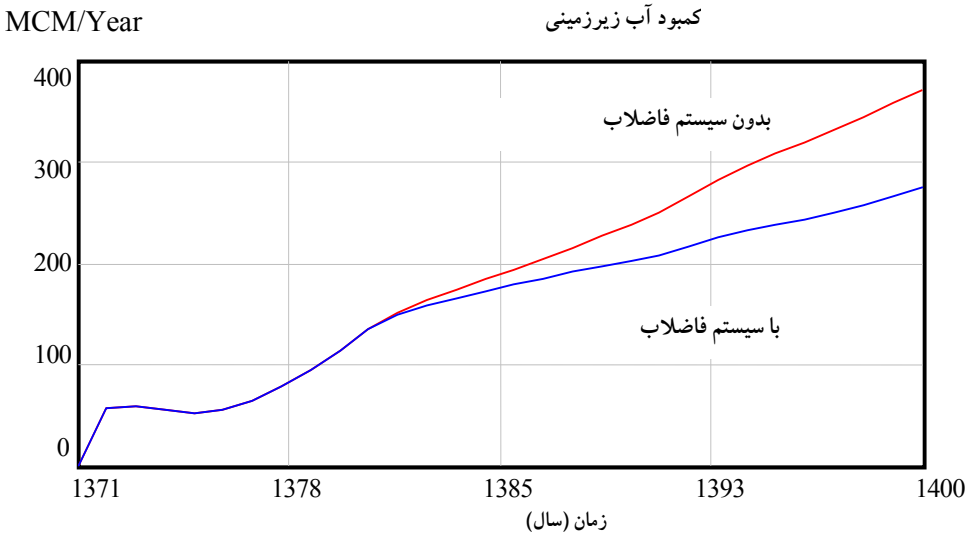
بهره‌برداری از شبکه فاضلاب، تغذیه سفره آب زیرزمینی کاهش خواهد یافت و سفره زیرزمینی با افت تدریجی سطح آب و ذخیره آن مواجه خواهد شد. در صورت اجرای شبکه فاضلاب شهری، از سال ۱۳۸۰ سفره آب زیرزمینی با کاهش بحرانی ذخیره خود روبرو خواهد شد. ولی با توجه به شکل ۱۳ مدل نشان می‌دهد که اجرای طرح فاضلاب با جا به جایی تخصیص تأمین آب کشاورزی از آب تصفیه شده فاضلاب به جای بهره برداری از آبخوان گام مهمی در کاهش تنش کمبود آب در تهران خواهد بود؛ زیرا از سال ۱۴۰۰ دچار کمبود غیر قابل‌قبولی خواهیم شد ولی با اجرای طرح فاضلاب به جای کمبود ۳۸۰ میلیون متر مکعبی، فقط ۲۸۰ میلیون متر مکعب در سال کمبود خواهیم داشت.

**۶-۲- اعمال سناریوهای مدیریت تأمین در مدل**

مطابق شکل ۴، شهر تهران از سال ۱۳۸۰ وارد منطقه بحران آب شده و روز به روز شکاف بین تأمین و تقاضا بیشتر خواهد شد. اگر سالانه مبلغی برای جبران این شکاف در نظر گرفته شده باشد، می‌توان این بودجه را در زمینه‌های مدیریت تقاضا و تأمین به کار برد. یکی از ابزارهای سخت‌افزاری مدیریت تأمین، انتقال بین‌حوضه‌ای آب است. منابع آبی موجود برای انتقال به تهران در بخش ۴ توضیح داده شد. با این فرض که هزینه انتقال هر مترمکعب آب در سال اجرای مدل، ۱۰۰۰ ریال باشد، در صورتی که مدیریت آب شهری سالانه در سه سناریو مبالغی برابر صفر ، ۵۰ و ۱۰۰ میلیارد ریال برای انتقال آب به تهران از منابع جدید صرف کند، اثر




**شکل ۱۲**- تأثیر اجرای شبکه فاضلاب بر حجم آب زیرزمینی



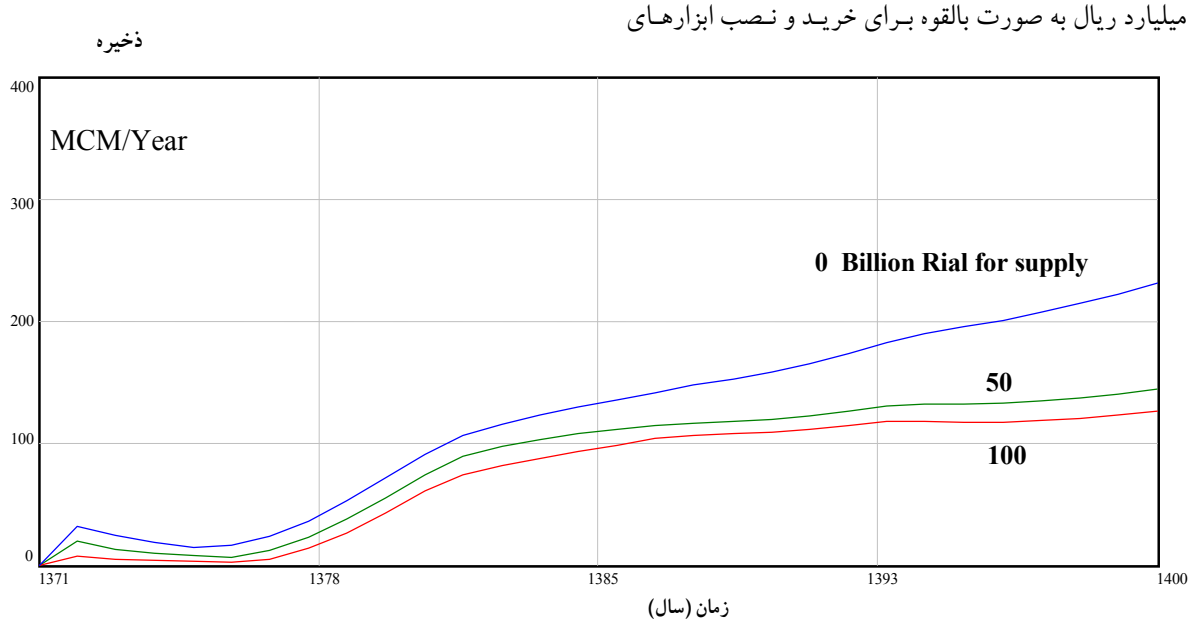

**شکل ۱۳**- تأثیر اجرای طرح فاضلاب بر کاهش تأمین از آب‌زیرزمینی

آن بر کاهش کمبود آب در سالهای آتی تا ۱۴۰۰ در شکل ۱۴ آمده است. با توجه به شکل ۱۴ در می یابیم که صرف این بودجه در هر سال می‌تواند به مقدار قابل توجهی از کمبود جلوگیری کند. به عنوان مثال در سال ۱۴۰۰، کمبود از ۲۲۰ به ۱۲۰ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد. این کاهش با صرف بودجه‌ای برابر ۱۰۰ میلیارد ریال در هر سال (از سال مبنا تا ۱۴۰۰ ) به عنوان معادل سالانه و تنزیل یافته برای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است.

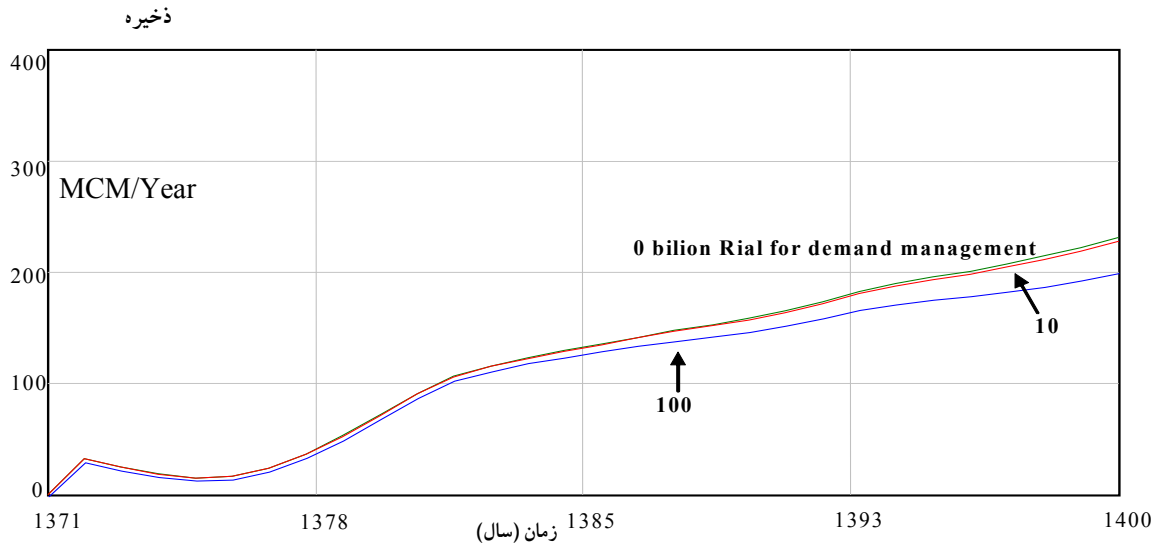
**۶-۳- اعمال مدیریت تقاضا**

مدیریت تقاضا شامل فرآیند و ابزارهای مختلفی می‌باشد. در صورتی که بودجه سالانه‌ای در سه سناریو به مقدار صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلیارد ریال به صورت بالقوه برای خرید و نصب ابزارهای کاهنده مصرف در منازل در دسترس باشد، اجرای مدل اثر آن را در کاهش کمبود سالانه آب در شکل ۱۵ نشان می‌دهد. این بودجه به عنوان معادل سالانه و تنزیل یافته برای هزینه‌های نصب ابزارها و بهره‌برداری در هر سال (از سال مبنا تا ۱۴۰۰) است. ابزارهای انتخاب شده و هزینه‌های مربوطه و نحوه تبدیل آنها در مراجع آمده است [۴۳ و ۴۴].

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که اثر این روشها در بهترین حالت در سال ۱۴۰۰ تنها ۲۰ میلیون متر مکعب در سال است. بنابراین صرف بودجه روی این روش کافی نبوده و جبران کمبودها نیازمند انتقال بین‌حوضه‌ای نیز می‌باشد.




**شکل ۱۴**- تأثیر انتقال بین حوضه‌ای آب روی کاهش کمبود آب (در سه سناریو مالی)




**شکل ۱۵**- تغییر کمبود سالانه آب در صورت صرف بودجه در مدیریت تقاضا (نصب ابزارهای کاهنده مصرف در منازل)

## ۷- نتیجه گیری

آینده تأمین آب شهری تهران با دو چالش عمده روبروست. چالش اول، افزایش جمعیت است که موجب افزایش تقاضای آب شده است. چالش دوم، تأمین منابع مالی برای اجرای شبکه فاضلاب، انتقال بین حوضه‌ای و مدیریت تقاضا می‌باشد. این مدل اثرات تغییر جمعیت و سایر عوامل بر حجم آب‌زیرزمینی در سفره تهران را ارائه می‌کند و در مورد چالش دوم، راهکارهای موثر و کاراتر تخصیص منابع مالی را نشان می‌دهد. نتایج اجرای مدل پویایی سیستم آب شهری تهران نشان می‌دهد که ادامه اجرای طرح جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، به مقدار زیادی از منابع آب‌زیرزمینی قابل دسترس برای تأمین آب شهری خواهد کاست. علی‌رغم تأثیر مثبت نصب ابزارهای کاهنده مصرف، مدیریت تقاضا نمی‌تواند به تنهایی شکاف زیاد بین تقاضا و تأمین را پرکند. بنابراین انتقال بین‌حوضه‌ای آب برای تأمین تقاضای آب شهر تهران ضروری است.

با استفاده از مدل‌های پویا، نگرش اولیه به اثرات تصمیمهای مدیریت آب شهری بهبود یافته و اندرکنش اثرات پارامترهای مختلف این پروژه‌ها واقعی‌تر می‌شود. استفاده از پویایی سیستم امکان بررسی و شبیه‌سازی اثرات پروژه‌ها و سناریوهای مختلف را درتصمیم‌گیری به سهولت و با بیانی تصویری نشان می‌دهد.

نتایج این تحقیق نشان می دهد که جا به جایی تخصیص آب کشاورزی و فضای سبز از آب تصفیه شده فاضلاب به جای آب چاهها ضروری بوده و در صورتی که این جا به جایی انجام نشود سیستم با کاهش ذخیره آبخوان و ناپایداری آن مواجه خواهد شد. این جا به جایی تخصیص، موجب کاهش قابل ملاحظه بهره‌برداری از آب زیرزمینی شده و کمک بیشتری به تعادل سفره زیرزمینی خواهد کرد.

نتیجه کلی این تحقیق مبین این حقیقت است که به دلیل افزایش جمعیت و افزایش سرانه مصرف، روند فعلی مدیریت آب شهری تهران موجب شکاف عمیق‌تر بین تقاضا و تأمین آب خواهد شد و به این دلیل هیچ یک از راهکارهای مدیریتی به تنهایی قادر به حل جامع تأمین آب تهران نمی‌باشند، بلکه برای حصول به یک راه حل قابل قبول باید مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی اعمال گردند.

لازم به ذکر است که با توجه به تعدد معیارهای مؤثر در مدیریت آب شهری به خصوص در مورد کلان‌شهرها، لحاظ کردن موارد زیر در یک مطالعه جامع، لازم بوده و برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود:

اعمال سایر روشهای مدیریت تقاضا و مدیریت تأمین در مدل و بررسی اثر آنها؛

وارد کردن برنامه بهره‌برداری مخازن آب سطحی به عنوان متغیر تصمیم؛

وارد کردن محدودیتهای مالی، جمعیتی و فنی در مدل؛

وارد کردن خصوصیات تصادفی داده‌های هیدرولوژیکی در مدل؛

تدقیق پارامترهای محیطی مانند ضرایب تغذیه سفره و ...؛

تدقیق زمان‌بندی اجرا و بهره برداری پروژه فاضلاب تهران؛

مشارکت ذی‌نفعان به خصوص مدیران در ساخت مدل و تدقیق روابط آن.

## ۸- تقدیر و تشکر

از شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس به خاطر ارائه اطلاعات لازم تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## ۹- مراجع


1- Shiklomanov, I.A. (2000). "Appraisal and assessment of world water resources." *J. Water International*, 25(1), 11- 32.
2- Gleick, P. H. (2000). "The changing water paradigm a look at twenty-first century water resources development international." *J. Water International*, 25(1), 127-138.
3- WWF. (2003). *World water forum*, 3rd Ed., Final Report, Kyoto, Japan, 16-23.
4- Gleick, P.H., ed. (1993). *Water in crisis*, Oxford University Press, New York.
5- L'vovich, M. (1979). *World water resources and their future*, English translation, by R.L., Nace, American Geophysical Union (AGU), Chelsea, Michigan.
6- Forrester, J.W. (1973). *World dynamics*, 2nd Ed., Wright Allen Press, Cambridge, Massachusetts.
7- Meadows, D.H., Meadows, D.L. Randers, J., and Behrens III, W.W. (1972). *Limits to growth*, Universe Books Publishers.
8- Meadows, D.H., et al. (1992). *Beyond the limits*, McCelelland and Stewart Inc., Toronto, Canada.
9- Forrester, J.W. (1999). *Urban dynamics*, 2nd Ed., Pegasus Communication Inc., Waltham.
10- Rotmans, I., and Devries, B. (1997). *Perspectives on global change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
11-Simonovic, S.P.(2001). "World Water: A tool for global modeling of water resources." *J. Canadian Civil Engineer*, 18(3), 6-12.
12- Simonovic, S.P.(2003). "CanadaWater: A tool for modeling Canadian water resources." *Presentation at the Canadian Commission for UNESCO (CCU) Annual General Meeting*, March 1-3, Ottawa.
13- Simonovic, S. P., Fahmy, H., and Elshorbagy, A. (1997). "The use of object oriented modeling for water resources planning in Egypt. " *J. Water Resources Management*, 11, 243-261.
14- Simonovic, S. P., and Ahmad, S. (2000). "System dynamics modeling of reservoir operation for flood management." *J. Computing in Civil Engineering*, 14( 3), 190-198.
15- Guo, H.C., Liu, L., Huang, G.H., Fuller, G.A., Zou, R., and Yin, Y.Y. (2001). "A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the lake Erahi Basin." *J. Environmental Management*, 61, 93-111.
16- Stave, K.A. (2003). "A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada." *J. Environmental Management*, 67, 303-313.
17- Ruth, M., and Pieper, F. (1994). "Modeling spatial dynamics of sea level rise in a coastal area." *System Dynamics Review* ,10 (4), 375-389.
18- Cassell, E.A., Clausen, J.C. (1993). "Dynamic simulation modeling for evaluating water quality response to agricultural BMP implementation." *J. Water Science and Technology*, 28, 635-648.
19- Sudhir, V., Srivivasan, G., Muraleedharan, V.R. (1997). "Planning for sustainable solid water management in urban India." *System Dynamics Review,* 13(3), 223-246.
20- Mashayekhi, A.N. (1993). "Transition in the New York state solid waste system: A dynamic analysis." *System Dynamic Review,* 9 (1), 23-47.
21- Ford, A. (1999). *Modeling the environment, an introduction to system dynamics modeling of environmental systems,* Island Press, Washington, D.C.
22- Wolfenden, J.A.J. (1999). "A transdiciplinary approached to integrated resources management: a pragmatic application of ecological economics." PhD dissertation, Center for Water Policy Research, University of New England, Australia.
23- Huerta, J.M., Serra, M., Sandoval, R. (2001). *ProEstado-MAUA, A system dynamics approach for the design of sustaianble water use strategy in the Middle Lerma-Chapala Basin. In the lerma –Chapal*a *watershed, evaluation and management*, 201. Edited by A. M. Hansen and M. V. Afferden. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic/ Plenum Publishers.
24- Ho, C. C., (2005). "The application of system dynamics modeling to study impact of water resources planning and management in Taiwan." *Proc., 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, July 17-21, Boston.
25- Ewers, M. (2005). "Combining hydrology and economics in a system dynamics approach: modeling water resources for the San Juan Basin." *Proc., 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, July 17-21, Boston.
26- Sahlke, G., and Jacobson, J. (2005). "System dynamics modeling of transboundary system: the Bear River basin model." *J. Ground Water*, 43(5), 722-730.

**۲۷- مجتهدزاده، م.م. (۱۳۷۱). "یک مدل دینامیک برای برنامه ریزی توسعه مناطق کم آب." م. *برنامه و توسعه*، مؤسسه عالی پژوهش در برنامه ریزی و توسعه، ۲ (٤).**

**۲۸- صادقی، ن.، ابریشم‌چی، ا.، و تجریشی، م. (۱۳۸۳). "مدل‌سازی بهره برداری از مخزن به منظور کنترل سیلاب با استفاده از روش تحلیل دینامیک سیستم." *اولین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۲-۲۳ اردیبهشت.**

**۲۹- جلالی،م.ر.، و افشار، ع. (۱۳۸۳). "شبیه‌سازی پویایی سیستم تولید انرژی مخازن برقابی." *اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران*، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۲٦-۲۷ آبان.**

30- Yeh, W.W.G. (1985). "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review." *J. Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.
31-Jalali, M., Afshar, A., and Mokhtare, A. (2005), "System dynamics modeling approach for gated and ungated flood routing in a cascade multi-reservoir system." *International Journal of Civil Engineering*, 2(4), 213-222.
32-Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking for a complex world*, Irwin/McGraw-Hill.
**۳۳- شرکت آب و فاضلاب تهران (۱۳۸۰). *گزارش روابط عمومی و روابط بین الملل*، تهران.**
**۳٤- شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس (۱۳۸٤). *مطالعات بهینه‌بهره‌برداری کمی،کیفی و آلودگی از منابع آب‌زیرزمینی دشتهای تهران- شهریار*، کارفرما: معاونت پژوهشی شرکت آب منطقه‌ای تهران.**
**۳۵- شرکت مهندسین مشاور جاماب (۱۳۸۰). *مطالعات طرح جامع ساماندهی و توسعه منابع آب جنوب تهران، جلد دوم: مطالعات منابع آبهای زیرزمینی*، معاونت مطالعات و پژوهش شرکت آب منطقه‌ای تهران.**
**۳٦- علوی، ع.ا. (۱۳۷۱). "روند افزایش مصرف آب تهران و لزوم اعمال روشهای صرفه جویی." *کنفرانس صرفه جویی در مصارف کشاورزی، شرب و صنعت*، وزارت نیرو، تهران ۱-۳۱.**
**۳۷- رستم‌آبادی سفلی، ا. (۱۳۷۹)."برآورد معادله مصرف آب در فصول تابستان و زمستان در شهر تهران." م. *برنامه و بودجه*، ۵۵، ۷۷-۱۰٦.**
**۳۸- مالکی، ا. (۱۳۷۱). "احداث شبکه لوله کشی آب تهران و مشکلات ناشی از آن." *اولین سمینار بررسی مسائل آب و فاضلاب در شهرهای بزرگ*، ۱-۳۱.**
**۳۹- روابط عمومی شرکت آب و فاضلاب استان تهران (۱۳۷۵). *سیمای آب و فاضلاب استان تهران*.**
**٤۰- تجریشی، م.، و ابریشم چی، ا. (۱۳۸۳). "مدیریت تقاضای منابع آب در کشور." *کنفرانس روشهای پیشگیری از اتلاف منابع ملی*، فرهنگستان علوم ایران، ۱۹-۲۱ خرداد.**
**٤۱- باقری، ع.، ابریشم‌چی، ا.، و تجریشی، م. (۱۳۸۳). "کلان شهر تهران از منظر پایداری آب شهری." *اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف*، ۲۲-۲۳ اردیبهشت.**
42- *Vensim PLE software version 3.0.* (1998). Ventana Systems, Inc., Massachusetts.
**٤۳- ضرغامی، م. (۱۳۸۰). "استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره در مدیریت تأمین و تقاضای آب." *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، مؤسسه عالی پژوهش در برنامه‌ریزی و توسعه تهران.**
44- Zarghaami, M., Abrishamchi, A., and Ardakanian, R. (2005), "Multi-Criteria decision making for integrated urban water management. " *7th, IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu,* Brazil, 73-82.