مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره هفتم، شماره بیستم و پنجم، پاییز ۱۳۹۵

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳

صص ۶۳-۴۸

ارزیابی عملکرد بهره‌برداری از سدهای حوضه آبریز ارومیه با رویکرد پویایی سیستم‌ها

قاسم عزیزی*، دانشیار آب‌وهواشناسی - دانشگاه تهران

سارا نظیف، استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تهران

فائزه عباسی، دانشجوی دکتری آب‌وهوا شناسی - دانشگاه تهران

چکیده

در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه، یکپارچه دیدن سیستم و در نظر گرفتن اندرکنش میان اجزای مختلف آن ضروری است. روش پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی براساس این نگرش است که علاوه بر تشریح سیستم‌های پیچیده‌ی منابع آب براساس واقعیت، امکان دخالت کاربر در توسعه مدل را نیز فراهم می‌آورد. تحقیق حاضر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و با تاکید بر روند افت تراز آب دریاچه ارومیه انجام گرفته است. در پژوهش حاضر، تلاش شد تا رفتار تراز آب دریاچه تحت تاثیر طرح‌های سازه‌ای در حوضه بررسی شود. بدین‌منظور مدل مفهومی سیستم منابع آب حوضه با در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر بر معادله بیلان آبی سدها جهت برآورد مقادیر سرریز از سدها و جریان زیست‌محیطی ورودی به دریاچه در محیط مدل Vensim شبیه‌سازی شد. پس از اعتبارسنجی مدل، با طراحی دو سناریو، اثر هر یک از طرح‌های سازه‌ای و هم‌چنین الگوی نیاز آبی تامین شده از هفت زیرحوضه‌ی اصلی بررسی شد. نتایج نشان داد که طرح‌های سازه‌ای در سطح حوضه ۴۲ درصد از جریان ورودی به دریاچه را کاهش داده‌اند که از این میزان حدود ۲۶ ٪ مربوط به بهره‌برداری از هفت سد اصلی است و ۱۶ ٪ در ارتباط با توسعه کشاورزی و افزایش بهره‌برداری از نیاز آبی در حوضه بوده است.

واژگان کلیدی: پویایی سیستم، دریاچه ارومیه، طرح‌های سازه‌ای، مدل Vensim، نیاز آبی.

نویسنده‌ی مسئول:

* Email: ghazizi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر به‌ویژه در سال‌های پایانی قرن بیستم، آب به‌عنوان یک موضوع مهم در کانون مباحثات و مذاکرات بین‌المللی قرارگرفته و تقریباً هیچ نشست بین‌المللی را نمی‌توان سراغ گرفت که در آن آب و مدیریت آن به‌صورت یکی از اصلی‌ترین عوامل و عناصر در دستور کار قرار نداشته باشد. بررسی تحولات و توجه به مسائل آب نشان می‌دهد هرچند اولین جرقه‌ها و هشدارها از محافل و کانون‌های علمی برخاسته ولی به‌تدریج با مشاهده عینی پدیده‌های ناشی از نحوه بهره‌برداری، مدیریت منابع آب به بالاترین رده‌های تصمیم‌گیری در سطوح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی رسیده است. جمع‌بندی این فرایند عنوان جدیدی را به ادبیات مدیریت آب به نام " بحران آب" اضافه نموده است. ازاین‌رو، مدیریت و برنامه‌ریزی در سطح حوضه آبریز باهدف توسعه پایدار بایستی فراتر از تقسیم‌بندی‌های سیاسی حوزه آبریز بوده و با لحاظ نمودن ابعاد اجتماعی به‌عنوان یکی از اجزاء اصلی توسعه پایدار و تخصیص عادلانه منابع آب باهدف توسعه اقتصادی و اجتماعی در سطح حوضه آبریز و با توجه به پتانسیل‌های موجودِ توسعه انجام گیرد. نگرش پویایی سیستم بهترین راه جهت برنامه‌ریزی پایدار در سطح حوضه آبریز با در نظر گرفتن اصول و مبانی آن است. به‌وسیله یک نگرش سیستمی مناسب می‌توان اجزا مختلف یک سیستم و ارتباط بین آن‌ها را تعریف نمود(کارآموز و همکاران، ۱۳۸۷: ۴). با توجه به اینکه اساس این روش بر پایه بازخورد و اتفاقات شیءگرا است(گلیان و همکاران، ۱۳۸۸: ۷۱)، می‌توان اثرات تجمعی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طرح‌های توسعه در سطح حوضه را نیز برآورد نمود.

کاربردهای رویکرد پویای سیستم در زمینه‌های مختلف رو به گسترش است. طی سال‌های گذشته، محققانی در زمینه‌های متنوع مرتبط با آب، از این رویکرد در مطالعاتشان استفاده نموده‌اند: وانگ[1]و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از این رویکرد تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبیِ بخش کشاورزی در شانگهای چین را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد دما به‌عنوان عامل اصلی و تعیین‌کننده‌ی نیاز آبی در این منطقه است و میزان این تأثیرگذاری در محصولات مختلف متفاوت است. در پژوهشی دیگر از وانگ و همکاران (۲۰۱۱)، در این منطقه، نشان دادند با توجه به اینکه سیستم مدیریت کنونیِ حوضه آبریز نمی‌تواند نیاز آبی را در آینده تأمین کند، با بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف دریافتند اگرچه عرضه در کوتاه‌مدت سودآور است ولی با توجه به رشد جمعیت این مدیریت تقاضا است که می‌تواند بیلان آبی را در سطح حوضه در تعادل نگه دارد. شیآ جون[2]و همکاران (۲۰۱۵) نیز برای ارزیابی وضعیت منابع آبی در آینده و تحلیل سیاست‌های اعمالی در حوضه آبریز رودخانه یولین [3]در شانگهای چین از این رویکرد بهره جستند که مطابق با این پژوهش، نیاز آبی در این منطقه از ۷۱۰ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۱۴۸۰ مترمکعب در سال ۲۰۳۰ تغییر خواهد کرد. در پژوهشی دیگر از شیآ جون وهمکاران (۲۰۱۱)، باهدف درک و تحلیل پویایی‌های پیچیده در سیستم‌های منابع آب نظیر تغییر اقلیم و نیاز آبی در حوضه آبریز جهت دستیابی به راهکارهای مناسب مدیریتی به توسعه مدل پویایی سیستم در حوضه آبریز رودخانه تو وی[4]پرداختند. مدل طراحی شده ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر سیستم منابع آب بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدیریت کنونی حوضه با توجه به روند تغییر اقلیم در آینده و نیز اثرات رشد اقتصادی و اجتماعی نمی‌تواند اکولوژی حوضه را حفظ نماید. کوتیر[5]و همکاران (۲۰۱۶)، با طراحی سه سناریوی توسعه زیرساخت‌ها، گسترش کشت گندم و شرایط خشک، مدیریت منابع آب و توسعه کشاورزی را در حوضه آبریز رودخانه ولتا در کشور غنا با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم‌ها مطالعه نمودند. این مطالعه نشان داد که سناریوی توسعه زیرساخت‌ها گام مهمی در جهت بهبود کشاورزی منطقه و هم‌چنین حفظ منابع آب می‌باشد. از دیگر مطالعات صورت

1- Wang, X. J, et al.
2- Xiao-Jun, et al.
3- Yulin
4- Tuwei
5- Koti, et al.

گرفته می‌توان به سان[۶] و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد که تغییرات عرضه و تقاضای آب را در چین در طی سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۲۰ مطالعه نمودند و هم‌چنین دُران-اینکالادا[۷] و همکاران (۲۰۱۶) نیز اثر تغییراقلیم را بر کمیت و کیفیت منابع آب در مکزیک با استفاده از این رویکرد بررسی نمودند. گیس[۸](۲۰۱۳)، این روش را در مطالعات خشکسالی در شرق افریقا باهدف افزایش امنیت غذایی و بهبود شرایط زندگی مردم این منطقه به کار گرفت و با استفاده از این روش تأثیر سیاست‌های سازگاری با خشکسالی را بررسی نمود. وُ[۹] و همکاران (۲۰۱۳)، نیز جهت ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب در مناطق خشک (مطالعه موردی بی‌نگ اُ لین[۱۰]در چین) ، حساسیت نیاز آبی محصولات این مناطق را بررسی نمودند و کاهش نیاز آبی با کاشت محصولات سازگار با خشکی را از اقدامات مناسب در این مناطق معرفی نمودند. سوسنیک[۱۱] و همکاران (۲۰۱۲)، با توجه به روند نزولی تراز آبخوان‌ها در منطقه کی‌روان[۱۲]، شرایط کمی و کیفی آبخوان‌های این منطقه را در صورت ادامه وضع موجود تا سال ۲۰۵۰ بررسی نمودند. یانگ[۱۳] و همکاران (۲۰۰۸)، نیز در پژوهشی مشابه از این مدل جهت حل مشکل کمبود آب در بخش مرکزی تایوان استفاده کردند و به ارائه راهکارهای مدیریتی پرداختند. خان[۱۴] و همکاران (۲۰۰۷)، بهبود بازدهی آب‌مصرفی در مزارع برنج را با در نظر گرفتن متغیرهای نفوذ، تبخیروتعرق واقعی، رواناب سطحی و صعود مویینگی مطالعه کردند. اِل‌مدئی[۱۵] و همکاران (۲۰۰۶، ۲۰۰۴)، با توجه به کاهش دبی و تغییرات در الگوی جریانات فصلی در حوضه آبریز موروم بی‌جین[۱۶]، درنتیجه افزایش نیاز آبی به‌ویژه در بخش کشاورزی به توسعه مدل سیستم منابع آب با رویکرد پویایی سیستم پرداختند تا با بررسی نیاز آبی محصولات مختلف نظیر برنج، گندم، ذرت، جو، انگور، الگوی کشت مناسب در این منطقه را تعیین نمایند. جونز و وسلمن[۱۷](بی‌تا)، تأثیر تغییر اقلیم را بر منابع آب در تگزاس جنوبی با تأکید بر بخش کشاورزی مطالعه نمودند. نتایج، افزایش بیش از ۵۰ درصدی نیاز آبی در بخش کشاورزی را تا سال ۲۱۰۰ درنتیجه‌ی افزایش تبخیر نشان داد. کو و فولی[۱۸](۲۰۰۱)، در بررسی علل طبیعی و انسانی در کاهش تراز آب در دریاچه چاد نشان دادند که هرچند متغیرهای اقلیمی نوسانات سالانه‌ی این دریاچه را کنترل می‌کند اما عامل اصلی کاهشِ بیش از ۵۰ درصدی تراز دریاچه در دهه‌ی ۱۹۶۰ عامل انسانی بود.

ارزیابی سیستم منابع آب جهت بهبود مدیریت در حوضه‌های آبریز با بهره‌گیری از این رویکرد در پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نیز مشاهده می‌شود. آبادی و همکاران (۲۰۱۴)، شاخص‌های آسیب‌پذیری را جهت تحلیل سیستم منابع آب در حوضه آبریز رودخانه کرخه در محیط مدل ونسیم مدل‌سازی نمودند و با توجه به تغییرات جمعیتی و اقتصادی در سطح حوضه به ارائه راهکارهای مدیریتی جهت بهبود راندمان آبیاری در بخش کشاورزی پرداختند. فرتوک‌زاده و همکاران (۱۳۹۴)، با به‌کارگیری تحلیل پویایی سیستم تلاش کردند با دیدی جامع سیستم منابع آب در تهران را مدل‌سازی کنند و با اعمال سیاست‌های اقتصادی در جهت بهبود فاصله موجود میان عرضه و تقاضای آب به‌عنوان متغیر اصلی سیستم گام بردارند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیاست‌های کنترل جمعیت و فناوری همزمان با اعمال سیاست‌های نظیر مالیات و تعرفه‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود وضعیت آب منطقه خواهد گذاشت. میثاقی و همکاران (۱۳۹۳)، منابع آب در حوضه آبریز دشت نیشابور را مدل‌سازی و با توجه به روند افت سالیانه تراز آبخوان در

6- Sun, et al.
7- Duran-Encalada, et al.
8- Gies
9- Wu, et al.
10- Bayingolin
11- Susnik, et al.
12- Kairouan
13- Yang, et al.
14- Khan, et al.
15- Elmahdi, et al.
16- Murrumbidgee
17- Jones & Wesselman
18- Coe & Foley

این دشت، اثر سیاست‌های مختلفی را در جهت بهبود شرایط بررسی نمودند. نتایج نشان داد، در صورتی‌که بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به مقدار ثابتی باقی بماند، بازهم تراز آبخوان روند کاهشی خواهد داشت. بنابراین بایستی به کاهش مصارف کشاورزی و آب زیرزمینی استحصال‌شده توجه نمود. روند نزولی سطح آبخوان‌ها در دشت مشهد با رویکرد پویایی سیستم موضوع موردبررسی در پژوهش حسینی و باقری (۱۳۹۲)، است. آن‌ها تأثیر شاخص‌هایی نظیر رشد اقتصادی با رویکرد محدودیت منابع آب، تخصیص منابع آب با رویکرد ارزش‌افزوده و تغییر الگوی کشت بر تراز آبخوان، کمبود آب و متوسط نیاز آبی دشت را بررسی نمودند که تغییر الگوی کشت را به‌عنوان یک سیاست برتر و گامی مؤثر در جهت بهبود وضعیت منابع آب این دشت معرفی کردند. ارشدی و باقری (۱۳۹۲)، باهدف بررسی علل آسیب‌پذیری به‌ویژه کیفیت آب به مدل‌سازی سیستم منابع آب در حوضه کارون پرداختندکه نتایج نشان داد بیشترین تأثیرگذاری بر شوری آب در این حوضه از بخش کشاورزی است. پور فلاح و مشتاق (۱۳۹۲)، به مدل‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی سفیدرود پرداختند و تأثیر عوامل مختلف بر اطمینان‌پذیری تأمین نیاز کشاورزی تخصیص داده‌شده به سد را موردبررسی قراردادند. سناریو موردبررسی تأثیر برداشت آب موردنیاز بخش صنعت از سیستم شبکه آبیاری است که نتایج حاکی از کاهش ده‌درصدی اطمینان‌پذیری تأمین نیاز کشاورزی است. ناصری و همکاران (۱۳۹۲)، برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان دشت تبریز در برابر تنش‌های مختلف و تعیین حد تراز مجاز بهره‌برداری از این آبخوان از روش پویایی سیستم بهره گرفتند. در پژوهش شیخ‌زاده و همکاران (۱۳۸۹)، توسعه مدلِ سد دامغان به روش پویایی سیستم باهدف تعیین تأثیر سیاست‌های مختلف بهره‌برداری بر رفتار مخزن و میزان تأمین نیازهای پایین‌دست در افق آینده پرداخته شد. نتایج نشان دادند با اجرای سیاست‌های مناسب بهره‌برداری می‌توان نیازهای موردنظر را در حد قابل‌قبول تأمین نمود. گلیان و همکاران (۱۳۸۶)، تأثیر سیاست‌های توسعه و بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز رودخانه آجی چای در شرق دریاچه و اثرات آن بر تراز آب دریاچه ارومیه را بررسی نمودند. نتایج نشان‌دادند که ساخت سد بر رودخانه آجی چای به‌تنهایی تأثیر خاصی را بر تراز آب دریاچه ندارد. مؤمنی و همکاران (۱۳۸۵)، نیز با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها به مدل‌سازی مخزن سد، دشت‌ها، شبکه آبیاری و آب زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود پرداختند. با توجه به اینکه سیاست بهره‌برداری در حوضه استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی است و با توجه به افت آب زیرزمینی، نتیجه این بررسی نشان داد که با افزایش راندمان کشاورزی در بالادست حوضه تا ۵۵ درصد سطح آب زیرزمینی در تمامی دشت‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین با ایجاد قواعد بهره‌برداری مناسب‌تر، می‌توان تمامی نیازها ازجمله نیاز زیست‌محیطی تالاب گاوخونی را تأمین نمود.

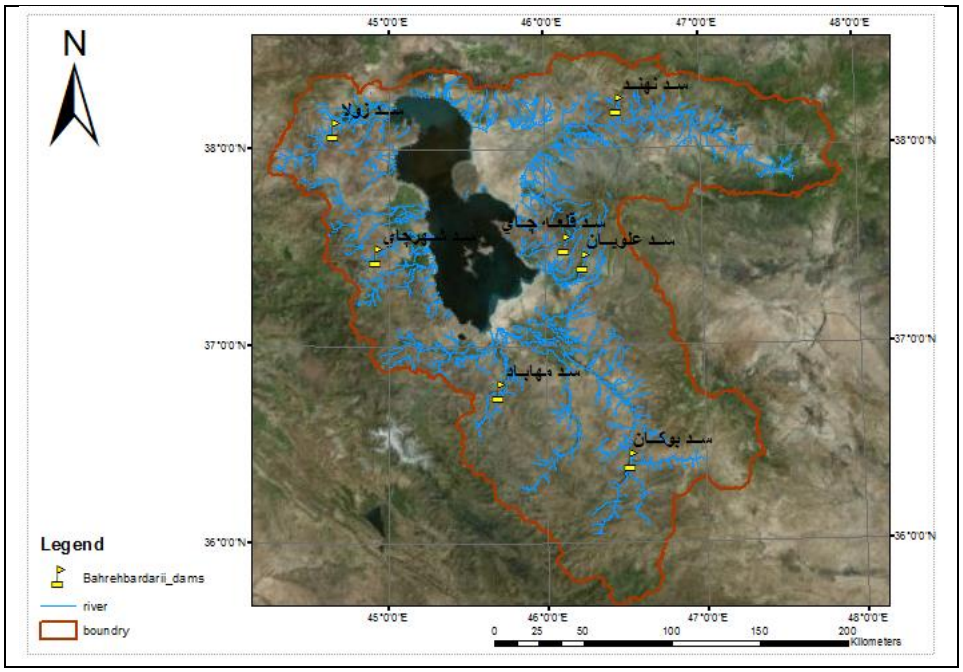
براساس مطالعات صورت گرفته در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در طی نیم‌قرن اخیر جمعیت ۱۰ برابر افزایش‌یافته که با تغییرات معیشتی – اقتصادی نیز همراه بوده است. افزون بر این، شرایط مساعد حوضه با داشتن دشت‌هایی مانند تبریز، ارومیه، مراغه، مهاباد، میاندوآب، نقده، سلماس، پیرانشهر و آذرشهر نیز این منطقه را به یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران تبدیل کرده که همین استعداد بالفعل منطقه در کشاورزی سبب گردیده، تمام تلاش‌ها جهت تبدیل مراتع و مناطق دیم به زمین‌های آبی توسط دستگاه‌های دولتی و ساکنین محلی صورت گیرد و بالتبع، این تمایل جهت گسترش کشاورزی، نیازمند تأمین آب برای کشت و زرع است. آمار و اطلاعات در خصوص توسعه کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سه دهه اخیر نشان می‌دهد سطح اراضی آبی در این منطقه از سال ۱۳۵۸ که معادل ۱۵۸ هزار هکتار بوده در سال ۱۳۸۵ بالغبر ۴۱۰ هزار هکتار گزارش گردیده که حدود سه برابر افزایش را نشان می‌دهد، علاوه بر آن الگوی زراعی به‌تدریج در جهت محصولات با نیاز آبی بیشتر ازجمله باغات و نباتات علوفه‌ای به‌ویژه یونجه تغییر کرده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که بخش کشاورزی بیش از ۶۰ درصد از کل منابع آب تجدید پذیر و حدود ۹۰ درصد از مصارف حوضه را به خود تخصیص داده است. این میزان برداشت از منابع آب حوضه در حالی صورت می‌گیرد که بر طبق شاخص کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل، میزان برداشت قابل‌قبول از منابع تجدید پذیر می‌بایست بین ۲۰ تا ۴۰ درصد باشد و برداشت بیش از ۴۰ درصدی از این منابع ریسک بسیاری را برای

مدیریت بخش آب به همراه خواهد داشت (گزارش ستاد احیای دریاچه ارومیه). با توجه به وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه، انجام پروژه‌های اقتصادی مذکور متضمن منافع پایدار زیست‌محیطی نبوده، درواقع توجه به اولویت‌های اقتصادی به قیمت نادیده انگاری اکوسیستم باارزشی همچون دریاچه ارومیه مغایر با مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان زیربنای توسعه اقتصادی است؛ زیرا در هر توسعه‌ای که متکی به آب باشد اولویت حق‌آبه دریاچه در جایگاه نخست باید قرار بگیرد. هرچند ممکن است این رویکرد در مواردی توسعه را محدود سازد، اما می‌تواند خلاقیت را بالابرده و انسان را مجبور به بهره‌وری بالاتری کند. اتفاقی که گویا در خصوص دریاچه ارومیه رخ نداده است. باتوجه به‌این‌که تاکنون تحقیقی که با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها و با در نظر گرفتن سدهای مهم مورد بهره‌برداری از حوضه و هم‌چنین در نظر گرفتن تمامی روابط و بازخوردهای بین مصارف و منابع مذکور صورت نگرفته است و تحقیقات انجام شده صرفاً بخشی از حوضه آبریز را بررسی نمودند و با توجه به اهمیت مطالعه‌ی سدهای حوضه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، در این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم‌ها اثر سناریوهای گوناگون بر تغییرات تراز آب دریاچه، با تمرکز بر فعالیت ۷ سد اصلی مورد بهره‌برداری و بررسی الگوی نیاز آبی تامین‌شده از آن‌ها بویژه در بخش کشاورزی موردبررسی قرار گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه دومین دریاچه شور جهان، در موقعیت جغرافیایی '۳۸ ° ۲۰ تا ° ۳۷ عرض‌شمالی و '۴۵ ° ۵۵ تا ' ° ۵۵ ۴۴ طول شرقی و در حدفاصل دو استان آذربایجان غربی و شرقی واقع‌شده است. دریاچه به شکل نیمه مستطیلی و با کشیدگی در راستای شمال – جنوب، حدود ۱۰ درصد حوضه آبریز را در برمی‌گیرد. دریاچه ارومیه دارای حدود ۱۰۲ جزیره کوچک و بزرگ با مساحت کل ۸۵ کیلومترمربع است. . این دریاچه ناحیه‌ای به مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومترمربع را می‌پوشاند و بیشترین درازا و پهنای آن به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ کیلومتر است. مساحت آن در زمان‌های کم‌آبی و پرآبی متفاوت است و از ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومترمربع متغیر است. عمق متوسط آن ۶ تا ۱۲ متر است به‌طوری‌که در قسمت‌های شمالی حدود ۶ متر و در قسمت‌های جنوبی از ۱۲ تا ۱۶ متر متغیر است. اکوسیستم فعال آن شامل دریاچه و حوضه آبریز آن است.

حوضه آبریز دریاچه نیز به مساحت تقریبی ۵۲۰۰۰ کیلومترمربع، نیمی از استان آذربایجان غربی (۲۱۵۰۰ کیلومترمربع)، بخش قابل‌توجهی از آذربایجان شرقی (۱۹۰۰۰ کیلومترمربع) و بخش محدودی از استان کردستان (۵۰۰۰ کیلومترمربع) را دربر می‌گیرد. ازنظر وسعت این حوضه تنها ۳/۲ درصد سطح ایران را شامل می‌شود و در حدود ۶/۸ درصد از کل بارندگی کشور در آن اتفاق می‌افتد. بیش از ۶۰ درصد مساحت حوضه در مناطق کوهستانی واقع‌شده است. ازنظر اقلیمی این منطقه دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است. حداکثر بارش در حوضه در فروردین و یا اردیبهشت‌ماه و حداقل آن در مردادماه رخ می‌دهد. همچنین بخش عمده‌ای از نزولات جوی حوضه آبریز ارومیه به‌صورت برف است. میانگین دمای سالانه حوضه از حدود ۱۱ درجه در مجاورت دریاچه تا حدود ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات سهند و سبلان متغیر است (جاماب، ۱۳۸۴). حوضه‌ی دریاچه ارومیه بر اساس رودخانه‌هایی که به دریاچه ارومیه ختم می‌شوند از ۱۳ سیستم هیدرولوژیکی تشکیل‌شده است. رودخانه‌های زرینه‌رود، سیمینه‌رود، گادارچای، آجی چای، نازلوهای، باراندوزچای و مردوق‌چای از مهم‌ترین رودخانه‌های تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه می‌باشند. سطح زیر کشت محصولات زراعی آبی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۳۵۶۴۲۰ هکتار و سطح زیر کشت باغات ۱۵۵۵۰۶ هکتار بوده و درمجموع ۵۱۱۹۲۶ هکتار در این حوضه زیر کشت محصولات آبی است که ۴۴ درصد از این اراضی در استان آذربایجان شرقی، ۵۳ درصد در استان آذربایجان غربی و ۳ درصد در استان کردستان قرار دارد(گزارش طرح جامع ارومیه،۱۳۹۱: ۴۹).



شکل ۱: موقعیت سدها در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۳- مواد و روش‌ها

برای تشخیص چگونگی بقای سیستم منابع آب، مکانیزم‌های فعال آن سیستم باید تحلیل گردد تا آسیب‌پذیرترین جنبه سیستم به‌عنوان حلقه ضعیف در کانون توجه و تحقیق قرار بگیرد (ارشدی و باقری،۱۳۹۲: ۲). بر این اساس، در فرایند شبیه‌سازی به روش پویایی سیستم، تراز آب دریاچه ارومیه به‌عنوان حلقه ضعیف سیستم در نظر گرفته شد؛ سپس متغیرها و مفاهیم کلیدی، دوره زمانی مدل و تعریف دینامیکی مسئله مشخص شدند و مدل مفهومی حوضه آبریز دریاچه ارومیه تهیه گردید. پس از تعمیم ارتباط میان متغیرها، نمودار علت‌ومعلولی بین متغیرها برای نشان دادن هم‌بستگی بین آن‌ها و فرایندهای بازخوردی ترسیم گردید. رابطه علّی با دو علامت مثبت و منفی نشان داده می‌شود. درصورتی‌که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک‌جهت باشند رابطه علّی مثبت و درصورتی‌که این رابطه عکس یکدیگر باشند رابطه منفی خواهیم داشت (شکل۲). پس از ترسیم نمودارهای علی و معلولی باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم نمود. این نمودارها همراه با بازخورد دو مفهوم اساسی تئوری تحلیل پویایی سیستم می‌باشند تا بتوان اثر سیاست‌های بهره‌برداری و مدیریتی مختلف را بر نحوه تخصیص آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مشاهده کرد (شکل۳)، به این ترتیب، ارتباط تمامی مولفه‌ها با یکدیگر در سیستم منابع آب در محیط نرم‌افزار VENSIM[19]PLE کد نویسی شد. در این نرم‌افزار نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که با روش اولر یا رانگ‌کوتا حل می‌شوند، ساخته می‌شود.

در مدل‌سازی زیرسیستم آب سطحی ورودی به دریاچه، ۷ سد مورد بهره‌برداری (بوکان، مهاباد، علویان، قلعه چای، شهر چای، زولا و نهند) که بر روی رودخانه‌های اصلی قرار دارند و بیشترین سهم را در تنظیم آب حوضه دارند، انتخاب شدند. متغیرهای مؤثر بر معادله بیلان آبی سدها عبارت‌اند از: دبی و بارش ورودی به مخازن سد، تبخیر از مخزن سد، میزان آب تنظیمی سدها برای نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی، میزان سرریز از سدها، حجم اولیه و مقادیر بیشینه و کمینه حجم مخازن، حجم، ارتفاع و سطح مخازن سدها. مؤلفه‌هایی نظیر بارش، تبخیر و دبی برای اجرای مدل، پس از گردآوری، رفع نواقص و تولید سری‌های زمانی با گام‌های ماهانه به مدت ۱۵ سال آبی (۷۹-۱۳۷۸

19- Ventana Simulation Environment

تا ۹۳-۱۳۹۲) به مدل معرفی شد و برای سایر مؤلفه‌های نظیر میزان سرریز از سدها، میزان آب تنظیمی و نیاز آبی هر یک از سدها و میزان عرضه‌ی کل آب از بخش‌های کشاورزی، شرب، صنعت و زیست‌محیطی روابط فرمول شرطی IF THEN ELSE نگاشته شد.

معادله کدنویسی‌شده حجم آب قابل تنظیمی سد از طریق رابطه ذیل (۱):

IF THEN ELSE ("dam “+” inflow”-” evaporation”-” release ">"sto.max", ". dam “+” inflow”-” evaporation”-” release”-” sto.max", 0) رابطه‌ی ۱

معادله کدنویسی‌شده حجم سرریز از سد در رابطه ذیل (۲):

IF THEN ELSE (“total demand"< (dam-"sto.min") +"inflow”-” evaporation “+” precipitation”, "total demand”, (dam-"sto.min") +"inflow”-” evaporation “+” precipitation رابطه‌ی ۲

معادله کدنویسی شده عرضه آب در رابطه ذیل (۳):

Min ("release", "agriculture demand"(Time) +"domestic demand"(Time) + "industrial demand (Time) رابطه‌ی ۳

معادله کدنویسی شده عرضه آب زیست‌محیطی از سد در رابطه ذیل (۴) محاسبه گردید:

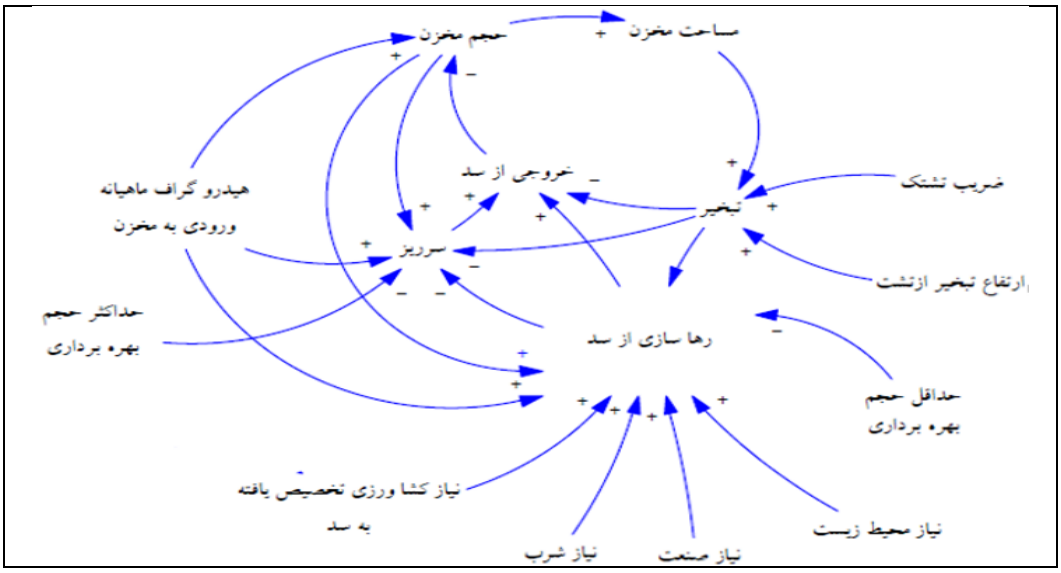
Min ("Environment. demand"(Time), "release."-"supply.") رابطه‌ی ۴

در روابطه فوق، inflow مجموع متغیرهای ورودی به مخزن سد (بارش و دبی ورودی به مخزن سد و میزان حجم آب موجود در مخزن سد که از حجم حداقل بهره‌برداری کسر شده است) ، outflow مجموع متغیرهای خروجی از مخزن سد(تبخیر)، Release، حجم آب تنظیمی سد، Spill، میزان سرریز از مخزن سد و S_{max} حداکثر حجم ذخیره مخزن سد و S_{min} حداقل حجم ذخیره مخزن سد می‌باشد. نیازها نیز عبارتند است از نیاز کشاورزی، شرب، صنعت و نیاز زیست‌محیطی دریاچه.

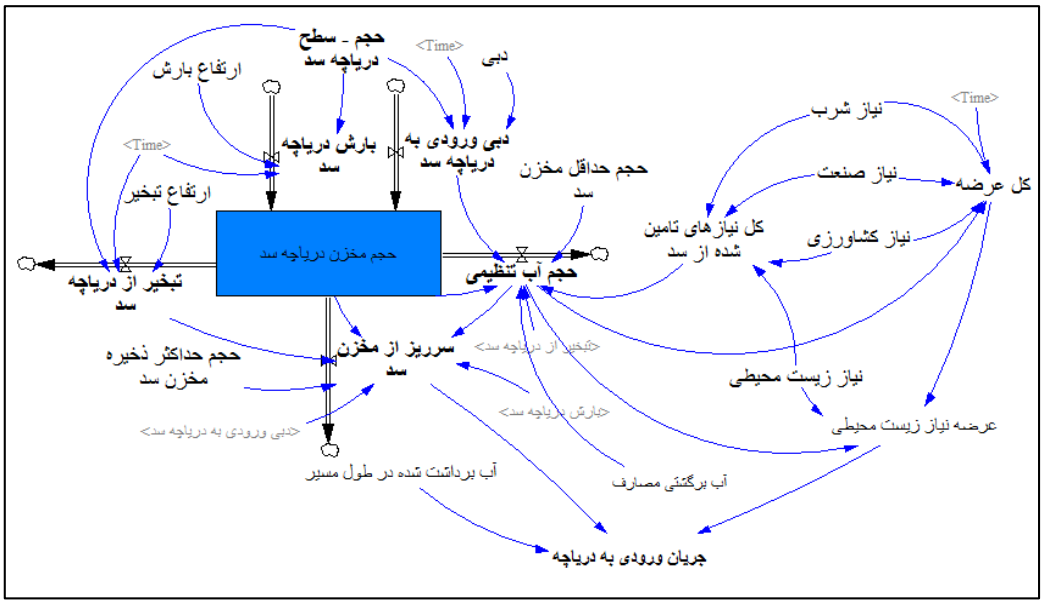
از آنجایی‌که، هدف نهایی از مدل‌سازی، تعیین بیلان آبی و سری زمانی دبی خروجی از سدهای واقع در هر یک از زیر حوضه‌ها و هم‌چنین دبی ورودی از سایرزیرحوضه‌ها (نازلو چای، روضه چای، باراندوزچای، لیلان‌چای، جوان چای، آذرشهر چای، سیمینه‌رود) به دریاچه است. ازاین‌رو، مقادیر سرریز از سدها و جریان زیست‌محیطی به‌عنوان مقادیر ورودی به دریاچه در نظر گرفته شدند. به منظور برآورد آب مصرفی در اراضی حقابه‌بر، از آماربرداری مصارف آب در سطح حوضه آبریز به تفکیک محدوده‌ی سطح هر زیر حوضه‌ای استفاده گردید. این آماربرداری توسط دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب ایران انجام‌شده است. این آمار و اطلاعات شامل کلیه اطلاعات برداشت سالانه از منابع آب سطحی (انهار، موتورپمپ، ایستگاه پمپاژ، آب‌بندان، بندهای انحرافی) است. با مرتب کردن این اطلاعات و انتقال آن به سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اقدام به استخراج میزان آب برداشت‌شده از منابع آب سطحی در محدوده‌ی مطالعاتی گردیده است. از این‌رو، جریان ورودی به دریاچه، پس از کسرِ میزان برداشت‌های صورت گرفته در مدل تعریف شده است. لازم به ذکر است که تمامی متغیرهای مورداستفاده در تمامی زیرسیستم‌ها به واحد میلیون مترمکعب است.

معادله نهایی مخازن سدها:

$$\frac{d(dam\ storage)}{dt} = (inflow + precipitation - evaporation - relarese - spill)$$



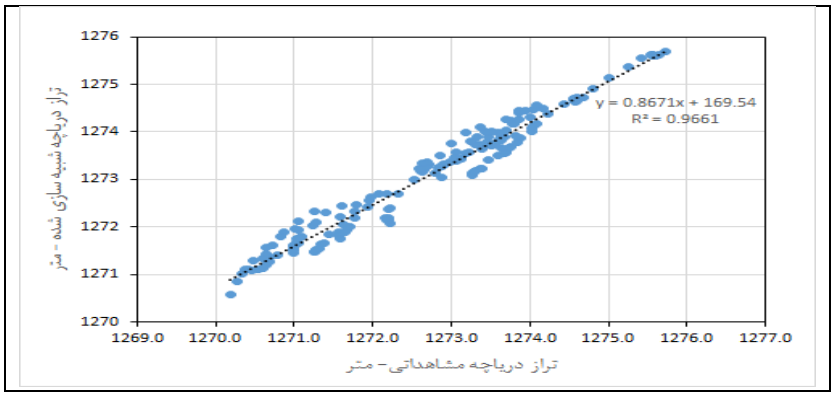
شکل ۲: نمودار علی ومعلولی مخزن سد



شکل ۳: نمودار ذخیره – جریان مخزن سد

۴- بحث و نتایج

مرحله صحت‌سنجی مدل بیشتر به دنبال بررسی کارایی مدل توسعه یافته است، از این‌رو، جهت مقایسه رفتار خروجی مدل با رفتار داده‌های مشاهداتی، با ترسیم داده‌ها و با استفاده از ابزارهای آماری نظیر ضریب تبیین رفتار مدل مورد آزمون قرار گرفت که با توجه به شکل ۴ و مقدار به‌دست‌آمده‌ی ضریب تعیین (R^2=۰,۹۶)، مدل توانسته رفتار مرجع را بازسازی نماید و تطابق قابل‌قبول و مناسبی بین این دو مقادیر دیده می‌شود.



شکل ۴: مقایسه رفتار مدل و رفتار مرجع تراز آب دریاچه ارومیه در دوره ۱۳۹۳-۱۳۷۸

آب دریاچه عمدتاً از طریق رودخانه‌های ورودی به دریاچه تأمین می‌شود. به‌طوری‌که رودخانه‌های حوضه با دبی متوسط ۴,۵ میلیارد مترمکعب در سال مهم‌ترین و حیاتی‌ترین منبع آب این دریاچه محسوب می‌شوند (چرب گو،۱۳۸۹: ۳). طبیعی است که هرگونه دخالت در نحوه‌ی رفتار رودها باعث تغییرات عظیم در دریاچه می‌شود. توزیع طبیعی سالانه جریان‌های سطحی این حوضه به‌گونه‌ای است که بیش از ۷۰ درصد در ۴ ماه جریان می‌یابد و ۸ ماه دیگر کمتر از ۳۰ درصد آب را به خود اختصاص می‌دهد. این ویژگی به‌تنهایی لزوم ساخت سدهای مخزنی را برای کنترل و تنظیم جریان توجیه کرده است. به‌طوری‌که در حال حاضر، بیش از ۳۶ سد مخزنی بزرگ و کوچک، ۴۱ سد انحرافی، ۱۵ ایستگاه پمپاژ و هم‌چنین تعداد فراوانی آب‌بندهای فصلی کوچک در حوضه آبریز ارومیه احداث‌شده است. از این‌رو پس از توسعه مدل و صحت‌سنجی آن، در راستای اهداف پژوهش، با طراحی سناریوهای مختلفی به ارزیابی هر یک از زیرسیستم‌ها پرداخته شد و نتایج حاصل از اجرای آن‌ها در نوسانات تراز دریاچه ارومیه موردبررسی قرار گرفت. شاخص‌هایی که در ارزیابی سناریوها مورداستفاده قرار گرفتند عبارتنداز: تاثیر سدهای مورد بهره‌برداری، الگوی نیاز آبی تامین‌شده از سدهای حوضه.

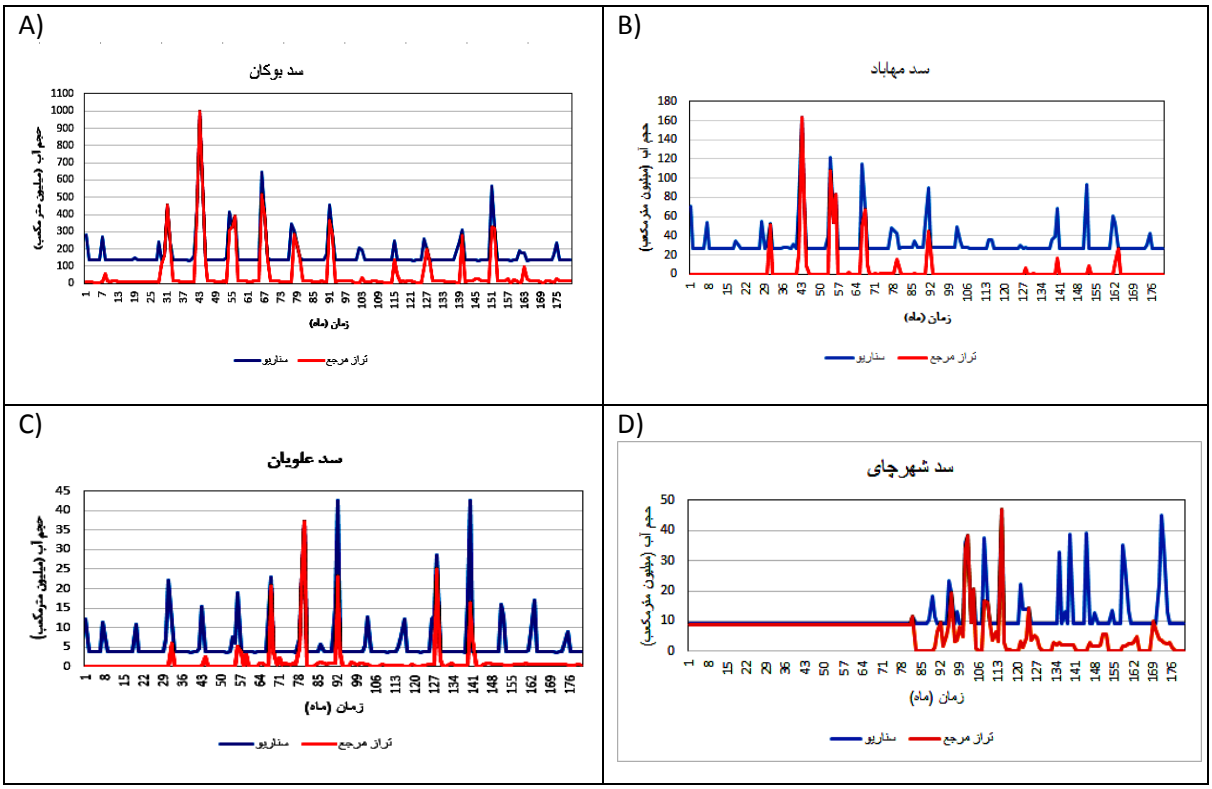
۴-۱- سناریو اول: عدم بهره‌برداری از سدهای حوضه

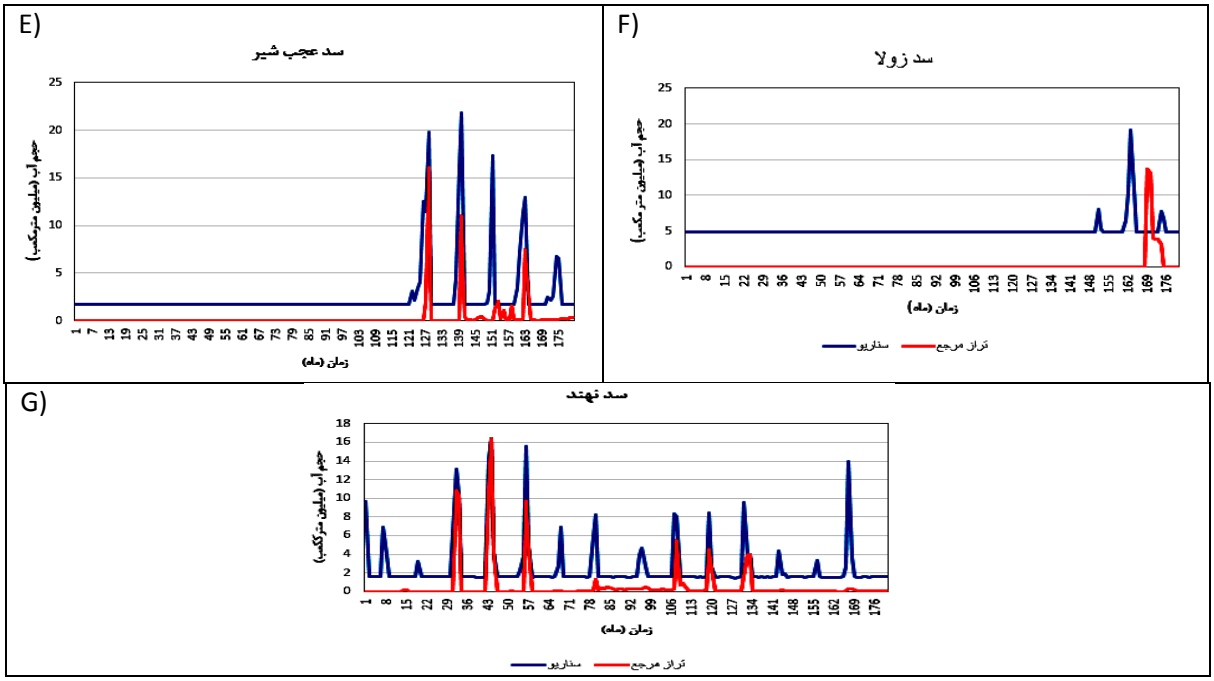
مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که وابستگی حوضه به منابع آب سطحی به طور متوسط حدود ۷۸درصد است از این‌رو، جریان سطحی ورودی به دریاچه مدل‌سازی شد تا تاثیر هر یک از طرح‌های سازه‌ای توسعه یافته در حوضه بر کاهش جریان ورودی به دریاچه مشخص گردد. در این سناریو ، حجم حداکثر ذخیره هر یک از هفت سد موردمطالعه به صفر تغییر داده شد تا بدین‌وسیله حضور سدها حذف و مقدار آب تنظیمی از هر یک از سدها وارد جریان ورودی به دریاچه شود. نتایج حاصل از اجرای این سناریو که در شکل‌های (A– G)۷ آورده شده، نشان می‌دهد این هفت زیرحوضه در مجموع ۴۲ درصد از جریان ورودی به دریاچه را کاهش می‌دهند. به‌گونه‌ای که با بهره‌برداری از سدها ، میزان رواناب ورودی به دریاچه از ۲۶۳,۶۸ به ۹۷,۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در سایر شکل‌ها ، تغییرات جریان ورودی به دریاچه ناشی از عدم بهره‌برداری از هر یک از سدهای مورد مطالعه نشان داده شده است. در میان سدهای موردبررسی، سد بوکان با بیشینه ظرفیت آب تنظیمی، بالاترین نقش (A- ۷) را در مقایسه با دیگر سدها در کاهش جریان ورودی به دریاچه داشته است. به‌گونه‌ای که سهم ۲۲٪ از این تغییرات را به خود اختصاص داده است. به‌گونه‌ای که متوسط ماهانه جریان سرریز از سد بوکان در صورت عدم بهره‌برداری از آن به ۱۷۲,۹۵میلیون‌مترمکعب می‌رسید در حالی که با بهره‌برداری از این سد متوسط ماهانه جریان سرریز شده از این سد به ۵۵,۴۵ میلیون‌مترمکعب کاهش یافته است. دلیلِ این میزان تأثیرگذاری توسط سد بوکان را باید به توزیع ناهمگون منابع آب در حوضه اشاره کرد. به‌گونه‌ای که حدود ۵۱ درصد جریان‌های سطحی متعلق به دو رودخانه زرینه‌رود و سیمینه‌رود است که هر دو در جنوب حوضه قرار دارند و مجموعاً کمتر از ۳۴ درصد مساحت کل حوضه را تشکیل می‌دهند. سد مهاباد نیز بیشترین میزان تاثیرگذاری بر جریان

ورودی به دریاچه داشته که در صورت عدم بهره‌برداری از این سد، تغییرات حجمی معادل ۲۸,۳۹ میلیون‌مترمکعب را خواهیم داشت. در خصوص سدهای جدیدی زولا، عجب‌شیر و شهرچای نیز که در دهه ۸۰ به بهره‌برداری رسیده‌اند، تاثیر ٪۵ در کاهش جریان ورودی به دریاچه را نشان می‌دهند. دو سد علویان و نهند نیز در مجموع ۳ ٪ کاهش را نشان دادند.

جدول ۱: متوسط جریان ماهانه خروجی از سدها در سناریو ۱

سد	مرجع (MCM)	سناریو (MCM)	درصد تغییرات
بوکان	۵۵,۴۵	۱۷۲,۹۵	٪ ۲۲
مهاباد	۴,۸	۳۳,۱۹	٪ ۱۲
علویان	۱,۳۲	۵,۹۵	٪ ۲
شهرچای	۵,۸۳	۱۲,۲۸	٪ ۲
نهند	۰,۵۹	۲,۵۱	٪ ۱
عجب شیر	۰,۲۸	۲,۴۷	٪ ۱
زولا	۰,۲۳	۵,۰۹	٪ ۲
مجموع	۶۸,۵	۲۳۴,۵	٪ ۴۲





شکل۷: جریان خروجی از هر یک از سدهای حوضه ابریز دریاچه ارومیه با اجرای سناریو ۱

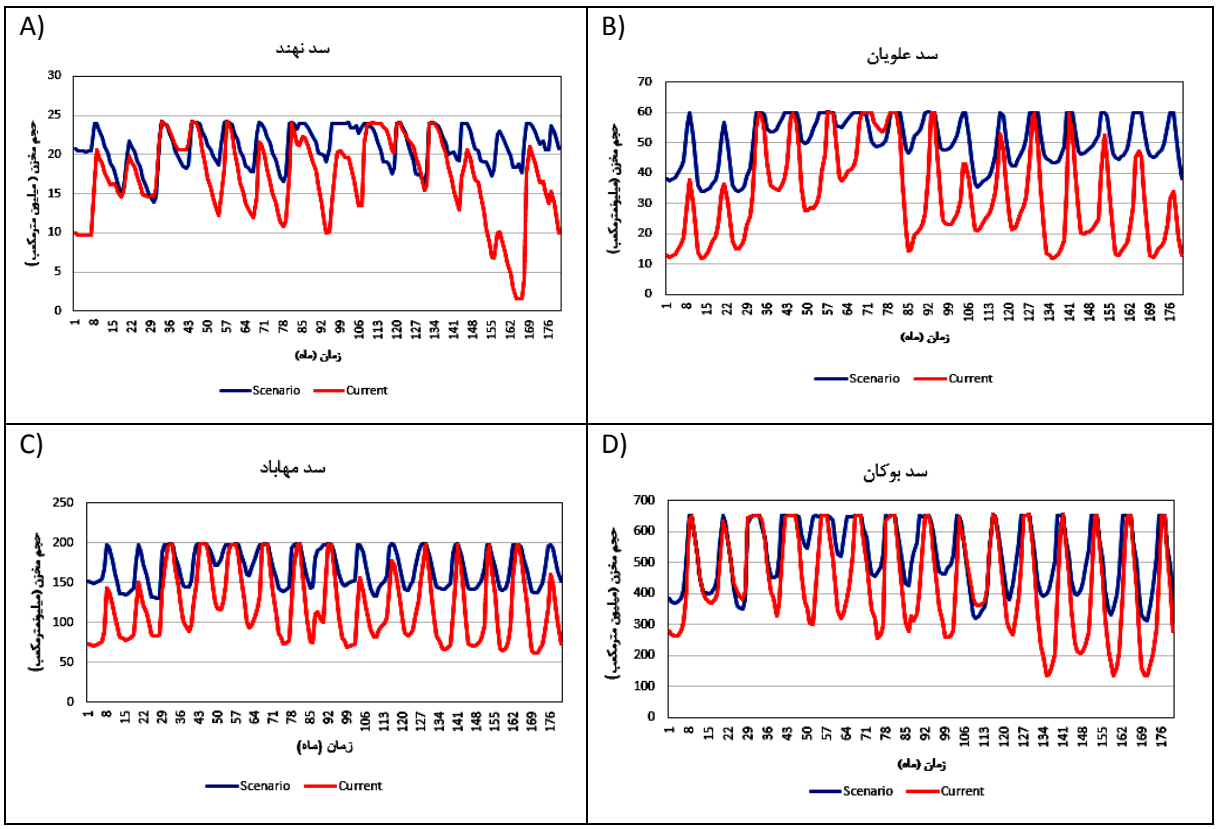
۴-۲- سناریودوم: تاثیر الگوی نیاز آبی از سدها ی حوضه

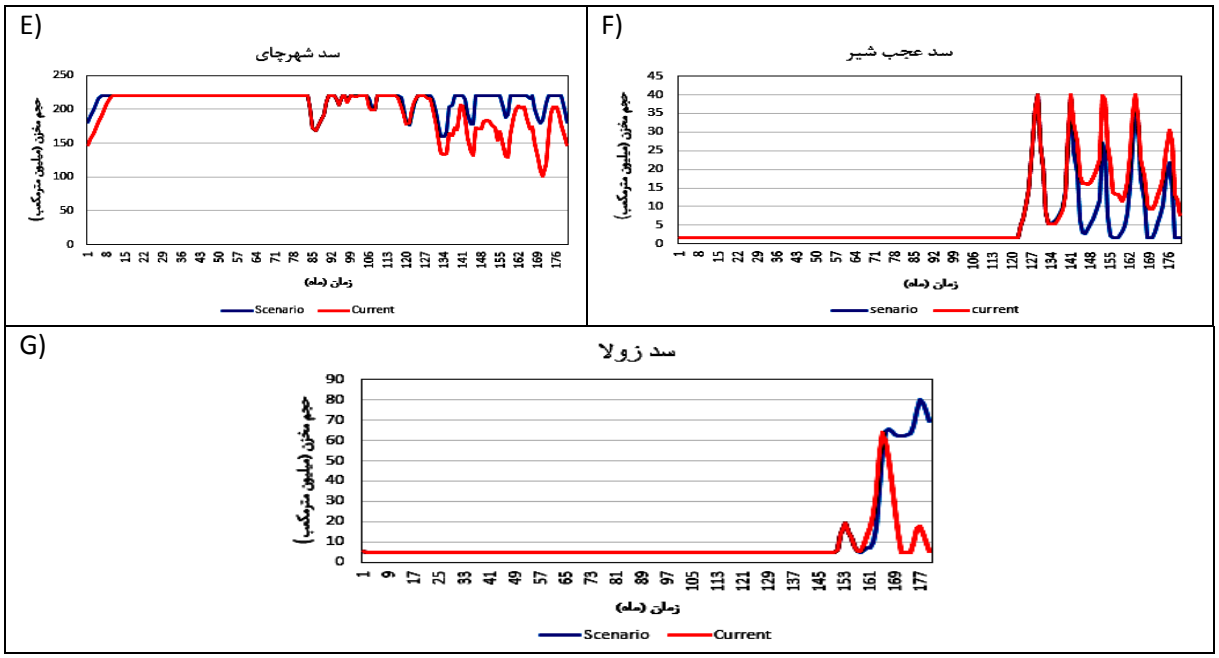
نتایج حاصل از اجرای سناریوی اول نشان دادکه ساخت سدها نمی‌تواند به تنهایی توجیه‌کننده‌ی تغییرات تراز دریاچه باشد، بویژه دو سد بوکان و مهاباد که با سهم ۲۲ ٪ و۱۲ ٪ بیشترین تاثیر را نشان می‌دادند. این میزان تاثیرگذاری در حالی است که سد مهاباد در سال ۱۳۴۹ با ظرفیت آب تنظیمی۱۹۷٫۸میلیون‌مترمکعب و سد بوکان در سال ۱۳۵۰ با ظرفیت آب تنظیمی ۶۵۰ میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرارگرفته است که حداقل تا دو دهه پس از بهره‌برداری، تراز دریاچه با چنین نوساناتی مواجه نبوده است. درحالی‌که از سال ۱۳۵۰ تا سه دهه بعد، ۱۵ سد با مجموع ظرفیت آب قابل تنظیم سالیانه ۳۵۲ میلیون مترمکعب بر روی رودخانه‌های مختلف حوضه به بهره‌برداری رسیده است؛ بنابراین، بهره‌برداری از این سدها به‌تنهایی نمی‌تواند نوسانات تراز دریاچه را توجیه نماید. به‌خصوص که بهره‌برداری از سایر سدها نیز در مجموع سهم ۸ ٪ را در این نوسانات داشته‌اند که حتی در صورت ادامه بهره‌برداری تاثیر چندانی بر افزایش تراز دریاچه نخواهند داشت.از این‌رو، جهت بررسی نقش توسعه کشاورزی در سطح حوضه که با تغییر در الگوی نیاز آبی تامین‌شده از سدهای مورد بهره‌برداری نیز همراه بوده، سناریوی دوم شکل گرفت تا بدین‌ترتیب سهم دقیق بهره‌برداری سدها و هم‌چنین نقش طرح‌های توسعه یافته در سطح حوضه در کاهش جریان ورودی به دریاچه مشخص گردد. به منظور بررسی الگوی نیاز آبی در حوضه، در این سناریو فرض بر این گذاشته شد که در صورت بهره‌برداری از هفت سد اصلی حوضه ولی با ثابت ماندن الگوی نیاز آبی، جریان ورودی به دریاچه و در نهایت تراز آب دریاچه با چه تغییراتی مواجه خواهد شد. از این‌رو، نیاز آبی سال ۱۳۷۸ به‌عنوان نیاز آبی پایه به مدل معرفی گردید. شکل ۸ تغییرات حجم مخزن سد و شکل ۹ مجموع سرریز از هر یک از سدها را در حالت اجرای سناریوی دوم نشان می‌دهد. نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهانه جریان ورودی به دریاچه از ۶۵٫۵۳ به ۹۶٫۸۸ میلیون‌مترمکعب است که این میزان، سبب افزایش ۱۶ درصدی در جریان ورودی به دریاچه خواهد شد. به عبارت دیگر از ۴۲ درصد کاهش جریان ورودی بر اساس نتایج سناریوی اول، ۱۶درصد آن مربوط به افزایش نیاز آبی است و بهره‌برداری از این هفت سد سهمی معادل با ۲۶ ٪ را در کاهش جریان سطحی داشته‌است. جدول ۲ متوسط ماهانه جریان ورودی به دریاچه را تحت تاثیر این سناریو در هر یک از سدها نشان می‌دهد که سد بوکان بالاترین میزان تاثیر (۱۱ درصد) را داشته به‌گونه‌ای که، متوسط جریان ماهانه سد

بوکان در این سناریو، از ۵۵,۴۵ به ۷۳,۸۷ میلیون‌مترمکعب افزایش می‌یابد. سد زولا با توجه به اینکه در سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسیده است تغییراتی در الگوی نیاز آبی بهره‌برداری از این سد دیده نشده است. در سدهای جدید نظیر شهرچای و قلعه چای نیز تغییرات چندانی در روند الگوی نیاز آبی آن‌ها دیده نمی‌شود و عمده‌ی این تغییرات در سدهای بوکان، مهاباد، علویان دیده می‌شود.

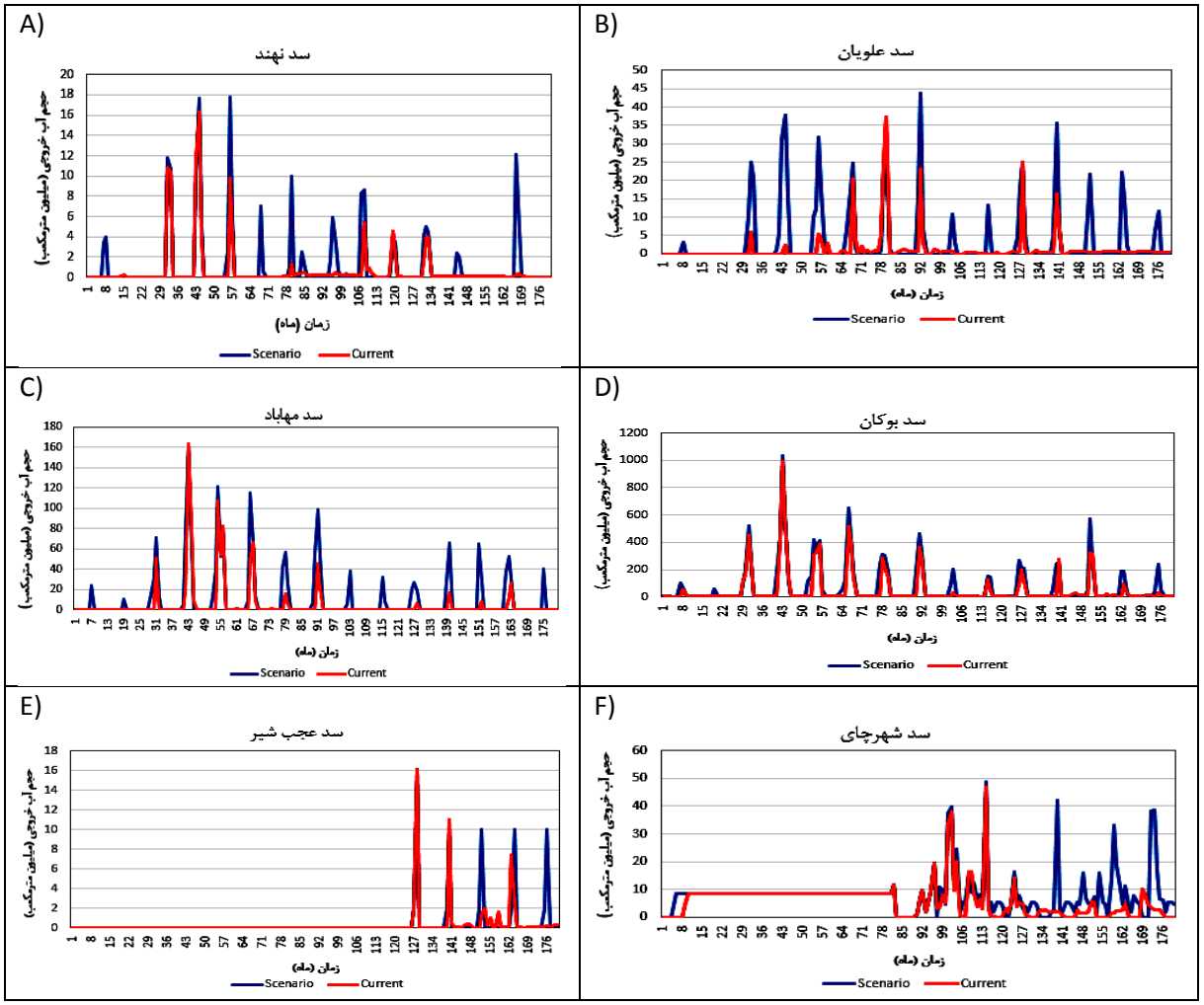
جدول ۲: متوسط جریان ماهانه خروجی از سدها در سناریو ۲

سد	حالت مرجع (MCM)	سناریو (MCM)	درصد تغییرات
بوکان	۵۵,۴۵	۷۳,۸۷	٪ ۱۱
مهاباد	۴,۸۱	۹,۶۳	٪ ۳
علویان	۱,۳۲	۳,۲۴	٪ ۱,۱
شهرچای	۵,۸۳	۷,۸۵	٪ ۰,۷
نهند	۰,۵۹	۰,۹۴	٪ ۰,۲
عجب شیر	۰,۲۸	۰,۳۷	٪ ۰,۰۱
زولا	۰,۲۳	۰,۲۳	۰٪
مجموع	۶۸,۵	۹۶,۱۳	٪ ۱۶





شکل ۸: تغییرات بیلان آبی مخازن سدهای حوضه آبریز دریاچه ارومیه با اجرای سناریو ۲



شکل ۹: جریان خروجی از سدهای حوضه آبریز دریاچه ارومیه با اجرای سناریو ۲

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه، بررسی‌های صورت گرفته بر نقش عوامل انسانی در کاهش تراز آب دریاچه تاکید دارد. در این مطالعه نیز با در نظر گرفتن دو سناریو، تاثیر بهره‌برداری از سدها و تاثیر توسعه طرح‌های اقتصادی بر نیاز آبی حوضه و در نهایت بر کاهش تراز دریاچه بررسی گردید. بدین‌منظور تلاش گردید تا با مدل‌سازی کاربردی‌تر، مدل عینی از سیستم منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه طراحی گردد تا بتوان تاثیر طرح‌های سازهای در سطح حوضه را بر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه نشان داد. از این‌رو، از تکنیک پویایی سیستم‌ها استفاده گردید که بیشترین هنر مدل‌سازی در این روش، کشف و درک فرایندهای بازخوردی است. فرایندهایی که در آن ساختارهای ذخیره و جریان، تأخیرهای زمانی و رفتارهای غیرخطی، تعیین‌کننده پویایی سیستم است. به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از آمار و اطلاعات ثبت‌شده‌ی تراز دریاچه استفاده گردید. میزان برازش میان مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده با محاسبه شاخص ضریب تعیین (۰,۹۶) نشان داد که مدل دقت خوبی نسبت به شرایط واقعی دارد. نتایج نشان داد که بهره‌برداری از سدهای اصلی حوضه سبب کاهش ۲۶ درصدی تراز آب دریاچه شده است که در این میان سدهای جدیدتر تاثیر ناچیزی را بر تغییرات تراز نشان می‌دهند که با مطالعه‌ی گلیان و همکاران (۱۳۸۶) مطابقت دارد. از آنجایی که مدیریت تقاضا و کاهش مصارف آب به عنوان یکی از راهکارهای مدیریتی و غیرسازه‌ای است که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و بررسی اثرات آن می‌تواند در حوضه‌های آبریز بیانگر ارزش این راهکار باشد، براین‌اساس، در سناریوی دوم مدل با فرض ثابت ماندن الگوی نیاز آبی به اجرا گذاشته شد نتایج تاثیر ۱۶ درصدی افزایش بهره‌برداری از منابع آب سطحی را در این هفت زیرحوضه بر کاهش تراز آب دریاچه نشان دادند که این میزان می‌تواند دریاچه را به تعادل آبی نزدیک‌تر سازد که در میان سدهای مورد بررسی، تغییرات در سد بوکان، مهاباد و علویان محسوس‌تر است. این نتایج با مطالعات چرب‌گو و همکاران (۱۳۸۹)، قابل مقایسه است.

۶- منابع

۱. ارشدی، محمد، باقری، علی (۱۳۹۲). تحلیل سیستم منابع آب حوضه کارون از منظر پایداری با رویکرد پویایی سیستم‌ها، نشریه تحقیقات منابع آب ایران، سال ۹. شماره ۳. صص ۱۳-۱.

۲. پور فلاح، حسن، مشتاق، رضا (۱۳۹۲). مدیریت منابع آب به کمک روش پویایی سیستم با استفاده از مدل Vensim مطالعه موردی: بررسی ریسک‌پذیری تأمین آب کشاورزی اراضی حوضه سد سفیدرود براثر برداشت آب موردنیاز بخش صنعت از سیستم شبکه آبیاری و هکشی سفیدرود. اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان.

۳. حسینی، احمد، باقری، علی (۱۳۹۲). مدل‌سازی پویایی سیستم منابع آب دشت مشهد برای تحلیل استراتژی‌های توسعه پایدار، مجله آب‌وفاضلاب، شماره ۴، صص ۳۹-۲۸.

۴. چرب‌گو، توحید، چرب‌گو، اکبر (۱۳۸۹). پیامدهای منفی سدسازی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تاثیر آن در خشک شدن دریاچه ارومیه، پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.

۵. گزارش ستاد احیای دریاچه ارومیه، قابل دسترس در سایت http://ulrp.sharif.ir

۶. شیخ‌خوزانی، زهره، حسینی، خسرو، رحیمیان، مهدی (۱۳۸۶). مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سیستم، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۸، شماره۲۱، صص ۶۶-۵۷.

۷. فرتوک‌زاده، حمیدرضا، قجاوند، سمیه، رجبی، میثم (۱۳۹۴). الگوسازی پویای سیستم آب منطقه تهران باهدف مدیریت مؤثر، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۲. صص ۳۶-۲۳.

۸. کارآموز، محمد. احمدی، آزاده. مریدی، علی (۱۳۸۷). مدیریت جامع منابع آب حوزه آبریز. صص ۱۳-۱.

۹. گلیان، سعید، ابریشمچی، احمد، تجریشی، مسعود (۱۳۸۶). تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم. نشریه آب‌وفاضلاب. شماره ۶۳. صص ۸۰-۷۰.

۱۰. مؤمنی، ابراهیم، تجریشی، مسعود، ابریشمچی، احمد (۱۳۸۵)، مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره با استفاده از روش پویایی سیستم، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۵۷، صص ۵۸-۴۷.

۱۱. مهندسین مشاورجاماب (۱۳۸۴). مطالعات برنامه جامع سازگاری با اقلیم، وضعیت موجود و آینده منابع آب حوزه آبریز دریاچه ارومیه، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور آب،کشاورزی و منابع طبیعی.

۱۲. مهندسین مشاور مهاب قدس (۱۳۹۱). مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، گزارش منابع آب سطحی حوضه آبریز ارومیه، وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.

۱۳. میثاقی، علی، داوری، کامران، قهرمان، بیژن، هاشمی نیا، مجید (۱۳۹۳). مدل‌سازی منابع آب در حوضه آبریز با استفاده از روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)، مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۷، شماره ۳، صص ۹۴-۸۳.

۱۴. ناصری، حمیدرضا، آدینه وند، روح‌الله، صلوی‌تبار، عبدالرحیم (۱۳۹۲). استفاده از روش پویایی سیستم در پیش‌بینی رفتار و تعیین بهره‌برداری مجاز از آبخوان دشت تبریز، نشریه علوم دانشگاه خوارزمی، دوره ۱۳، شماره ۴، صص ۹۵۰-۹۳۷.

۱۵. نوذری،حامد. حیدری،مجید. آزادی،سعید (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با روش تحلیل پویایی سیستم، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، دوره ۲۷، شماره ۴، صص ۵۶۵-۵۷۵.

16. Abadi, L. S. K. Shamsai, A. & Goharnejad, H. (2014). An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model, KSCE Journal of Civil Engineering, pp 1-9.
17. Coe, M. T. & Foley, J. A. (2001). Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin. Journal of geophysical research, 106 (D4), pp 3349-3356.
18. Duran-Encalada, J. A., Paucar-Caceres, A., Bandala, E. R., & Wright, G. H. (2017). The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. European Journal of Operational Research, Volume 256(2), pp 567-581.
19. Elmahdi, A. Malano, H. & Khan, S. (2004). A system dynamic approach and irrigation demand management Modelling. EERE 2004 Environmental Engineering Research Event 6-9 December 2004, Wollongong, NSW.
20. ELMAHDI, A. Malano, H. & Khan, S. (2006). Using a system dynamics approach to model sustainability indicators for irrigation systems in Australia. Natural Resource Modeling, Volume 19(4), pp 465-481.
21. Gies, L. (2013). Drought policy development and assessment in East Africa using hydrologic and system dynamics modeling (Doctoral dissertation, Purdue Lafayette).
22. Jones, K. & Wesselman, I. Climate Change for South Texas and Water Resource Impacts: A Specific Focus on the Agriculture Sector.
23. Khan, S. Yufeng, L. & Ahmad, A. (2007). System dynamics modeling for wat savings and conjunctive water management. InASIMMOD, Second International Conference on Simulation and Modelling, pp 9-11.
24. Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Science of the Total Environment, Volume 573, pp 444-457.
25. Sun, Y., Liu, N., Shang, J., & Zhang, J. (2017). Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. Journal of Cleaner Production, Volume 142, pp 613-625.
26. Sušnik, J. Vamvakeridou-Lyroudia, L. S. Savić, D. A. & Kapelan, Z. (2012). Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. Science of the Total Environment, Volume 440, pp 290-306.
27. Wang, X. J. Zhang, J. Y. Liu, J. F. Wang, G. Q. He, R. M. Elmahdi, A. & Elsawah, S. (2011). Water resources planning and management based on system dynamics: a case study of Yulin city. Environment, development and sustainability, Volume 13(2), pp 331-351.
28. Wang, X. J. Zhang, J. Y. Ali, M. Shahid, S. He, R. M. Xia, X. H. & Jiang, Z. (2014). Impact of climate change on regional irrigation water demand in Baojixia irrigation district of China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, pp 1-15.
29. Wu, G. Li, L. Ahmad, S. Chen, X. & Pan, X. (2013). A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin China. Water Resources Management, Volume 27(8), pp 3085-3101.

30. Xiao-jun, W. Jian-yun, Z. Shamsuddin, S. Rui-min, H. Xing-hui, X. & Xin-li, M. (2015). Potential impact of climate change on future water demand in Yulin city, Northwest China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Volume 20(1), pp 1-19.
31. Xiao-jun, W. Jian-yun, Z. Elmahdi, A. Rui-min, H. Li-ru, Z. & Feng, C. (2011). Water demand forecasting under changing environment: a System Dynamics approach. IAHS-AISH publication, pp 259-266
32. Yang, C. C. Chang, L. C. & Ho, C. C. (2008). Application of system dynamics with impact analysis to solve the problem of water shortages in Taiwan. Water resources management, Volume 22(11), pp 1561-1577.