



تحلیل دینامیک تقاضای آب در شهر قم

نسیم نهاوندی^۱، علی احمدیان^۲

nasim_nahavandi@yahoo.com

aliahmadian77@yahoo.com

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، عرضه آب و تقاضای آب در این مدل با استفاده از نرم‌افزار ونسیم بررسی شده 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.

واژه‌های کلیدی: کمبود آب، مدیریت تقاضای آب، پویایی سیستم‌ها، نرم افزار ونسیم

۱- مقدمه

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. [۱]

ذخایر آب از منابع تجدیدشونده محسوب شده و فرایند تجدید پذیری 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،

^۱ - دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها دانشگاه تربیت مدرس

^۲ - دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس



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. [۲]

از مجموع کل آب‌های جهان ۹۷/۴ درصد آن را آب‌شور دریاها و اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهد که به دلیل شوری در عمل قابل‌استفاده نیستند. ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب‌های سطح زمین را تشکیل می‌دهد که بخش بیشتر آن به‌صورت یخ در قطب‌های کره زمین و یخچال‌های طبیعی و آب‌های زیرزمینی وجود دارد. به‌این‌ترتیب، از مجموع کل آب‌های کره زمین تنها ۰/۰۱۴ درصد آن قابل‌استفاده بوده و درواقع حیات آدمی وابسته به همین مقدار ناچیز است. [۲]

افزون بر ثابت بودن منابع آبی، بحران فزاینده آب را می‌توان ناشی از عواملی چون رشد فزاینده جمعیت، توزیع نامتوازن منابع سطحی و زیرزمینی، افزایش آلودگی‌ها آب‌ها، فرهنگ نادرست استفاده از منابع موجود، کمبود و نارسایی قوانین بین‌المللی در بهره‌برداری از آب‌های مشترک سطحی و زیرزمینی، بالا رفتن سطح زندگی، رفاه و بهداشت و تغییر الگوی مصرف انسان صنعتی و نبود سازوکار اقتصادی تخصیص منابع آب دانست [۳]. از طرفی غیرقابل‌جانشین بودن آب بحران کمبود آن را بارزتر کرده است.

کشور ایران نیز، از گذشته‌های دور با کمبود آب و عدم توازن توزیع مکانی و زمانی آن مواجه بوده است. به‌رغم اینکه بیش از یک درصد جمعیت جهان به ایران تعلق دارد، سهم کشور ما از منابع آب شیرین کم‌تر از نیم درصد (۰/۳۷ درصد) است. [۳]

بنابراین به نظر می‌رسد تلاش انسان برای استفاده بهینه از این نعمت خدادادی ضروری باشد و این کار باید در صدر اولویات‌های کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان ازجمله 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 مسئله مدیریت تقاضای آب را از اهمیت خاصی برخوردار می‌کند. [۲]

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.

روش تحلیل پویایی سیستم که یک روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد و اتفاقات شیء‌گراست ازجمله این روش‌هاست. هنر مدل‌سازی مبتنی بر پویایی سامانه کشف و نمایش فرایندهای بازخوردی است که همراه با ساختارهای انباشت و جریان، تأخیرهای زمانی و ساختارهای غیرخطی دینامیک سامانه را تعیین می‌کند. [۴]

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.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در این روش وضعیت فعلی سامانه با توجه به روندها و رفتارهای گذشته مدل می‌شود تا درک بهتری از رفتار واقعی سامانه حاصل شود. در این نوع از مدل‌ها معمولاً برای سامانه هدفی تعیین می‌شود و سایر متغیرها برای رسیدن به آن هدف تغییرمی‌کنند. این مدل‌ها را اصطلاح مدل‌های هدف محور می‌نامند. این فن از نظر محتوایی جزء مدل‌های علی است. روابط علی و معلولی میان پدیده‌ها را بیان می‌کند که این روابط می‌تواند مثبت یا منفی باشد. اگر علت در یک‌جهت حرکت کند و معلول در همان جهت حرکت کند در این صورت رابطه علت و معلولی مثبت است در غیر این صورت منفی است. به مدل‌های علی که به تشریح این روابط می‌پردازند مدل‌های مفهومی می‌گویند. از این فن برای درک رفتارهای پیچیده استفاده می‌شود.



پویایی سامانه بر پایه‌ی تئوری دینامیک غیرخطی و کنترل بازخوردی و همان‌طور که گفته شد در ریاضیات، فیزیک و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد البته با توجه به اینکه پویایی سامانه ابزاری قوی است، برای مدل کردن رفتارهای انسان و جوامع نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پویایی سامانه در علوم جامعه‌شناسی، اقتصاد و سایر علوم اجتماعی کاربرد دارد. [۴]

با توجه به اینکه در پویایی سامانه باید مسائل و مشکلات جهان واقعی را مدل کنیم لذا می‌بایست مهارت‌های لازم جهت تفکر دستگاہی را کسب کرده و نحوه رفتار سامانه‌های پیچیده و استفاده از این فن را بدانیم. برای درک مناسب از رفتار سیستم موارد زیر مهم است:

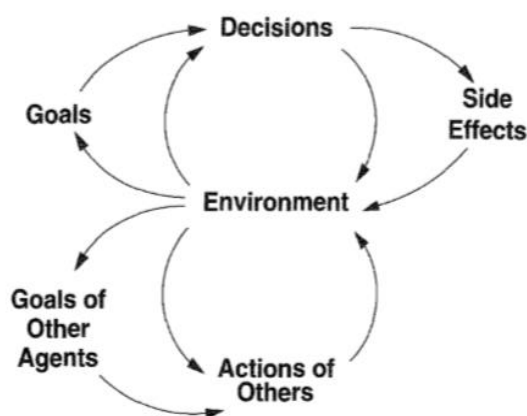
(۱) ابزارهایی مناسب جهت ارائه مدل ذهنی از مسائل پیچیده

(۲) ابزارهای شبیه‌سازی جهت آزمون مدل‌های ذهنی

به‌طور کلی نتایج اعمال ما موقعیت‌هایی را که ما در آینده با آن مواجه هستیم را تعیین می‌کند، موقعیت جهت ارزیابی ما از مسئله و تصمیماتی را که در آینده خواهیم گرفت را تغییر می‌دهد. [۴]

۲-۱- دیدگاه بازخوردی

در عالم واقعیت عملکرد ما منجر به بازخوردهایی می‌شود که وضعیت را نسبت به گذشته تغییر می‌دهد به این ترتیب عکس‌العمل متضاد سامانه به سیاست‌های اتخاذ شده افزایش خواهد یافت چراکه تمام محدوده بازخوردهای ممکن را در سامانه در نظر نمی‌گیریم. معمولاً اثراتی را در نظر می‌گیریم و از اثرات غیرقابل پیش‌بینی صرف‌نظر می‌کنیم به همین دلیل برای اجتناب از عکس‌العمل متضاد سیستم به سیاست‌ها بایستی مرز مدل ذهنی خود را گسترش داد و بازخوردهای ممکن را در نظر گرفت (شکل ۱). [۴]



شکل ۱- دیدگاه بازخوردی (Sternman, 2000)

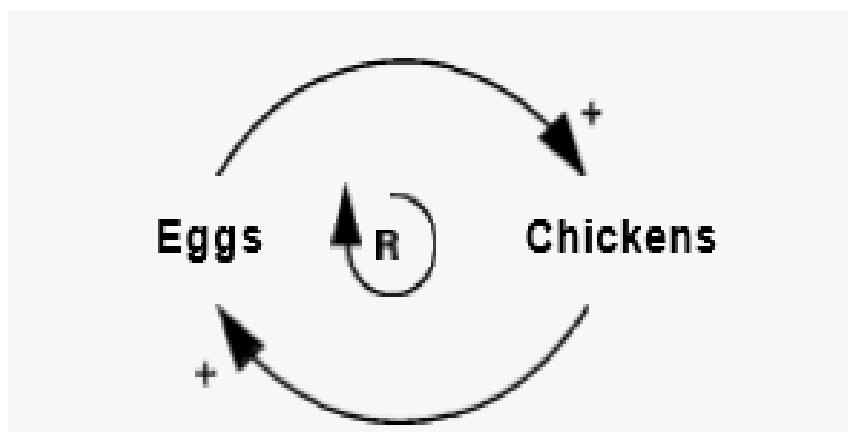
۲-۲- بازخورد

در عالم واقعیت عملکرد ما منجر به بازخوردهایی می‌شود که وضعیت را نسبت به گذشته تغییر می‌دهد به این ترتیب عکس‌العمل متضاد سامانه به سیاست‌های اتخاذ شده افزایش خواهد یافت چراکه تمام محدوده بازخوردهای ممکن را در سامانه در نظر نمی‌گیریم. معمولاً اثراتی را در نظر می‌گیریم و از اثرات غیرقابل پیش‌بینی صرف‌نظر می‌کنیم به همین دلیل برای

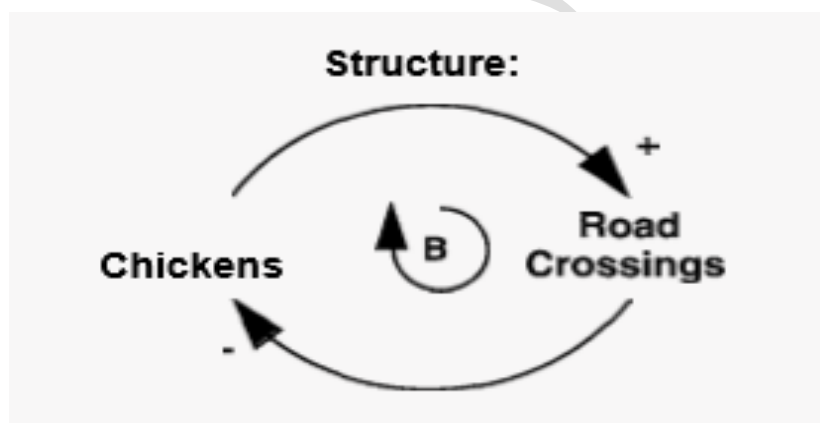


اجتناب از عکس‌العمل متضاد سیستم به سیاست‌ها بایستی مرز مدل ذهنی خود را گسترش داد و بازخوردهای ممکن را در نظر گرفت. [۴]

بازخوردها دو نوع هستند، مثبت (تقویت‌کننده، شکل ۲) و نوع منفی (متعادل‌کننده، شکل ۳)

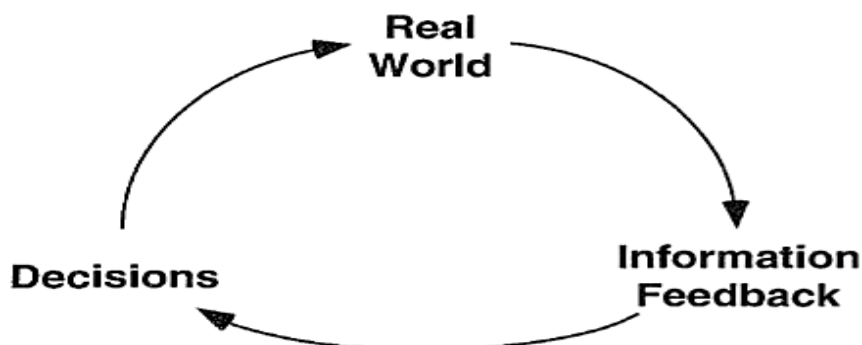


شکل ۲- بازخورد مثبت [۴]



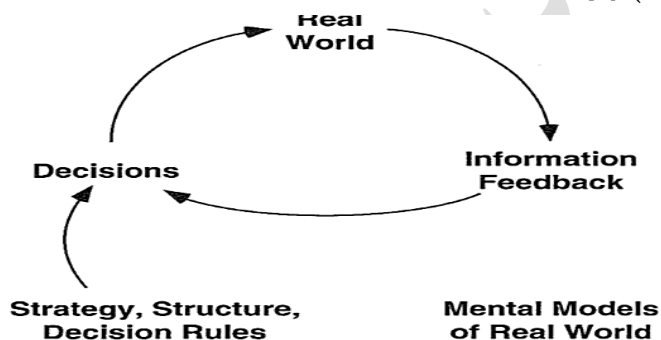
شکل ۳- بازخورد منفی [۴]

یادگیری یک فرایند بازخوردی است که در آن با استفاده از اطلاعات گرفته‌شده از جهان واقعی و مقایسه آن باهدف تصمیم اتخاذشده منجر به ایجاد تغییر در وضعیت فعلی می‌شود. (شکل ۴) [۴]

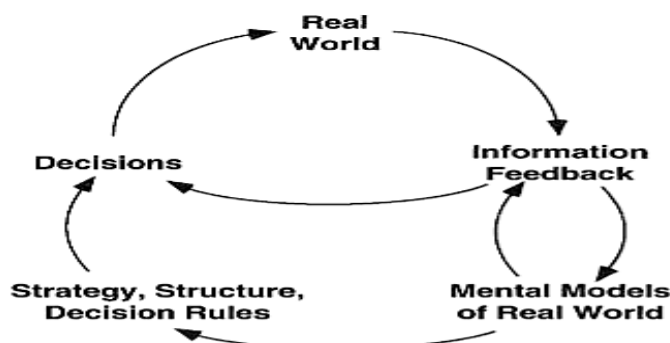


شکل ۴- یادگیری به عنوان یک فرایند بازخوردی [۴]

مدل ذهنی همان برداشت‌های شخص از مجموعه شبکه علل و تأثیرات آن‌ها هست که مشخص می‌کند سیستم چگونه عمل می‌کند (شکل ۵). مدل ذهنی شخص به‌مرور زمان با گرفتن بازخورد از اطلاعات دنیای واقعی خود را تعدیل می‌کند به این ترتیب مکانیسم تصمیم‌گیری از دو حلقه تشکیل شده است که یکی به صورت کوتاه‌مدت و دیگری به صورت بلندمدت سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۶). [۴]



شکل ۵- دیدگاه بازخوردی [۴]



شکل ۶- حلقه تصمیم بازخوردی اصلاح شده [۴]



در حلقه‌های دوگانه بازخوردی یادگیری موانعی رخ می‌دهد که فرایند یادگیری را مختل می‌کند ازجمله این موانع پیچیدگی در رفتار سیستم، عدم وجود اطلاعات کافی از دنیای واقعی، وجود برخی از متغیرهای مهم در مسئله، توان علمی ضعیف در تحلیل مسئله و اجرای نامناسب تصمیمات است. [۴]

۲-۳- فرایند مدل‌سازی

مدل‌سازی جزئی از فرایند یادگیری است که به صورت پیوسته در حال فرموله نمودن فرضیات، آزمون و اصلاح مدل‌های ذهنی و ساخت یافته هست. در مدل‌سازی قدم اول شناخت دقیق صورت مسئله و مشتری مدل است. قدم‌های بعدی مسئله معمولاً حالت نظام‌مند ندارد، چراکه مدل‌سازی خلق کردن است و این مسئله حالت فطری و ذاتی دارد. ولی می‌توان فرایند ساخت مدل را به چند مرحله تقسیم کرد:

(۱) تشریح دقیق صورت مسئله

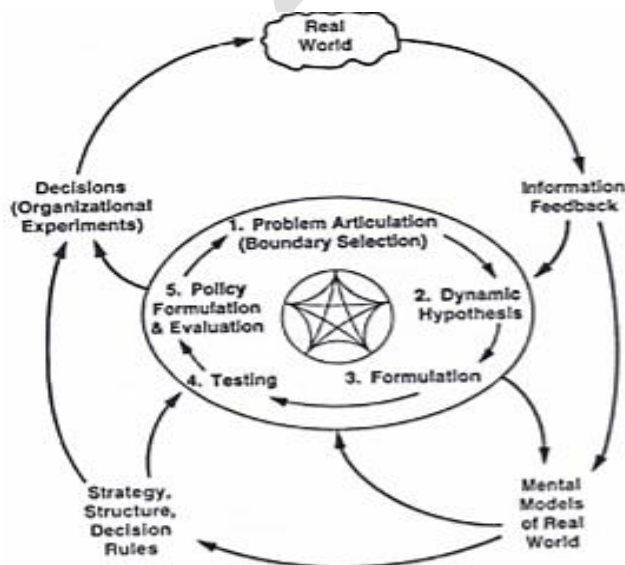
(۲) تعیین تئوری و فرضیه دینامیک درباره علل بروز مسئله فوق

(۳) ساختن یک مدل شبیه‌سازی برای آزمودن فرضیه فوق

(۴) آزمودن مدل برای اطمینان از صحت عملکرد آن

(۵) طراحی سیاست‌های مختلف و ارزیابی آن‌ها توسط مدل

مدل‌سازی یک فرایند بازخوردی بوده و به صورت توالی خطی مرحله‌ای (گام به گام) نیست. مدل‌ها از مراحل تکرار، پرسش مداوم، آزمون و اصلاح می‌گذرند (شکل ۷). [۴]



شکل ۷- مدل قرارگرفته شده در دینامیک تصمیم [۴]



۴-۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به مرور پژوهش‌های انجام‌شده در موضوع عرضه، تقاضا و مصرف آب که از روش پویایی سامانه‌ها صورت گرفته پرداخته شده است.

مدل هدف روترمز و دوریه (۱۹۹۷) در موسسه ملی بهداشت عمومی و زیست‌محیطی هلند توسعه داده شده است. این مدل از چندین قسمت تشکیل شده است که عبارت است از جمعیت، بهداشت، انرژی، زمین، غذا، آب و گردش عناصر بیولوژیکی. بخش آب آن دارای توابعی مربوط به مسائل انسانی شامل تأمین آب برای مصارف شهری، کشاورزی، صنعتی، نیروی برق و حفاظت از سواحل هست. توابع محیطی شامل تأمین آب برای اکوسیستم خشکی و حفظ کیفیت اکوسیستم آبی است؛ و بخشی نیز شامل تأثیر تنش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی بر سیستم آب است. ساختار عملکرد این مدل عمدتاً مبتنی بر تغییرات اقلیم است. [۵]

سیمونویچ (۲۰۰۲) مدل جهانی آب را تهیه کرده و ایشان از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ هرسال ویرایش جدیدی از آن ارائه کرده است. این مدل بیلان (Balance) آب را در مقیاس جهانی در پنج بخش صنعت، جمعیت، کشاورزی، منابع تجدید پذیر و آلودگی مداوم تحلیل می‌کند. شبیه‌سازی دینامیکی به‌وسیله مدل جهانی آب نشان می‌دهد که بین منابع آب جهانی و رشد صنعتی در آینده جهان ارتباط قوی وجود دارد. او همچنین نشان داد که آلودگی آب‌ها مهم‌ترین مسئله در آینده در سطح جهانی است. [۶]

زو و همکاران (۲۰۰۲) به منظور ارزیابی پایداری سیستم منابع آب مدل پویایی سیستم شی گرا را در حوضه رودخانه زرد در چین توسعه دادند که به نام مدل دینامیک سیستم منابع آب (WRSD) نامیده می‌شود. این مدل برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب در منطقه مورد مطالعه و شناسایی ویژگی‌های پویای عناصر اصلی که بر روی عرضه و تقاضای آب اثر می‌گذارند توسعه داده شده است. منابع موجود و بالقوه از آب‌های سطحی، آبخوان‌ها و پساب‌های تصفیه‌شده تخمین زده شده است و تقاضای بالقوه آب برای مصرف خانگی، صنعتی و کشاورزی پیش‌بینی شده است. سپس با تغییر متغیرها و پارامترها، سناریوهای مختلف عرضه و تقاضای آب مورد بررسی قرار گرفته و شاخص پایداری سیستم تأمین آب برای مناطق مختلف منطقه در طول دوره‌های مختلف تخمین زده شده است. [۷]

استیو (۲۰۰۳) برای تصمیم‌گیری مشارکتی در حل کمبود آب در شهر لاس‌وگاس ایالت نوادای آمریکا مدلی مبتنی بر پویایی سامانه‌ها ارائه کرده است. در این مدل روش‌های مختلف مدیریت تقاضای آب از دید مردم و سهامداران بررسی شده و نتایج و اثرات آن بر میزان اختلاف بین عرضه و تقاضا بررسی شده است. هدف از این مدل، افزایش درک عمومی از ارزش حفاظت از آب در لاس‌وگاس بود. [۸]

هابرون و همکاران (۲۰۰۴) به بیان یک رویکرد سیستمیک برای عملیاتی کردن حوضه‌های آبریز اشاره کردند. این تحقیق با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، یک چهارچوب مفهومی سیستمیک را که بتواند ارتباط بین بخش‌های و فرایندهای محیطی را در برنامه‌ریزی مدیریت حوضه آبریز ارائه کند تدوین شده است. [۹]

یانگ و همکاران (۲۰۰۸) مدل سیستم دینامیک را برای مدیریت به‌هم‌پیوسته و علمی منابع آب را در شهر (Tianjin) ارائه کردند که شامل اطلاعات بازخوردی است که بر رفتار سیستم حکمرانی می‌کند و قادر است سطوح جزء را ترکیب کند و رفتار سیستم را به‌صورت یکپارچه شبیه‌سازی کند، بنابراین ارائه نتایج منطقی پیش‌بینی‌شده برای سیاست‌گذاری در مورد تخصیص و مدیریت منابع آب به همراه دارد. [۱۰]



مدنی و مارینو (۲۰۰۹) یک مدل پویایی سامانه در حوضه آبریز زاینده‌رود تعریف کردند. در حوضه‌های رودخانه، زیر سیستم‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و فیزیکی مختلف در تعامل هستند. مدل شبیه‌سازی که بر اساس نمودارهای حلقوی عاملی از مسئله ساخته شده است، نشان می‌دهد که انتقال آب از زیر حوضه‌های دیگر بهترین راه حل نیست. نتایج مدل برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که گزینه‌های گوناگون مدیریت تقاضا و کنترل جمعیت زمانی که با انتقال آب از حوضه‌های دیگر، افزایش ظرفیت ذخیره آب و کنترل خروج آب‌های زیرزمینی ترکیب شود می‌تواند در حل بحران آب حوضه تأثیر بیشتری داشته باشد. [۱۱]

احمد و پراشار (۲۰۱۰) برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت منابع آب از ابزار پویایی سیستم‌ها استفاده کردند. این تحقیق به شبیه‌سازی پویا در جنوب فلوریدا اشاره دارد. این مدل ارتباطات درونی بین دسترسی به آب و رقابت افزایش تقاضای آب در بخش‌های مصرفی شهری، کشاورزی و محیط‌زیست را بیان کرده است. [۱۲]

ضرغامی و اکبری (۲۰۱۲) 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 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. [۱۳]

قیصر و همکاران (۲۰۱۳) مدل تعادل آبی پویا برای بررسی تأثیرات مختلف سیاست‌های حفاظت آب و مصرف آب بازیافتی بر عرضه و تقاضای آب در یک منطقه دره لاس‌وگاس که با کمبود آب و رشد جمعیت قابل توجه مواجه بود ایجاد کردند. سیاست‌های حفاظتی مختلفی که بر مصرف آب داخلی و فضای باز تمرکز می‌کنند، همراه با سناریوهای مختلف رشد جمعیت، و تأثیر آن‌ها بر عرضه و تقاضای آب مدل شده است. مهم‌ترین نقش این مطالعه، برجسته کردن اهمیت حفظ آب در فضای باز و اثربخشی کاهش نرخ رشد جمعیت در مواجهه با کمبود آب در آینده است. [۱۴]

وی و همکاران (۲۰۱۶) مدل پویایی سامانه مدیریت آب شهری برای شبیه‌سازی تعاملات تقاضای آب شهری، جامعه، اقتصاد، آب‌وهوا و اقدامات حفاظت از آب را پیشنهاد دادند. تمایلات حفاظت از آب در این مدل در نظر گرفته شد و اثر آن بر ذخیره آب اندازه‌گیری شد. نتایج مدل‌سازی شهر (Macau) نشان می‌دهد که جمعیت اصلی‌ترین نیرو محرکه تقاضای آب است. تغییرات دما و بارندگی اثر واضحی بر چشم‌انداز تقاضای آب داشتند. خروجی تقاضای آب به تغییر جمعیت، تغییر سرانه آب و تغییر درجه حرارت حساس بود. افزایش بارش باعث کاهش تقاضای آب و افزایش رشد اقتصادی باعث افزایش تقاضای آب می‌شد. این مدل نشان می‌دهد با اجرای یک برنامه یکپارچه حفاظت از آب و افزایش اشتیاق حفاظت از آب تقاضای آب می‌تواند تا ۱۷,۵ درصد کاهش پیدا کند. [۱۵]

۳- روش شناسی تحقیق

روش انجام تحقیق موضوع این تحقیق از نظر بعد زمانی، یک پژوهش تجربی است چرا که در این مطالعه تلاش شده است تا با استفاده از اطلاعات وضع موجود، مدلی برای پیش‌بینی تحلیل و بررسی میزان عرضه، تقاضا و مصرف آب و عوامل موثر بر آن در محدوده جغرافیایی مشخص معرفی شود.



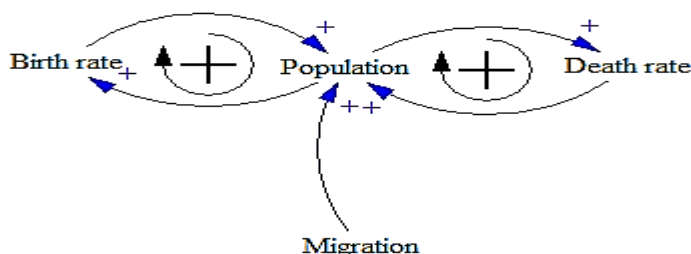
از نظر هدف یک پژوهش تطبیقی است به دلیل اینکه نتایج مدل شبیه سازی شده با داده‌های تجربی از طریق حداکثر میزان خطا به دست آمده مقایسه و تطبیق خواهد شد.

۴- مدل سازی

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

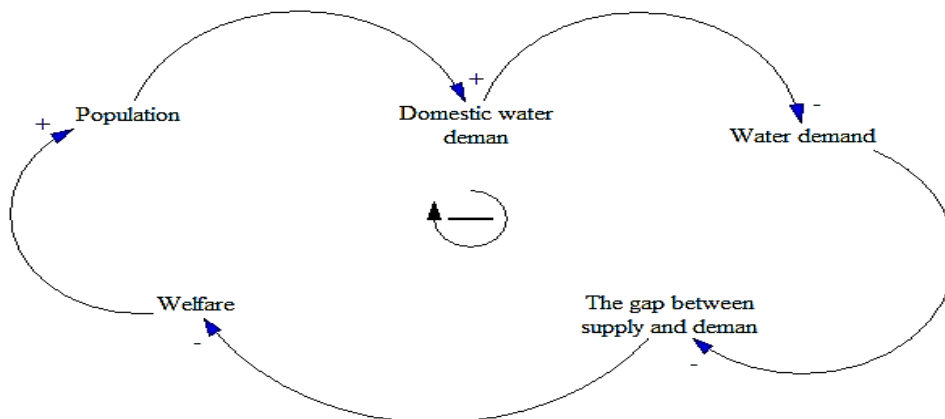
۴-۱- جمعیت

بر طبق مطالعات پیشین جمعیت یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین نیروهای است که بر روی تقاضای آب شهری تأثیر می‌گذارد. جمعیت از طریق فرایندهای تولد، مرگ و میر مهاجرت تغییر می‌کند که بر روی این فرایندها مسائل مختلف سیاسی، اقتصادی و اجتماعی اثرگذار است. این فرایند در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸- نمودار علت و معلولی جمعیت

در این مطالعه کمبود یا مازاد بین عرضه و تقاضای آب بر روی افزایش یا کاهش جمعیت منطقه مورد مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. افزایش فاصله بین تقاضا و عرضه‌ی آب منجر به کاهش سطح رفاه در مناطق شهری می‌شود که سبب می‌شود بر روی متغیر جمعیت اثر منفی بگذارد. این موضوع به صورت مفهومی در شکل ۹ قابل مشاهده است.

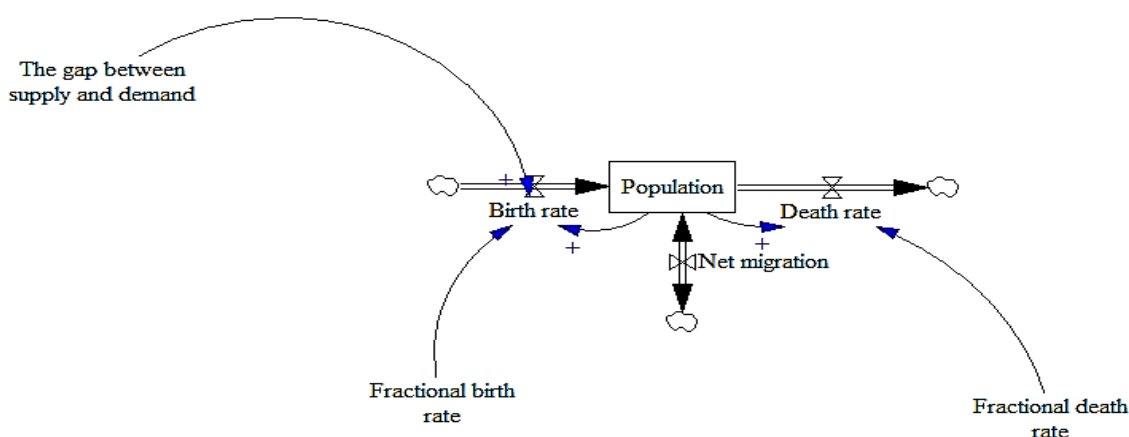


شکل ۹- حلقه بازخوردی تأثیر فاصله عرضه و تقاضا بر جمعیت



همان‌طور که در شکل مشخص است افزایش جمعیت تقاضای آب خانگی را افزایش می‌دهد افزایش تقاضای آب خانگی سطح کلی تقاضای آب را افزایش می‌دهد با زیاد شدن سطح کلی تقاضای آب فاصله بین عرضه و تقاضا کم می‌شود و با کمبود عرضه آب یا افزایش تقاضا به گونه‌ای که باعث کاهش در عرضه آب شود سطح رفاه در منطقه کاهش می‌دهد، این امر جمعیت را در مناطق شهری دستخوش تغییرات کاهشی می‌کند. با ترکیب کردن رو حلقه بالا به زیر مدل شکل ۱۰ می‌رسیم.

در پویایی‌شناسی سامانه‌ها به منظور انجام شبیه‌سازی استفاده از این نوع نمودارها ضروری است به گونه‌ای که حتی اگر در یک بخش از مدل حلقه‌ای تشکیل شود که فاقد متغیرهای حالت و جریان باشد عمل شبیه‌سازی صورت نمی‌پذیرد از همین روی بعد از نشان دادن نمودارهای علت و معلولی این نمودارها نیز نشان داده می‌شوند.

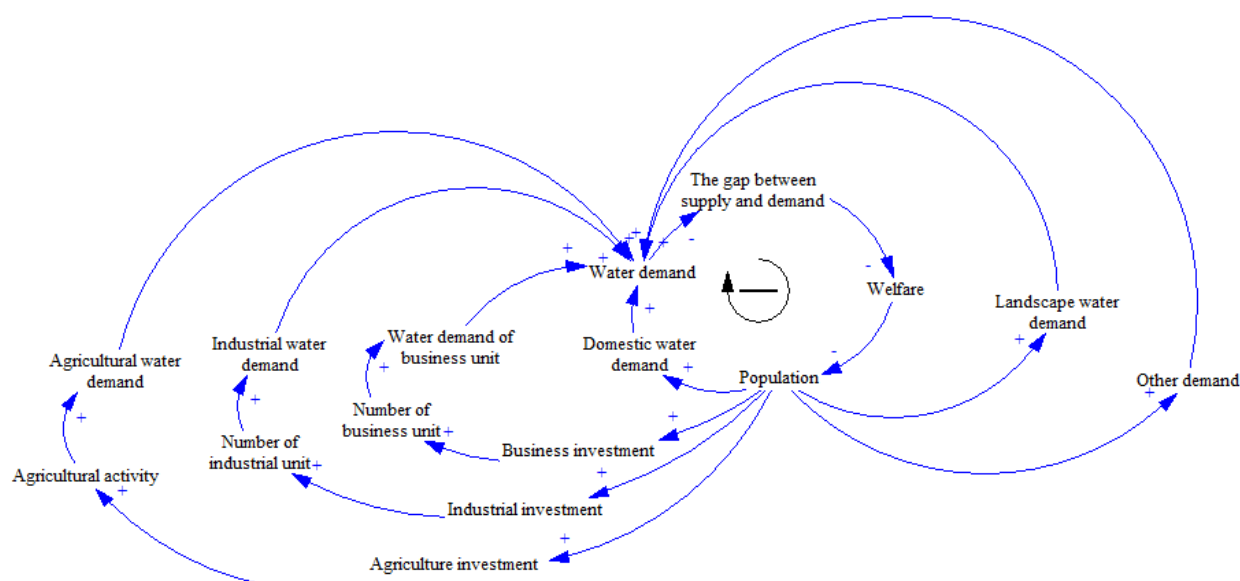


شکل ۱۰- نمودار حالت و جریان جمعیت

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است اثر متغیر فاصله بین عرضه و تقاضا بر روی نرخ زاد ولد لحاظ شده است. این اثر یک اثر افزایشی است به این دلیل که اختلاف عرضه و تقاضا اگر منفی باشد رفاه را کاهش می‌دهد اگر مثبت باشد افزایش می‌توان این اثر را بر روی نرخ مهاجرت یا نرخ مرگ‌ومیر نیز لحاظ کرد که در هر صورت جواب نهایی یکسان خواهد بود. در این نمودار همان‌طور که مشخص شده است جمعیت، متغیر حالت حلقه و نرخ زاد و ولد و نرخ مرگ‌ومیر متغیرهای نرخ هستند و جمعیت فقط و فقط از طریق متغیرهای نرخ دچار تغییر می‌شود.

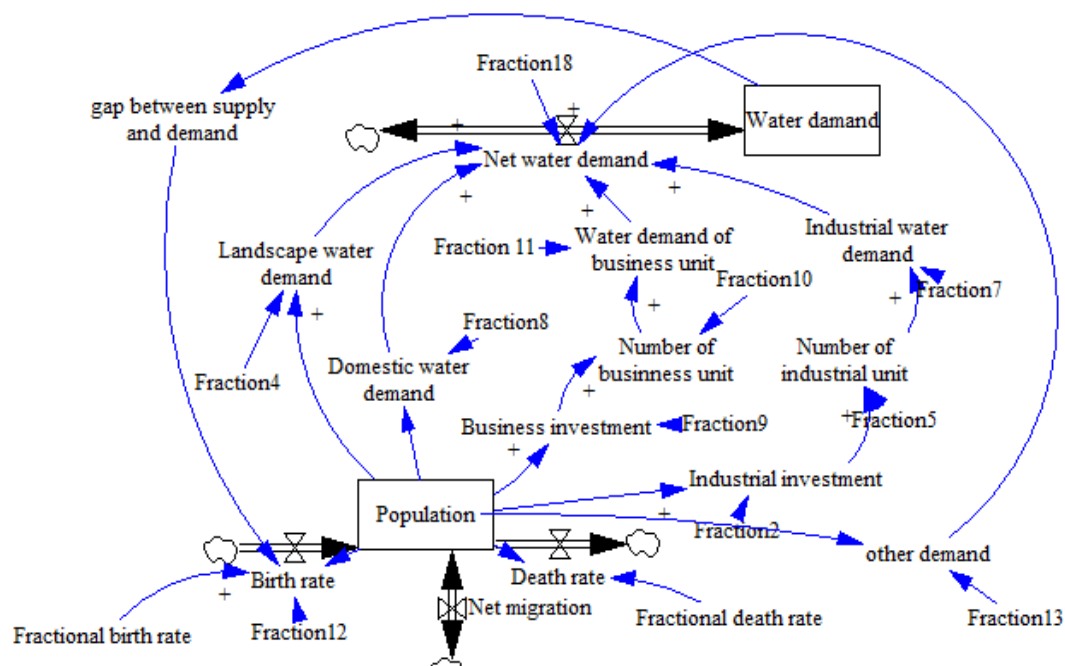
۲-۴- تقاضای آب

در مناطق شهری تقاضای آب شامل مصارف شرب و خانگی، صنعتی و تجاری، فضای سبز و در برخی از موارد کشاورزی است. با افزایش جمعیت همان‌طور که در سطور قبل گفته شد تقاضای آب خانگی یا آب شرب افزایش پیدا می‌کند و همین‌طور به دلیل وجود نیروی کار دولت در بخش‌های صنعتی، تجاری و کشاورزی سرمایه‌گذاری انجام می‌دهد به‌طور طبیعی تقاضای آب در این بخش‌ها افزایش می‌یابد. این روند در شکل ۱۱ به صورت مفهومی نشان داده شده است.



شکل ۱۱- حلقه بازخوردی تقاضا

با توجه به روند ذکر شده در تحقیق در ادامه نمودار حالت و جریان این قسمت از مدل در شکل ۱۲ نشان داده است.



شکل ۱۲- نمودار حالت و جریان تقاضای آب

۵- اعتبارسنجی



در این مرحله به بررسی صحت شبیه‌سازی شده برای تقاضای آب پرداخته می‌شود. اعتبار سنجی به دنبال بررسی سودمند بودن مدل بر اساس صورت مسئله و هدف تحقیق است. برای این منظور آزمون‌هایی برای صحت سنجی مدل انجام شده است. آزمون ارزیابی ساختار و آزمون تکرار رفتار در مورد مدل بررسی شده‌اند.

۵-۱- آزمون ارزیابی ساختار

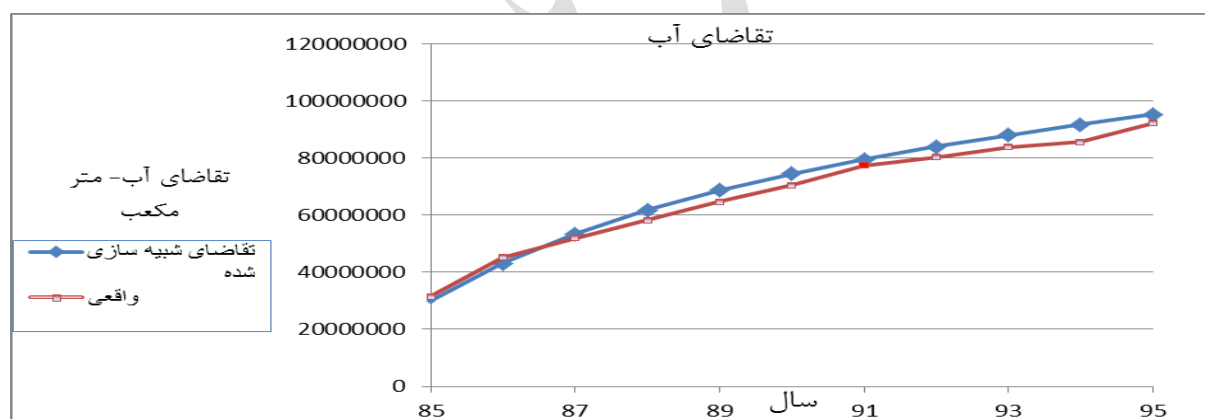
برای انجام این آزمون از مراحل تکوین مدل‌سازی کمک گرفته شده است به این دلیل که این مراحل کمک بسیار زیادی در بررسی صحت و سازگاری مدل می‌کند. علاوه بر این نرم‌افزار ونسیم قابلیت بررسی ساختاری مدل را دارد است و چنانچه مدل درجایی اشکال ساختاری وجود داشته باشد وارد مرحله شبیه‌سازی نمی‌شود.

۵-۲- آزمون تکرار رفتار

در این آزمون داده‌های تخمینی و مشاهده‌ای توسط مدل مقایسه می‌گردند. این بررسی با استفاده از ابزارهای آماری میانگین درصد مطلق خطا به ازای مقادیر مختلف برای تقاضای آب صورت گرفته است. β درصد اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی است که طبق رابطه زیر به دست آمده است. در رابطه زیر $D_{simulation}$ مقدار تقاضای شبیه‌سازی شده و $D_{observed}$ مقدار تقاضای آب مشاهده شده است.

$$\beta = \frac{D_{simulation} - D_{observed}}{D_{observed}} \times 100$$

. مقادیر β به ازای مقادیر مختلف از سال ۸۵ تا ۹۵ برای تقاضای آب در جدول ۴ محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است بر اساس این جدول حداکثر خطا ۷ درصد است که تطابق خوبی با داده‌های واقعی دارد.



شکل ۱۳- اعتبار سنجی تقاضا

همان‌طور که در شکل پیداست مقادیر حقیقی اختلاف کمی با مقادیر واقعی دارند و حداکثر این اختلاف ۷ درصد است.

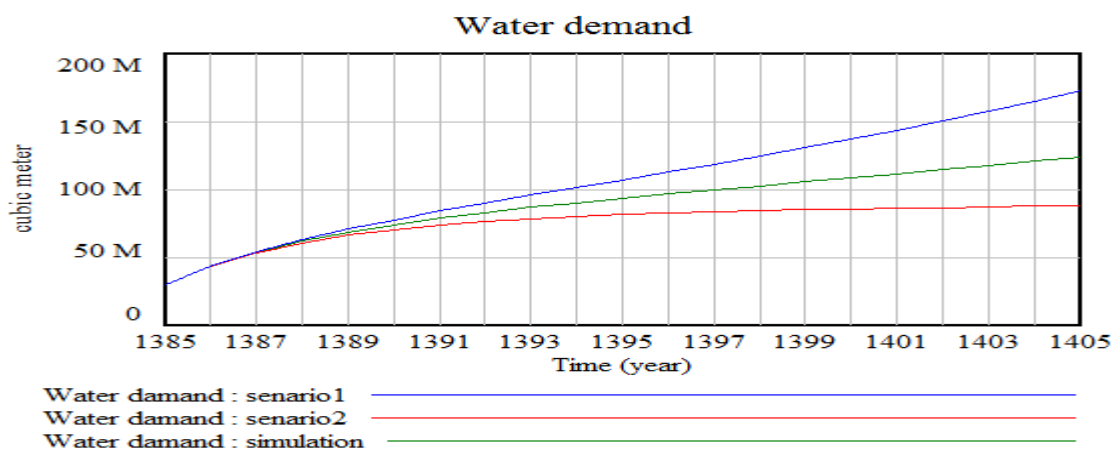
۶- تحلیل مدل

در این فصل با توجه به اینکه شبیه‌سازی صورت گرفته است ابتدا روند هر کدام از متغیرهای اصلی (تقاضای آب، عرضه آب) در افق زمانی ۲۰ ساله بررسی می‌شود (۱۳۸۵ تا ۱۴۰۵). سپس با توجه به روند مذکور و همزمان با آن سناریوسازی صورت می‌گیرد. سناریوسازی به اتخاذ سیاست‌های اثربخش در موضوع مدیریت بحران آب و در کل مدیریت منابع آب کمک زیادی می‌کند.



۶-۱- تقاضای آب

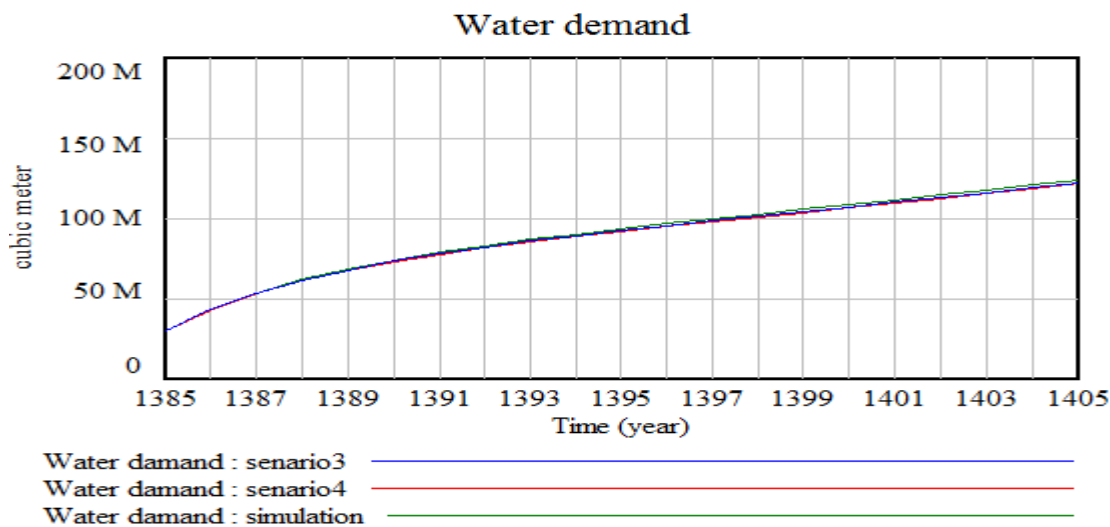
در این بخش ابتدا شکل کلی تقاضای آب تا سال ۱۴۰۵ پیش‌بینی می‌شود سپس سناریوهای جمعیتی. شکل شماره ۱۴ نشان دهنده این پیش‌بینی در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۵ است. همانطور که مشخص شده میزان تقاضا تا سال ۱۴۰۵ در حدود ۱۲۳ میلیون متر مکعب خواهد بود. با توجه به روند مصرف به نظر می‌رسد انجام اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از افزایش این روند و بحران‌های پیش‌رو ناشی از کمبود آب لازم است سناریوهای مختلف در نظر گرفته شود تا در مواقع ضروری مبتنی بر اقتضای شرایط روش‌های مختلف کنترل و مدیریت بحران اعمال شود. یکی از این سیاست‌ها سیاست‌های کنترل جمعیت می‌تواند باشد که در شکل ۱۴ روند هرکدام مشخص شده است. در این شکل نمودار آبی افزایش نرخ زاد و ولد و رسیدن آن به نرخ ۶ درصد، نمودار قرمز کاهش نرخ زاد و ولد و رسیدن آن به مقدار ۲ درصد و نمودار سبز روند فعلی (۴ درصد) در مدل است.



شکل ۱۴- اجرای سیاست‌های جمعیتی بر تقاضای آب

۶-۲- سناریوهای قیمتی آب

یکی دیگر از سیاست‌های کنترل تقاضای آب، سیاست‌های قیمتی است. در این مطالعه تعرفه آب برای کلیه گروه‌های مصرف به صورت میانگین ۲۸۸۵ ریال در نظر گرفته شده است. با تعریف سه سناریو، افزایش ۳۰ درصدی (سناریو ۴)، افزایش ۲۰ درصدی (سناریو ۳) و روند فعلی تقاضای آب را بررسی خواهیم کرد. سپس در شکل ۱۵ تاثیر این سناریوها بر میزان تقاضای آب نشان داده شده است. همانطور که در شکل پیداست تاثیر این سناریوها ناچیز است.



شکل ۱۵- اثر سناریوهای قیمتی بر تقاضای آب

۷- 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 و آب و هوایی تعریف شد و اثرات هر یک از آنها بر عرضه و تقاضای آب مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از منابع آب شرب شهر قم از خارج حوضه آبخیز این استان تأمین می‌شود و سطح ارتفاع آب‌های زیرزمینی استان به طرز نگران‌کننده کاهش یافته با توجه به نتایج مدل به نظر می‌رسد ترکیب سیاست‌های کنترل جمعیت، توسعه شبکه فاضلاب، قیمت و جریان آب انتقالی مؤثرترین راهکارها برای مدیریت عرضه و تقاضای آب هستند. 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.
- 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.



مراجع

- [۱] روح‌پرور، اکرم، پیش‌بینی مصرف آب شهر قم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۰
- [۲] محمد جانی، اسماعیل؛ یزدانیان؛ نازنین. (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن، روند، ۲۱، ۱۴۴-۱۱۷
- [۳] پژوهان، جمشید؛ حسینی، شمس‌الدین، (۱۳۸۲). برآورد تابع تقاضای آب خانگی (مطالعه موردی شهر تهران)، پژوهش‌های اقتصادی ایران، ۱۶، ۶۸-۴۷
- [4] STERMAN, J. D. J. D. 2000. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.**
- [5] ROTMANS, J. & DE VRIES, B. 1997. **Perspectives on global change: The TARGETS approach.** Cambridge University Press.
- [6] SIMONOVIC, S. P. 2002. **World water dynamics: global modeling of water resources.** *Journal of Environmental Management*, 66, 249-267.
- [7] XU, Z., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H. & ZHANG, X. 2002. **Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach.** *Water Resources Management*, 16, 239-261.
- [8] STAVE, K. A. 2003. **A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada.** *Journal of Environmental Management*, 67, 303-313.
- [9] HABRON, G. B., KAPLOWITZ, M. D. & LEVINE, R. L. 2004. **A soft systems approach to watershed management: a road salt case study.** *Environmental Management*, 33, 776-787.
- [10] ZHANG, X., ZHANG, H., CHEN, B., CHEN, G. & ZHAO, X. 2008. **Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city.** *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13, 2328-2336.
- [11] MADANI, K. & MARÍÑO, M. A. 2009. **System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin.** *Water resources management*, 23, 2163-2187.
- [12] AHMAD, S. & PRASHAR, D. 2010. **Evaluating municipal water conservation policies using a dynamic simulation model.** *Water Resources Management*, 24, 3371-3395.
- [13] 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.
- [14] QAISER, K., AHMAD ,S., JOHNSON, W. & BATISTA, J. R. 2013. **Evaluating water conservation and reuse policies using a dynamic water balance model.** *Environmental management*, 51, 449-458.
- [15] 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.



Abstract

Water scarcity is now one of the most critical challenges in most countries around the world, especially in Iran. One of the key ways to control and manage this issue is the investigation of the water demand. Qom city has always been encountered with a 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 be serious dangers in this field. The purpose of this thesis is investigation of water demand dynamics from method of system dynamics in Qom city. Dynamic of various variables such as population, water demand, surface water resources, ground water, water supply in this model has been investigated by 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% resulted in 29% reduction of water demand level in 1405 with comparison of current trend. Base on this result, the policy of population control had the most important effect on water demand. The price effect on water demand is negligible, so that, 20% increase of price led to 2.04% reduction in level of water demand in 1405 with comparison of current trend.

Keywords :

Water scarcity, water demand management, system dynamics, Vensim software