ارزیابی سیاست‌های مواجهه با بحران حوضه آبریز «دریاچه ارومیه» با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

علیرضا لاری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
lari@ind.iust.ac.ir

جابر مهرکار

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران
jaber.mehrkar@gmail.com

میرسامان پیشوایی(نویسنده مسئول)

استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
pishvaee@iust.ac.ir

چکیده

دریاچه‌ی ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه‌ی ایران و دومین دریاچه‌ی شور جهان به شمار می‌رود. این زیست‌بوم دربرگیرنده‌ی تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی و جانوری می‌باشد. دریاچه‌ی ارومیه در شمال غربی ایران واقع شده و از اهمیت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بسزایی برای ساکنین منطقه برخوردار است. متأسفانه در سال‌های اخیر به علت مشکلات مختلف و پیچیده، تراز آب دریاچه به‌شدت کاهش‌یافته و ادامه‌ی حیات دریاچه به مخاطره افتاده است چنانچه طیِ ۱۰ سال اخیر حدود نیمی از مساحت دریاچه به دشت‌های نمک تبدیل‌شده است. پژوهش‌های بسیاری در حوضه‌ی آبریز ارومیه انجام‌شده ولی اکثر آن‌ها از مدل‌سازی پویایی حوضه‌ی آبریز به‌عنوان یک سیستم، در افق درازمدت عاجز می‌باشند. در این مقاله در راستای تبیین بحران دریاچه ارومیه به تبیین عوامل مؤثر در کاهش تراز آب دریاچه‌ی ارومیه پرداخته شده است. علاوه بر این، مدل شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز دریاچه با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها توسعه داده شده است. مدل توسعه داده شده از طریق مقایسه با داده‌های تاریخی اعتبارسنجی شده و نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل (حدود ۹۷٪) می‌باشد. سه سیاست برای افزایش دبی ورودی و تراز آبی دریاچه پیشنهاد و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که سیاست ترکیبی اثربخشی بیشتری نسبت به دو سیاست دیگر دارد. همچنین پس از اعمال سیاست‌های پیشنهادی، پیش‌بینی برای حجم دریاچه تا سال ۱۴۰۵ براساس مدل پیشنهادی صورت گرفته است.

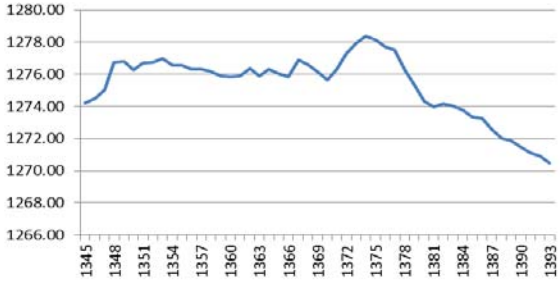
کلید واژه:

دریاچه‌ی ارومیه، مدیریت حوضه آبریز، شبیه‌سازی منابع آب، پویایی‌شناسی سیستم.

مقدمه

در هر کشوری مدیریت حوضه‌های آبریز از اهمیت بسیاری برخوردار است و مدیران سعی دارند تا با ارائه‌ی بسته‌های سیاستی، به حفاظت از این منابع طبیعی بپردازند. یکی از این حوضه‌های آبریز خاورمیانه، دریاچه‌ی ارومیه در شمال غربی ایران می‌باشد. این دریاچه که در زبان محلی چی‌چَست نامیده می‌شود بزرگ‌ترین و شورترین دریاچه‌ی دائمی ایران و دومین دریاچه‌ی فوق اشباع از نمک در دنیاست [۱]. حوضه‌ی آبریز ارومیه بخش‌هایی از سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان را شامل می‌شود. به علت وسعت و تنوع گونه‌های زیستی موجود در آن به یک پارک ملی تبدیل‌شده و از سال ۱۳٤٦ منطقه‌ی حفاظت‌شده اعلام شده است. منافع حاصل از این حوضه‌ی آبریز شامل توریسم، تفرج، برداشت

نمک، لجن درمانی، صید آرتمیا[1]، چراگاه دام، تعدیل آب‌وهوا و... می‌باشد [۲]. متأسفانه موازنه‌ی آبی دریاچه طی سالیان اخیر برهم‌خورده و سطح آب کاهش چشم‌گیری داشته است. اهمیت این حوضه‌ی آبریز برای شمال غرب ایران به نحوی است که خشک شدن آن، هم‌اکنون به یک معضل ملی تبدیل‌شده و سیاست‌گذاری مؤثر و زودبازده را برای آینده طلب می‌کند. هم‌اکنون ارتفاع آب دریاچه نسبت به سال ۱۳۷۵ (اوج پرآبی) بیش از ٦ متر، نسبت به سطح تراز مصوب پارک ملی دریاچه ارومیه بیش از ٥ متر، نسبت به میانگین ٤٠ سال گذشته بیش از ٤ متر و نسبت به تراز اکولوژیکی[2] (یعنی ترازی که در آن ویژگی‌های زیستی و غیر زیستی دریاچه تأمین‌شده و غلظت نمک آن به‌ویژه برای موجودات حوضه آبریز قابل‌تحمل باشد) تقریباً ۳ متر کاهش‌یافته است. شکل (۱) نوسانات تراز آب دریاچه را برحسب متر نشان می‌دهد.



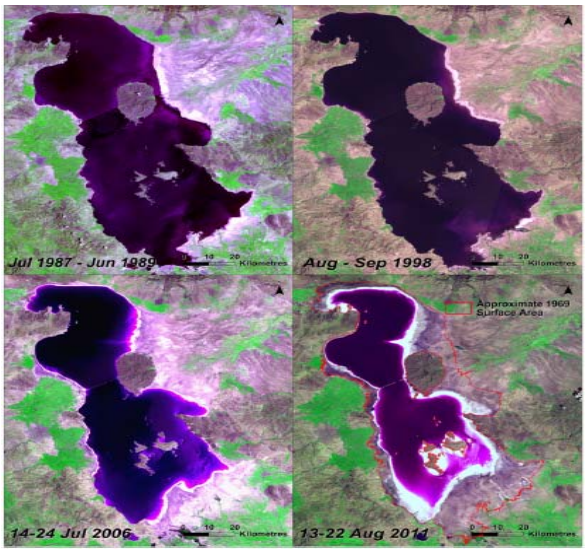
شکل (۱): نوسان تراز آب دریاچه‌ی ارومیه از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۳

کاهش محسوس تراز آب دریاچه از سال ۱۳۷۷ به علت خشک‌سالی آغاز شد. این خشک‌سالی، سه سال دوام داشت به‌طوری‌که حجم آب ورودی در عرض این سه سال از ۱۵ میلیارد مترمکعب به کمتر از دو میلیارد مترمکعب کاهش یافت حال‌آنکه خروجی آب از دریاچه به شکل تبخیر در عرض همان سه سال، بیش از ۱۵ میلیارد مترمکعب بود. بنابراین دریاچه با کسری ۱۳ میلیارد مترمکعبی برای برقراری تعادل مواجه گردید و ارتفاع آن تقریباً ۲,۵ متر کاهش یافت. از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۳۹۰ به‌طور متوسط، سالانه ۳۰ سانتی‌متر از ارتفاع آب کاهش‌یافته است به‌طوری‌که در عرض ده سال، تراز آبی این دریاچه حدود ۳ متر پایین آمده است.

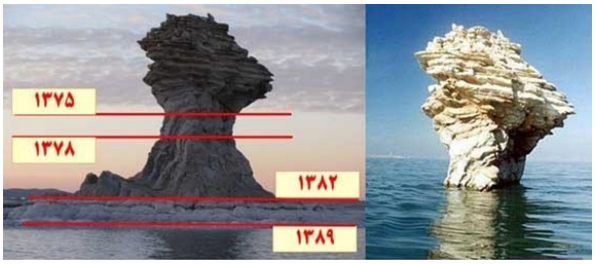
میزان شوری آب دریاچه‌ی ارومیه، از ۲۰۰ گرم بر لیتر به حدود ۳۵۰ الی ٤٠٠ گرم بر لیتر (که حالت فوق اشباع می‌باشد) رسیده است. بنابراین امروزه دریاچه‌ی ارومیه شورترین پهنه‌ی آبی دنیاست. شوری بیش‌ازحد آب، باعث کاهش محسوس جمعیت آرتمیای موجود در آب دریاچه شده است [۳]. آرتمیا موجودی آبزی در آب‌های شور است که ازنظر اقتصادی، پزشکی و تأمین غذای پرندگان حائز اهمیت است. افزایش دما یکی از عوامل طبیعی تأثیرگذار در کاهش تراز آب دریاچه‌ی ارومیه به شمار می‌رود. افزایش دمای حوضه، باعث افزایش تبخیر آب از سطح دریاچه، که تنها راه خروج آب از دریاچه می‌باشد، گردیده است [٤]. بخش عمده‌ی بارش در این حوضه، از فصل پاییز تا اواسط بهار رخ می‌دهد. با مراجعه به آمار بارش در حوضه آبریز ارومیه، متوجه می‌شویم که متوسط بارش در این حوضه در دهه‌ی ٤٠ و ٥٠ به‌مراتب کمتر از دهه‌های اخیر بوده اما دریاچه باوجود عقب‌نشینی‌های کوتاه‌مدت درگذشته، هیچ‌گاه چنین وضعیت بحرانی را تجربه نکرده است. بنابراین نمی‌توان تنها علت پس‌روی سالیانه‌ی آب دریاچه را پدیده‌ی خشک‌سالی دانست.

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات حوضه‌ی آبریز ارومیه، آبیاری سنتی با هدررفت آب زیاد و بازدهی بسیار پایین حدود ۳۰ درصدی است [٥]. علاوه بر آن، کاشت محصولاتی با نیاز آبی زیاد اما غیراستراتژیک و عدم استفاده از الگوی کشت مناسب برای تولید محصولات کشاورزی با نیاز آبی کمتر و درنهایت رشد جمعیت در دهه‌های اخیر و اشتغال عمده‌ی اهالی حوضه در بخش‌های کشاورزی، سبب کاهش حقابه دریاچه‌ی ارومیه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده

است. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر خشک شدن دریاچه، افزایش مساحت زمین‌های کشاورزی و آب مصرفی آن‌ها می‌باشد. ابتدای دهه‌ی ۷۰ که وسعت دریاچه در حال گسترش بود، بدون توجه به ظرفیت دریاچه، زمین‌های کشاورزی به‌طور قابل‌توجهی رشد کردند و آب برداشتی از منابع سطحی و زیرزمینی نیز افزایش یافت. با توجه به توسعه‌ی بی‌رویه‌ی زمین‌های کشاورزی و اشتغال اکثر اهالی به کشاورزی، سیاستی که بتواند بین کاهش آب برداشتی برای بخش کشاورزی و خشک شدن زمین‌های کشاورزی به علت کمبود آب، توازن برقرار کند از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب روند خشک شدن دریاچه و کاهش تراز آب دریاچه را نشان می‌دهند.



شکل (۲): روند خشک شدن دریاچه از روی تصاویر ماهواره‌ای [۱۰]



شکل (۳): مقایسه تراز آب دریاچه طی سالیان اخیر

علی‌رغم سابقه‌ی به نسبت طولانی استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم[۳] در حوضه‌ی مسائل زیست‌محیطی [۶و۷]، این رویکرد پیرامون مسائل زیست‌محیطی و حوضه‌های آبریز در ایران به‌ندرت مورداستفاده قرارگرفته است [۸و۹]. ازاین‌رو در این مقاله با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، مدلی برای تحلیل رفتار متغیرهای تأثیرگذار بر کاهش حجم آب دریاچه‌ی ارومیه ارائه شده است. با توجه به عوامل فراوان و مرتبط به هم در کاهش حجم دریاچه، جای خالی رویکردی سیستمی و جامع‌نگر که نه‌تنها تمامی ابعاد و جوانب مسئله را دربر گیرد بلکه بتواند پویایی حاکم بر سیستم را نیز به‌خوبی مدل کند، بسیار احساس می‌شود. بنابراین در اینجا از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم که علاوه بر ویژگی‌های فوق، قابلیت مدل کردن روابط غیرخطی و تأخیری را نیز دارا می‌باشد، استفاده شده است. از دیگر مزایای این رویکرد کمک به تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی رفتار در آینده است. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم این امکان را به تصمیم‌گیران امر می‌دهد که نتایج سیاست‌های پیشنهادی در مورد آینده را پیش از اتخاذ آن‌ها مشاهده نمایند و اثربخش‌ترین

سیاست را برای پیاده‌سازی برای حل مشکل به کار بگیرند. این قابلیت که از شبیه‌سازی رفتار آینده‌ی دریاچه به دست می‌آید از ویژگی‌های برجسته‌ی رویکرد پویایی‌شناسی سیستم می‌باشد. در این مقاله بخش کشاورزی به دلیل اهمیت آن به‌طور خاص مورد توجه و تأثیرگذاری سیاست افزایش بازده آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعات انجام شده بر روی دریاچه‌ی ارومیه اگرچه بر بخش کشاورزی و اصلاح روش‌های آبیاری و الگوی کشت تأکید شده است اما هیچگاه با نگاه سیستمی به این موضوع پرداخته نشده است. از دیگر نوآوری‌های این مقاله که آن را از سایر کارها متمایز می‌کند، سیاست‌گذاری بر مقدار استفاده از آب ذخیره‌ی سدها برای کشاورزی می‌باشد. برخی متغیرهای کلیدی در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی شامل متغیرهای مربوط به بخش کشاورزی همانند بازده آبیاری، مساحت انواع زمین زیر کشت، نیاز آبی پس از بهبود راندمان، درصد بازگرداندن آب سدها به دریاچه و همچنین متغیرهای محیطی مانند بارش، رطوبت، دما و ضریب شوری می‌باشد. در نظر گرفتن طیف وسیعی از متغیرهای دنیای واقعی و مدل‌سازی ارتباطات غیرخطی آن‌ها از دیگر برجستگی‌های مدل پیشنهادی است. با توجه به اهمیت تاثیر عواملی نظیر فعالیت‌های کشاورزی و ساخت سدهای فراوان بر کاهش تراز دریاچه‌ی ارومیه و همچنین تعداد اندک کارهای انجام‌شده با نگاه سیستمی پیرامون این معضل ملّی، در این پژوهش با تمرکز بر بحث کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، راه-کارهایی در ارتباط با افزایش بازده کشاورزی و سرازیر کردن آب سدها به دریاچه پیشنهاد شده است.

در ادامه‌ی این پژوهش در بخش (۲) به مرور ادبیات موضوع پرداخته شده است. در بخش (۳) به تعریف مسئله و مدل-سازی و در بخش (٤) به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و اعتبارسنجی مدل خواهیم پرداخت. تحلیل سیاست-های پیشنهادی برای بهبود وضعیت دریاچه و نتایج حاصل از آن‌ها در بخش (٥) مورد بحث قرار گرفته است. پیش‌بینی از حجم دریاچه در بخش (٦) ارائه شده است. بخش (۷) نیز به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی اختصاص یافته است.

۲- مرور ادبیات

یکی از بهترین ابزارهای موجود در زمینه‌ی علوم سیستمی که علاوه بر نگاه یکپارچه و کلی‌نگر به مسئله‌ی مورد نظر، قادر به نمایش پویایی‌های حاکم در حوضه‌های آبریز نیز می‌باشد، رویکرد پویایی‌شناسی سیستم می‌باشد [۱۱-۱۳]. فارستر[٤] به عنوان بنیان‌گذار این رویکرد، در سال ۱۹٦۱ کتابی با نام «پویایی‌شناسی صنعتی» را به رشته‌ی تألیف درآورد [۱۱]. استرمن[٥] که از شاگردان فارستر بود نیز در سال ۲۰۰۰ کتابی را با عنوان «پویایی‌شناسی کسب‌وکار» به چاپ رساند که تحول بزرگی در استفاده از این رویکرد سیستمی ایجاد نمود [۱۳]. همچنین فورد[٦] در سال ۱۹۹۹ کتابی برای مدل‌سازی پویایی سیستم‌های زیست‌محیطی نوشت [٦]. نویسنده‌ی این کتاب، برنده‌ی جایزه‌ی سال ۱۹۹٦ از بنیاد «دینامیک سیستم» نیز بوده است. از آنجا که تصمیمات در حوضه‌ی منابع آب بسیار حیاتی و استراتژیک می‌باشند و در بسیاری از موارد امکان تغییر سیاست‌ها پس از اعمال آن‌ها وجود ندارد بایست از پیامد حاصل از اجرای سیاست قبل از اتخاذ آن با خبر باشیم. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم علاوه بر شبیه‌سازی، امکان مشاهده‌ی نتایج حاصل از اعمال سیاست‌های پیشنهادی را به مدیران و مسئولین می‌دهد و برای تصمیم‌گیری در مورد آینده به آن‌ها کمک شایانی می-کند. این رویکرد در بسیاری از مطالعات منابع آب و دیگر حوزه‌های زیست‌محیطی استفاده شده و یکی از قوی‌ترین ابزارها برای شبیه‌سازی منابع آبریز و تصمیمات پیرامون آن می‌باشد.

پژوهش‌های بسیاری در حوضه‌ی مدیریت منابع آب در ایران و سایر کشورها صورت گرفته است. که در ادامه به ذکر برخی از آن‌ها می‌پردازیم. پالمر[۷] و همکاران از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای مدیریت منابع آب و شبیه‌سازی مطالعات خشکسالی بهره برده‌اند. [١٤]. سیمونوویچ[۸] و همکاران نیز از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای شبیه‌سازی

و ارزیابی حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی نیل در مصر استفاده کردند [۱۵]. آن‌ها از این ابزار برای تخصیص بهینه‌ی آب به بخش کشاورزی و شناسایی تأثیرات سناریوهای مختلف در آن حوضه بهره بردند. فلچر[۹] نیز از رویکرد مزبور به‌عنوان یک ابزار برای تصمیم‌گیری در مورد مدیریت منابع آب در شرایط خشکسالی استفاده نمود [۷]. همچنین گو[۱۰] و همکاران از این رویکرد برای مطالعه‌ی تأثیرات سیاست‌های دولت چین بر کیفیت آب دریاچه اِرهای[۱۱] با توجه به عوامل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی استفاده کردند [۱۶]. در مدل پیشنهادی آن‌ها، سیستم جامعی از مؤلفه‌های زیست-محیطی، اقتصادی و اجتماعی از دریاچه تهیه‌شده و تأثیرات چهار سیاست بر روی آن بررسی‌شده است. شبیه‌سازی تصمیمات پیشنهادی در مورد کیفیت آب دریاچه و ارائه نتایج آن‌ها از مزایای این مدل است. اِسکِبِد[۱۲] و همکاران تأثیر بیلان آبی دریاچه تانا[۱۳] در اتیوپی را بر روی تغییرات تراز آب آن شبیه‌سازی کرده و تأثیر تغییرات بارندگی و تبخیر از سطح دریاچه و همچنین میزان جریان و خروجی و ورودی به آن را محاسبه و ارائه داده‌اند [۱۷]. جلالی و همکاران در مطالعه‌ای به کمک تحلیل پویایی‌شناسی سیستم، روندیابی سیل را در سیستم‌های چند مخزنی بر روی رودخانه‌ی کارون شبیه‌سازی کرده و مزایای این رویکرد را نسبت سایر روش‌ها مورد بحث قرار دادند [۱۸]. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم همچنین برای تخصیص بهینه‌ی منابع آب در حوضه‌ی آبریز سان جوآن[۱۴] در ایالات متحده، مابین ایالات کلرادو و نیومکزیکو، توسط ایورز[۱۵] مورداستفاده قرارگرفته است [۱۹]. صلوی تبار و همکاران در مقاله‌ای با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم مدلی برای مدیریت آب شهر تهران ارائه داده‌اند [۸]. نتایج حاصل از این تحلیل، به‌وضوح علل کاهش منابع آب را به مدیران نشان می‌دهد. همچنین این مدل روند تغییرات بیلان آب در آینده، تأثیر اجرای سیاست‌های مدیریتی همانند انتقال بین حوضه‌ای آب، اجرای طرح جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و مدیریت تقاضا را نشان می‌دهد. گلیان و همکاران از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای شناسایی اثر سیاست‌های اعمالی بر رودخانه‌ی آجی‌چای در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه بهره برده‌اند [۹]. مک‌بین[۱۶] اثرات تغییر اقلیم و رشد سریع جمعیت بر منابع آب را موردبررسی قرار داده است [۲۰]. لیو[۱۷] و همکاران از یک مدل شبیه‌سازی که بر پایه‌ی رویکرد پویایی‌شناسی سیستم ارائه‌شده بود برای شناسایی تأثیر افزایش جمعیت شهری بر دریاچه‌ی کیونگ‌های و زیست‌بوم پیرامون آن پرداختند [۲۱]. مجتهدزاده نیز مدلی برای شبیه‌سازی پویایی مسائل آبی شهر یزد توسط نرم‌افزار دینامو[۱۸] ارائه داده است [۲۲]. رفتار متغیرهای مهم در این مدل تحت سیاست‌هایی مثل کنترل جمعیت، انتقال آب، بهبود روش‌های آبیاری و ... بررسی‌شده است. جلالی و افشار برای بهره‌برداری از سدهای برقابی مدلی بر اساس پویایی‌شناسی سیستم ارائه کردند [۲۳]. در این مدل به‌راحتی می‌توان راه‌کارهای مدیریتی و منحنی‌های فرمان را اعمال کرده و با سرعت پردازش بالایی به حل مسئله پرداخت. مطیعی نیز تأثیرات تغییرات آب‌وهوا و خشکسالی را بر منابع آب کانادا موردمطالعه قرار داده است [۲۴]. در این تحقیق آمارهای بارندگی در حوضه‌ی آبریز، رواناب حوضه و تراز آب دریاچه، موردبررسی و تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است. دلاور و همکاران در پژوهشی به شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و پیش‌بینی تغییرات تراز آب دریاچه‌ی ارومیه نسبت به مؤلفه‌های بیلان آبی با استفاده از روش‌های مختلفی مانند معادله‌ی بیلان آبی دریاچه، معادله‌ی همبستگی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته‌اند [۲۵]. همچنین مدنی و مارینو[۱۹] از رویکرد پویایی سیستم برای مدیریت حوضه‌ی آبریز زاینده‌رود در ایران استفاده کرده‌اند [۲۶]. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای مدیریت منابع آب در شرایط بحران نیز مورد استفاده قرار گرفته است که در این زمینه می‌توان به پژوهشی که توسط باقری و همکاران برای شبیه‌سازی بحران آب، بعد از زلزله‌ی سال ۲۰۰۳ شهرستان بم در ایران، انجام‌شده است اشاره کرد [۲۷]. حسن‌زاده و همکاران از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای شناسایی عوامل اصلی در کاهش تراز دریاچه ارومیه استفاده کردند [۳]. بعد از صحت‌سنجی موفق مدل، آن‌ها نشان دادند از میان عوامل مؤثر، تغییرات اقلیمی و استفاده بیش‌ازحد مجاز از منابع آب سطحی مهم‌ترین عوامل و حدود ۶۵ درصد در خشکی دریاچه

تأثیر دارد. همچنین آن‌ها نشان دادند ساخت ٤ سد دارای تأثیر ۲۵ درصدی و کمبود بارش در حوضه‌ی دریاچه، ۱۰ درصد در کاهش تراز دریاچه در سال‌های اخیر تأثیرگذار می‌باشد. در ادامه ضرغامی و اکبریه یک مدل پویایی‌شناسی سیستم برای مدیریت منابع آب شهر تبریز ارائه دادند [۲۸]. مدل پیشنهادی آن‌ها برای بلندمدت طراحی‌شده و قابلیت اجرا تا سال ۲۰۲۰ را دارا است. همچنین به دلیل خشک شدن دریاچه‌ی ارومیه و تبدیل‌شدن آن به یک بحران ملی، در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی در حوضه‌ی آبریز ارومیه و برای رهایی دریاچه از خشک شدن همیشگی در ایران انجام‌شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها می‌پردازیم.

رسولی و عباسیان طی تحقیقی به کمک سری‌های زمانی به توصیف ترسیمی داده‌های سطح آب دریاچه‌ی ارومیه پرداختند [۲۹]. یافته‌های نهایی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی تغییرات معنی‌داری در تراز سطح آب دریاچه‌ی ارومیه بود. نظرنژاد نیز در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر در کاهش سطح آب دریاچه‌ی ارومیه پرداخته است [۳۰]. وی نشان داد که علاوه بر تأثیر طرح‌های عمرانی و سدسازی بر روی رودخانه‌های این حوضه، عوامل دیگری مانند کاهش بارش، کاهش جریان رودخانه‌ها ، افزایش درجه‌ی حرارت و در پی آن افزایش تبخیر از سطح آب، خشک‌سالی‌های اخیر، افزایش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت مصارف گوناگون درجدول (۱): مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته

هدف	روش مدل‌سازی	کاربرد مدل	مقاله مرجع
مدیریت آب شهری، پیش‌بینی	پویایی‌شناسی سیستم	شهر تبریز	ضرغامی و اکبریه [۲۸]
شناسایی عوامل اصلی کاهش تراز آب	پویایی‌شناسی سیستم	دریاچه ارومیه	حسن‌زاده و همکاران [۳]
مدیریت بحران در هنگام زلزله	پویایی‌شناسی سیستم	شهرستان بم	باقری و همکاران [۲۷]
پیش‌بینی تأثیر سیاست‌های دولت چین	پویایی‌شناسی سیستم	دریاچه ارهای	گو و همکاران [۱۶]
بررسی روند وقوع سیل	پویایی‌شناسی سیستم	رودخانه کارون	جلالی و همکاران [۱۸]
مدیریت حوضه آبریز زاینده‌رود	پویایی‌شناسی سیستم	زاینده‌رود	مدنی و مارینو [۲۶]
شبیه‌سازی سد اِسفان در حوضه آبریز نیل برای تخصیص بهینه آب به کشاورزی تحت سناریوهای مختلف	پویایی‌شناسی سیستم	رود نیل	سیمونویچ و همکاران [۱۵]
شناسایی تأثیر افزایش جمعیت بر تراز آب دریاچه و اکوسیستم پیرامون آن	پویایی‌شناسی سیستم	دریاچه ارومیه	لیو و همکاران [۲۱]
مدیریت بهینه منابع آب در حوضه آبریز سان جوآن در ایالات‌متحده	پویایی‌شناسی سیستم	حوضه آبریز سان جوآن	ایورز [۱۹]
روند تغییرات بیلان آب در آینده، تأثیر سناریوهای مدیریتی، مدیریت تقاضا	پویایی‌شناسی سیستم	آب شهر تهران	صلوی‌تبار و همکاران [۸]

در حوضه‌ی مدیریت منابع آب با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

این حوضه به‌خصوص در بخش کشاورزی، صنعت و آبزی‌پروری نیز این کاهش مؤثر بوده‌اند. خانی‌تملیه و همکاران به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه پرداختند [۳۱]. آن‌ها نشان دادند که با توجه به ویژگی‌های اقلیمی منطقه و مقایسه‌ی آن با اقلیم نواحی دیگر، میزان دما در حدی نبوده که بتوان تغییرات سطح آب دریاچه را به‌طور کامل به تغییرات اقلیمی نسبت داد و البته از اثرات تغییر اقلیم نیز نباید غافل شد. طباطبایی طی پژوهشی به بررسی علل اُفت آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ی شرق دریاچه‌ی ارومیه پرداخته است [۳۲]. وی نشان داده که بر اساس نقشه‌های گرفته‌شده از دشت‌ها، تراز سفره‌های زیرزمینی در این دشت‌ها در طول سالیان اخیر کاهش‌یافته است. در این مطالعه عوامل اصلی اُفت تراز آب‌های زیرزمینی در دشت‌های مذکور، کمبود بارندگی و برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی در نظر گرفته‌شده است. جهانبخش و همکاران نیز به شناسایی ارتباط بین فعالیت لکه‌های خورشیدی (عامل عمده‌ی کنترل‌کننده‌ی تغییرات طبیعی اقلیم) با نوسان‌های سطح آب دریاچه و پارامترهای مؤثر بر این نوسان‌ها مانند دما و ... پرداختند و نشان دادند که سطح آب دریاچه‌ی ارومیه دارای نوسان‌های دوره‌ای معنی‌دار می‌باشد [۳۳]. بر اساس نتایج این تحقیق، بین نوسان‌های سطح آب دریاچه و لکه‌های خورشیدی، همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشته و فعالیت-های خورشیدی تنها عامل طبیعی مؤثر در نوسان‌های سطح آب دریاچه‌ی ارومیه در بلندمدت محسوب می‌گردند. ناصری و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم، مدل مخزن سد شهرچای (واقع در

شهرستان ارومیه) را برای بهره‌برداری تلفیقی و مدیریت منابع آب در این سد ارائه دادند [۳٤]. این سد بر روی رودخانه‌ی شهرچای می‌باشد که به دریاچه ارومیه منتهی می‌شود. نتایج حاصل از پیش‌بینی توسط مدل برای چهار سال آینده نشان‌دهنده‌ی این است که تأمین کل نیاز آب شرب و صنعت از مخزن سد، در شرایطی که سایر عوامل و پارامترهای محدوده ثابت بمانند صحیح نمی‌باشد. احمدزاده و همکاران طی پژوهشی حوضه‌ی آبریز ارومیه را به لحاظ خشکسالی به دو ناحیه‌ی شمالی و جنوبی تقسیم کردند [۳۵]. آن‌ها در این تحقیق از روش خوشه‌بندی و شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی هواشناسی سه و شش‌ماهه استفاده کردند. پوراصغر و همکاران نیز در مطالعه‌ای به بررسی تأثیرات انتشار نمک حاصل از خشک شدن دریاچه به محیط پیرامون آن در اثر وزش باد پرداختند [۳٦]. آن‌ها به کمک سامانه‌های جوی نشان دادند که حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه به‌جز نواحی شرقی (سهند، تبریز) به سمت باد غالب جنوب غربی- جنوبی می‌باشد و وزش باد در فصول مختلف، ذرات نمک حاصل از خشک شدن دریاچه را به نواحی اطراف آن منتقل می‌کند که در این میان نواحی جنوبی، شرقی و شمال شرقیِ مجاور دریاچه بیشترین زیان را از انتشار نمک خواهند دید و این امر مشکلات جدی در بخش کشاورزی و زیست‌محیطی برای ساکنین منطقه ایجاد خواهد کرد. در پایان این بخش، خلاصه‌ای از مهم‌ترین مقالات بررسی‌شده به همراه ویژگی‌های آن‌ها در جدول (۱) آمده است.

با توجه به مطالب بیان‌شده مشخص می‌گردد که اکثر مطالعات پیشین به بررسی و رفع مشکل دریاچه از یک جنبه‌ی خاص پرداخته و از پویایی‌هایی حاکم بر سیستم‌های حوضه‌ی آبریز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابعاد این سیستم‌های زیست‌محیطی غافل بوده و رویکردی که با نگاه سیستمی به حل معضل دریاچه‌ی ارومیه بپردازد به‌ندرت به چشم می‌خورد [۳و٥]. در این مقاله با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم علاوه بر نگاه سیستمی و یکپارچه به بحران دریاچه‌ی ارومیه، پویایی حاکم بر این سیستم در ارتباط با متغیرهای تأثیرگذار نیز به‌خوبی نشان داده‌شده است و سیاست‌هایی برای بازیابی آب این دریاچه پیشنهادشده است. پویایی‌ها و روابط بازخوردی این سیستم سبب تشکیل چندین حلقه و بالا رفتن پیچیدگی مدل پیشنهادی شده است. بنابراین در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های پویا با روابط غیرخطی نه‌تنها مدل را واقعی‌تر نشان داده بلکه نتایج حاصل از آن را نیز قابل‌اعتمادتر می‌کند.

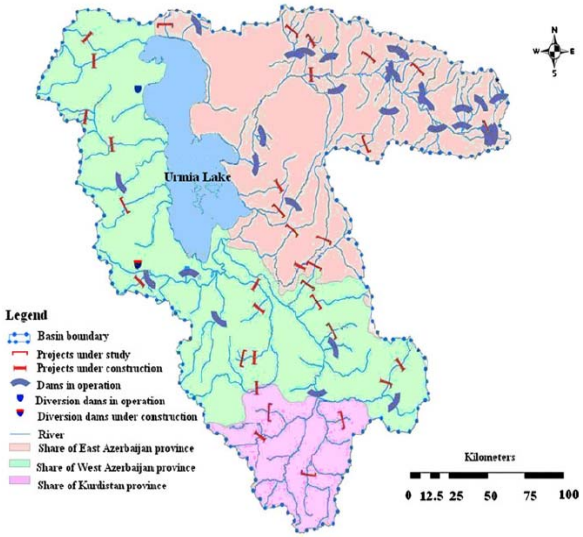
۳- تعریف مسئله و مدل‌سازی

۳-۱- معرفی حوضه‌ی آبریز ارومیه

حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه یکی از شش حوضه‌ی آبریز اصلی کشور می‌باشد. دریاچه‌ی ارومیه که شورترین دریاچه‌ی ایران و دومین دریاچه‌ی فوق اشباع از نمک در دنیاست، در یک حوضه‌ی آبریز بسته در شمال غرب ایران و بین مختصات ´۰٤ °۳۷ تا ´۱۷ °۳۸ طول شمالی و °٤٥ تا °٤٦ طول شرقی قرار دارد [۱]. بیشینه‌ی مساحتی که از این دریاچه درگذشته به ثبت رسیده، ۵۷۰۰ کیلومترمربع می‌باشد [۳۷]. اگرچه دریاچه‌ی ارومیه بین دو استان آذربایجان شرقی و غربی قرارگرفته ولی حوضه‌ی آبریز این دریاچه شامل قسمت‌هایی از استان کردستان نیز می‌شود. علاوه بر این به علت اهمیت اکولوژیکی دریاچه‌ی ارومیه، این دریاچه به‌عنوان یک پارک ملی و همچنین ذخیره‌گاه بین‌المللی زیست‌کره شناخته‌شده است [۳۸]. شکل‌های (٤) و (٥) به ترتیب موقعیت دریاچه‌ی ارومیه و طرح‌های توسعه و سدهای بهره‌برداری شده در حوضه‌ی آبریز آن را نشان می‌دهند.

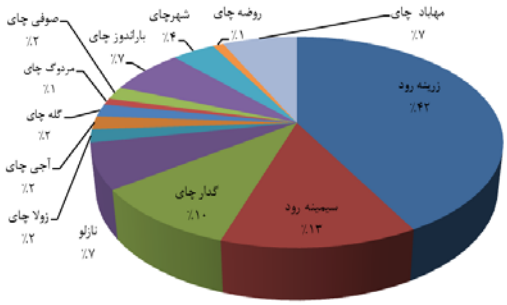
شکل (۴): موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه

ازنظر تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی ایران، این حوضه بخشی از مجموعه حوضه‌ی آبریز مرکزی بوده و از شمال و شرق به حوضه‌ی آبخیز ارس، از جنوب به حوضه‌ی آبخیز قزل‌اوزن و از غرب به کشورهای ترکیه و عراق محدود می‌شود. حدود ۵۰٪ از آب ورودی به دریاچه توسط دو رودخانه‌ی زرینه‌رود و سیمینه‌رود در جنوب این دریاچه تأمین می‌گردد. درمجموع ٦ رودخانه‌ی زرینه‌رود، سیمینه‌رود



شکل (۵): موقعیت طرح‌های توسعه و سدها در حوضه آبریز ارومیه

گدارچای، نازلو، باراندوزچای و مهابادچای بیش از ۸۵٪ از آب سطحی ورودی به دریاچه را تأمین می‌کنند. شکل (٦) درصد تأمین آب دریاچه توسط رودخانه‌های ورودی به آن را نشان می‌دهد.



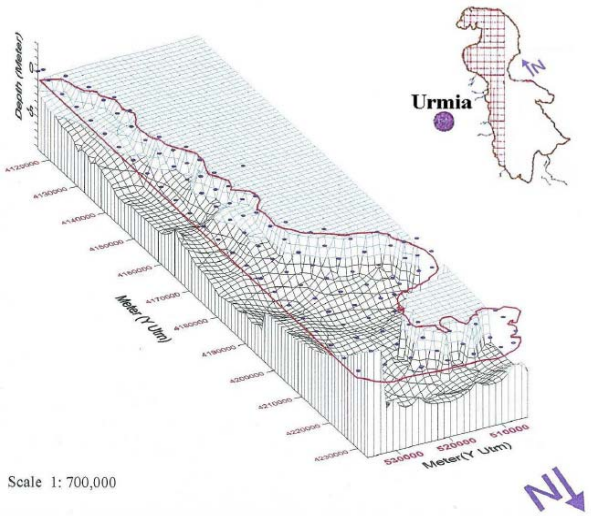
شکل (۶): مقایسه سهم دبی ورودی به دریاچه از رودخانه‌های مختلف از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ میلادی [۳۷]

همچنین دریاچه‌ی ارومیه ازلحاظ زمین‌شناسی، بستری بسیار ناصاف و غیرمسطح دارد که این امر به کمک نقشه‌های هیدروگرافی[۲۰] یا آب‌نگاری که از بستر دریاچه تهیه‌شده به‌وضوح مشخص می‌باشد. شکل (۷) ناهمواری مربوط به قسمت غربی بستر دریاچه را به‌وضوح نمایش می‌دهد.

اگر بخواهیم یک دسته‌بندی از عوامل مؤثر در ایجاد خشکسالی و نابودی زیست‌بوم دریاچه‌ی ارومیه ارائه دهیم می‌توان به دو دسته‌ی زیر اشاره کرد:

۱- عوامل طبیعی: مانند کاهش نزولات جوی، افزایش دما و ... به‌عبارت‌دیگر عوامل طبیعی را می‌توان همان تغییر اقلیم منطقه دانست.

۲- عوامل انسانی: مانند افزایش جمعیت و در پی آن برداشت بیش‌ازحد مجاز از آب رودخانه‌ها برای بخش کشاورزی و همچنین برداشت غیرمجاز از آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های متعدد، احداث بزرگراه شهید کلانتری بر روی دریاچه، احداث سدهای متعدد



شکل (۷): ناهمواری نیمه‌ی غربی بستر دریاچه ارومیه [۳۷]

و... که آب ورودی به دریاچه را محدود می‌کند.

می‌توان این‌گونه به موضوع نگاه کرد که اصولاً عوامل طبیعی خارج از حیطه‌ی کنترل ماست؛ هرچند دخالت‌هایی که انسان در طبیعت انجام داده عامل بسیاری از بحران‌های طبیعی است ولی آنچه واضح است در کوتاه‌مدت نمی‌توان تغییر زیادی بر اقلیم منطقه گذاشت و تغییرات اقلیمی معمولاً در یک دوره زمانی بلندمدت حاصل می‌شود. بنابراین برای ارائه‌ی یک راهکار واقع‌بینانه بهتر است این عوامل را به‌عنوان متغیرهای برون‌زا۲۱ در نظر گرفت. اما این بدان معنی نیست که کاهش تراز آب دریاچه تأثیری در اقلیم ازجمله دما، رطوبت، میزان بارش و ... نداشته است.

ورودی‌های به دریاچه شامل بارش، آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد. اما خروجی عمده‌ی دریاچه تنها به‌صورت تبخیر می‌باشد [٤]. به دلیل عدم توزیع یکنواخت شوری در سرتاسر دریاچه‌ی ارومیه، تلاطم‌های غیریکنواخت در سطح دریاچه، سرعت باد متفاوت در نقاط مختلف دریاچه و ... اندازه‌گیری مقدار تبخیر از سطح دریاچه به روش مستقیم امکان‌پذیر نیست. در بخش بعد به‌طور خلاصه در مورد روش محاسبه‌ی تبخیر توضیح داده خواهد شد.

با توجه به مطالب بیان‌شده به اهمیت این منبع طبیعی پی بردیم. در ادامه‌ی این بخش به بیان تعریف مسئله، روش‌شناسی، تعریف متغیرهای کلیدی و مدل‌سازی مسئله‌ی موردنظر خواهیم پرداخت.

۳-۲- تعریف مسئله

مدل پویایی‌شناسی سیستم موردبررسی در این تحقیق مربوط به حوضه‌ی آبریز ارومیه می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی رفتار حجم دریاچه در یک بازه‌ی ۱۵ ساله بین سال‌های ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۰ می‌باشد. با توجه به این‌که آب به‌صورت پیوسته در سیستم حوضه‌ی آبریز جریان دارد لذا رفتار مدل نیز در هرلحظه از زمان قابل‌بررسی است و این از تفاوت‌های این مدل با مدل‌های مربوط به کالاهای گسسته می‌باشد. با توجه به این‌که نزدیک به ۹۰٪ آب حوضه‌ی آبریز ارومیه در بخش کشاورزی و بقیه در بخش‌های صنعتی و خانوار مصرف می‌شود بنابراین بیشتر تمرکز در این پژوهش بر روی متغیرهای بخش کشاورزی می‌باشد. در این مدل دما به‌صورت متغیر برون‌زا در نظر گرفته‌شده زیرا تغییرات دمای ناشی از نوسانات حجم دریاچه، در بلندمدت حاصل می‌شود و تغییرات کوتاه‌مدت دما به دلیل گرم شدن سراسری زمین طی چند سال اخیر می‌باشد. همچنین جمعیت نیز به‌صورت برون‌زا لحاظ شده است زیرا تغییر در حجم دریاچه و پیامدهای ناشی از آن تاکنون تأثیر چندانی بر نرخ افزایش یا کاهش جمعیت نداشته است و نرخ خالص رشد جمعیت در این حوضه، همنوا با سایر نقاط کشورمان می‌باشد. زمین‌های کشاورزی نیز به تفکیک نیاز آبی گیاهان در نظر گرفته‌شده‌اند. بنابراین سه نوع مزرعه داریم: ۱- مزارع گیاهان با نیاز آبی کم ۲- مزارع گیاهان با نیاز آبی متوسط ۳- مزارع گیاهان با نیاز آبی زیاد. بازده فعلی آبیاری کشاورزی ۳۵٪ در نظر گرفته‌شده که قصد داریم با اعمال سیاست بهبود آن را افزایش داده و تأثیر آن را بر روی حجم آب دریاچه نشان دهیم. همچنین فرض این است که آب موردنیاز در بخش کشاورزی از دو منبع سفره‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی (رودخانه‌ها و سدها) تأمین می‌گردد. آب رودخانه‌ها بعد از تأمین نیاز کشاورزی به دریاچه سرازیر می‌شود و عمده‌ی ورودی دریاچه را در کنار جریان آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهد. در این مدل همچنین تنها خروجی قابل‌توجه از دریاچه به‌صورت تبخیر در نظر گرفته‌شده است. فرض دیگر مدل پیشنهادی این است که عمده‌ی آب پشت سدها برای کشاورزی استفاده می‌شود؛ بنابراین برای حل بحران دریاچه، قصد داریم تا با اعمال سیاست‌گذاری مناسب مقداری از آب پشت سدها را که برای آبیاری کشاورزی استفاده می‌شود به دریاچه برگردانیم. فرض دیگرمان این است که شدت تبخیر سالیانه از آب شیرین در مدت‌زمان شبیه‌سازی تقریباً ثابت می‌باشد. همچنین شوری آب دریاچه برحسب حجم دریاچه عددی بین ۰ و ۱ فرض شده که در حالت بیشینه‌ی شوری آب دریاچه، ضریب شوری به سمت عدد ۱ می‌رود.

پس از تعریف مسئله و فرضیات مدل‌سازی، در گام بعد باید متغیرها و ارتباط بین آن‌ها بیان گردد. برای این منظور ابتدا نمودار مرز مدل را برای شناسایی نوع متغیرها به‌صورت جدول (۲) رسم می‌کنیم.

به کمک جمعیت حوضه، مساحت زمین‌های زیر کشت تعیین‌شده است زیرا جمعیت از عوامل اصلی تعیین کل مساحت زیر کشت در بخش کشاورزی می‌باشد. در این مدل به کمک مساحت زیر کشت از گیاهان با نیاز آبی متفاوت (کم، متوسط و زیاد)، نیاز آبی در هر هکتار از هر نوع گیاه و همچنین بازده آبیاری کشاورزی، مقدار آب موردنیاز در بخش کشاورزی تعیین می‌شود. سپس با توجه بـه نسبت

جدول (۲): نمودار مرز مدل

درون‌زا	برون‌زا	خارج از مدل
حجم آب دریاچه مساحت دریاچه	دمای دریاچه	مصارف خانوار و صنعتی
مقدار تبخیر	شدت تبخیر	انتقال بین حوضه‌ای آب
ارتفاع و حجم بارش	ضریب تشت	مهاجرت جمعیت
رطوبت	جریان آب زیرزمینی	مسائل اقتصادی به‌ویژه ارزآوری آرتمیا
ضریب شوری	برداشت آب از چاه	طوفان نمک
نسبت تبخیر آب‌شور دریاچه به آب شیرین	مقدار آب سطحی قبل از برداشت کشاورزی	بارورسازی ابرها
تراز آبی دریاچه	درصد بازگرداندن آب سدها به دریاچه	
مقدار آب سطحی پس از برداشت کشاورزی	نیاز آبی هر هکتار زمین کشاورزی با نیاز آبی کم، متوسط و زیاد	
مقدار برداشت از آب‌های سطحی	در شرایط فعلی	
برداشت از رودخانه‌ها	درصد وجود هر نوع زمین با نیاز آبی کم، متوسط و زیاد	
برداشت از سدها	مقدار ساعت آموزش کشاورزان	
مساحت آبیاری توسط آب سدها	مقدار بودجه جهت نوسازی تجهیزات کشاورزی	
مقدار آب بازگردانده شده به دریاچه پس از اعمال سیاست (۲)	جمعیت حوضه‌ی ارومیه	
مساحت زمین غیرقابل استفاده پس از اعمال سیاست (۲)		
کل نیاز آبی کشاورزی		
نیاز آبی هرهکتار زمین کشاورزی با نیاز آبی کم، متوسط و زیاد پس از اعمال سیاست (۱)		
بازده آبیاری کشاورزی پس از اجرا سیاست(۱)		
مساحت زمین زیر کشت از هر نوع (کم، متوسط و زیاد)		
متوسط آب موردنیاز برای آبیاری هر هکتار		
کل مساحت زیر کشت		

برداشت آب موردنیاز از سدها یا رودخانه‌ها مقدار آب برداشتی از هرکدام تعیین می‌شود. نوسانات حجم دریاچه باعث تغییر در مساحت دریاچه و به دنبال آن تغییر در مقدار تبخیر از دریاچه می‌گردد. تبخیر نیز تنها خروجی دریاچه و علت اصلی کاهش تراز آن می‌باشد. از دیگر عوامل مؤثر بر تبخیر، مقدار شوری می‌باشد که خود نیز متأثر از حجم آب دریاچه می‌باشد. همچنین افزایش تبخیر باعث افزایش رطوبت در حوضه‌ی آبریز شده که این پدیده به همراه دما عامل اصلی ریزش نزولات جوی در حوضه‌ی ارومیه می‌باشد. برای همین است که طی چند دهه‌ی اخیر و در اثر کاهش تراز آب دریاچه، نه‌تنها تعادل دمایی کاهش‌یافته و زمستان‌های سردتر و تابستان‌های گرم‌تری را در منطقه شاهد هستیم بلکه به علت کاهش رطوبت در آن حوضه میزان نزولات جوی نیز کاهش‌یافته و همین امر نیز برداشت از رودخانه‌ها را برای آبیاری کشاورزی بیشتر کرده است. غیر از بارش و آب‌های سطحی ورودی به دریاچه، منابع زیرزمینی نیز از بستر دریاچه به آن وارد می‌شود که با توجه به کاهش شدید سطح سفره‌های زیرزمینی طی سالیان اخیر این میزان نسبتاً ناچیز است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اندازه‌گیری تبخیر توسط سازمان‌های هواشناسی به‌صورت مستقیم تقریباً امکان‌پذیر نیست. روشی را که برای تعیین میزان تبخیر به کار می‌برند به‌طور مفصل توسط حسن‌زاده ذکرشده است ([٤]) و در اینجا بسیار مختصر آن را ذکر می‌کنیم. برای اندازه‌گیری میزان تبخیر از سطح دریاچه‌ها مثل ارومیه از روش تبخیر از تشت استفاده می‌کنند؛ به این صورت که دو تشت را یکی از آب‌شور دریاچه و دیگری را از آب شیرین پُر می‌کنند و آن‌ها را در ارتفاعی بالاتر از سطح آب دریاچه قرار داده و میزان تبخیر از سطح آن‌ها را اندازه-

گیری می‌کنند. به کمک مقدار تبخیر از دو تشت، ضریبی به نام ضریب شوری (نمایانگر نسبت تبخیر آب‌شور به شیرین) به دست می‌آید. همچنین برای تعیین مقدار تبخیر از دریاچه به ضریبی به نام ضریب تشت[۲۲] نیاز است. حال به کمک ضریب شوری، ضریب تشت و شدت تبخیر مقدار تبخیر از آب دریاچه

مطابق معادله‌ی (۳) محاسبه می‌شود. ضرب کردن در ضریب تشت به‌این‌علت است که تبخیر از تشت بیش از تبخیر از سطح آزاد آب می‌باشد دلیل آن‌هم بیشتر بودن سرعت باد در ارتفاع بالاتر نسبت به سطح و همچنین جنس تشت (که عمدتاً از فلز گالوانیزه بوده) می‌باشد که در اثر گرم شدن ناشی از تابش خورشید سرعت تبخیر در آن از سرعت تبخیر از سطح آزاد آب بالاتر می‌رود.

قابل‌ذکر است ارتباط بین متغیرها در حالتی که رابطه تعریف‌شده‌ی مشخصی بین آن‌ها در ادبیات حوضه‌ی موردمطالعه وجود نداشته باشد، به‌وسیله‌ی تخمین از روش رگرسیون[۲۳] به‌دست‌آمده است که برای این امر می‌توان به تعیین رابطه‌ی بین جمعیت و کل زمین‌های زیر کشت حوضه‌ی آبریز ارومیه اشاره نمود.

در این مقاله به دنبال پاسخ به این سؤال‌ها هستیم که چرا باوجود راه‌کارهای گوناگونی که تابه‌حال برای حل بحران دریاچه‌ی ارومیه پیشنهادشده ولی تاکنون هیچ‌یک کمک محسوسی به رفع آن نکرده است؟ از بین راه‌کارهای موجود کدام‌یک برای حل معضل دریاچه‌ی ارومیه در کوتاه‌مدت مؤثرتر می‌باشند؟ چرا باوجود تغییرات اقلیمی مشابه درگذشته (مانند افزایش دما)، دریاچه هیچ‌گاه چنین وضعیتی را تجربه نکرده است؟ و بالأخره اینکه وظایف دولت، نهادها، مسئولین و مردم برای حل این بحران ملّی چه می‌باشد؟

۳-۳- روش‌شناسی[۲۴]

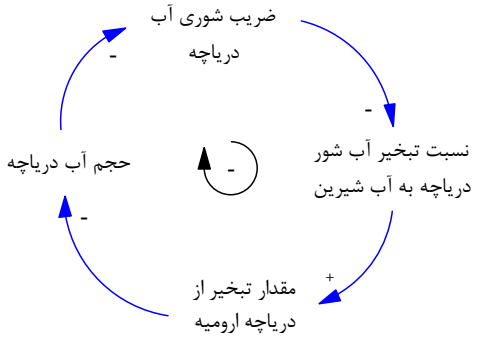
با این‌که چندین سال از شروع روند خشک شدن دریاچه‌ی ارومیه می‌گذرد و تاکنون راه‌کارهای گوناگونی ازجمله انتقال آب دریای خزر به دریاچه، بارورسازی ابرهای حوضه، کاهش آب‌گیری سدهای ساخته‌شده، اصلاح روش‌های آبیاری در بخش کشاورزی حوضه‌ی آبریز ارومیه و ... برای بازیابی حجم آب دریاچه پیشنهادشده است ولی متأسفانه هیچ‌کدام از آن‌ها تابه‌حال نتوانسته بهبود جدی در اوضاع دریاچه ایجاد نماید. لذا استفاده از رویکردی جامع و یکپارچه که تمامی جوانب را در نظر بگیرد و نتیجه‌ی سیاست‌های بهبود را قبل از اعمال آن نشان دهد، برای اتخاذ تصمیمات مناسب توسط مدیران در جهت حل این معضل ملی ضروری می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش در وهله‌ی اول شبیه‌سازی پویایی حاکم بر حوضه‌ی آبریز ارومیه در حضور متغیرهایی مانند میزان بارش، میزان تبخیر، بازده آبیاری و ... می‌باشد؛ سپس تحلیل رفتار تراز آب دریاچه در ازای اعمال سیاست‌های پیشنهادی موردنظر می‌باشد. چنانچه ذکر شد، سیاست‌های پیشنهادی در این پژوهش، پیرامون افزایش بازده آبیاری بخش کشاورزی و بازگرداندن نسبتی از آب پشت سدها به دریاچه می‌باشد. رویکرد مورداستفاده در اینجا پویایی‌شناسی سیستم می‌باشد که برای مدل‌سازی روابط علی و معلولی در سیستم‌های حوضه‌ی آبریز که ارتباطات بین متغیرها از نوع پیچیده و غیرخطی می‌باشد به کار می‌رود. این رویکرد که از ابزارهای علم سیستم می‌باشد تمام ویژگی‌های فوق را داراست و مناسب‌ترین ابزار برای مدل‌سازی در این پژوهش می‌باشد. پویایی‌شناسی سیستم اولین بار توسط فارستر به‌عنوان یک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای تحلیل تصمیمات بلندمدت معرفی شد [۳۹]. استرمن با کتاب «پویایی‌شناسی کسب‌وکار» نقش بسزایی در ارائه‌ی مدل‌های کاربردی گوناگون پویایی سیستم ایفا کرد. در این پژوهش نیز از روش‌شناسی ارائه‌شده توسط استرمن که در کتاب مذکور آمده، استفاده‌شده است. گام‌های این روش‌شناسی عبارتند از:

۱- تعریف مسئله‌ی دینامیک و دامنه‌ی آن

۲- تعیین متغیرها و تعیین ارتباط بین آن‌ها
۳- ترسیم نمودار علی و معلولی[۲۵]
٤- انتخاب نرم‌افزار مناسب برای شبیه‌سازی
٥- ساختن مدل موجودی و جریان[۲٦]
٦- شبیه‌سازی مدل
۷- اعتبارسنجی مدل به کمک داده‌های کمی

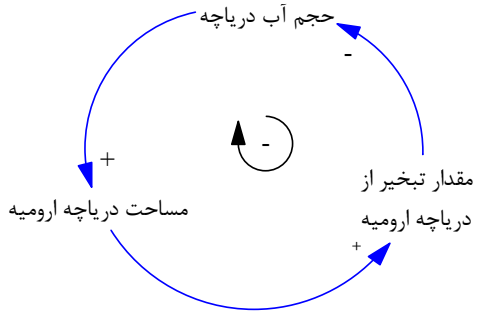
۳-٤- مدل‌سازی به کمک نمودار علی و معلولی و نمودار موجودی و جریان

در این بخش به توضیح حلقه‌های موجود در نمودار علی و معلولی می‌پردازیم تا ساختار نمودار علی معلولی مشخص گردد.
همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌گردد تغییر در حجم دریاچه سبب تغییر در ضریب شوری و مقدار تبخیر از دریاچه می‌گردد و مقدار تبخیر نیز بر حجم آب موجود مؤثر است. درنتیجه پویا بودن سیستم به‌روشنی قابل‌تشخیص می‌باشد. در ضمن علامت منفی داخل حلقه نشان‌دهنده‌ی تعادلی بودن آن می‌باشد.



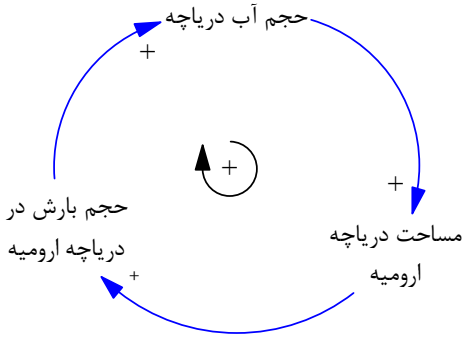
شکل (۸): حلقه شماره ۱

شکل (۹) حلقه‌ی دیگری از مدل می‌باشد که رابطه‌ی بین حجم، مساحت و مقدار تبخیر از دریاچه را نشان می‌دهد. این حلقه نیز تعادلی بوده و وظیفه‌ی به تعادل رساندن حجم آب دریاچه را دارد.



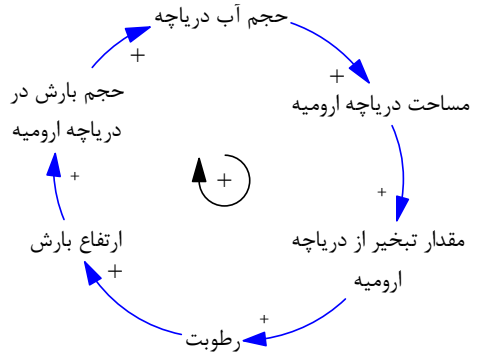
شکل (۹): حلقه شماره ۲

شکل (۱۰) سومین حلقه‌ی مدل را نشان می‌دهد که دارای علامت مثبت بوده بنابراین حلقه‌ای تقویتی است. در این حلقه ارتباط بین حجم، مساحت و حجم بارش بیان‌شده است. هرچه حجم دریاچه بیشتر گردد مساحت نیز زیاد می‌شود. در این صورت بارش‌های جوی به دریاچه واردشده و منجر به افزایش حجم می‌گردد.



شکل (۱۰): حلقه شماره ۳

شکل (۱۱) مهم‌ترین حلقه‌ی مدل را که تقویتی می‌باشد نشان می‌دهد. در این حلقه افزایش حجم دریاچه منجر به افزایش مساحت آن خواهد شد. ازآنجایی‌که تبخیر با مساحت ارتباط مستقیم دارد بنابراین با افزایش مساحت، تبخیر از سطح دریاچه نیز بیشتر خواهد شد که این امر نیز افزایش رطوبت و افزایش بارش در حوضه‌ی *آبریز دریاچه ارومیه را در پی خواهد داشت که درنتیجه حجم دریاچه مجدداً افزایش می‌یابد.*



شکل (۱۱): حلقه شماره ۴

همان‌طور که می‌دانیم یکی از عوامل مؤثر بر پیچیدگی یک سیستم، تعداد حلقه‌های موجود در آن است. بنابراین تحلیل این حلقه‌ها برای توجیه علت استفاده از روش پویایی سیستم حائز اهمیت است. پس از تحلیل حلقه‌ها نمودار علی و معلولی رسم می‌شود. نمودار علی و معلولی در شکل (۱۲) نشان داده‌شده است. بعد از ترسیم نمودار علی و معلولی باید نمودار موجودی و جریان رسم شود تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده شود. در این پژوهش برای تهیه‌ی نمودار موجودی و جریان و شبیه‌سازی مدل ساخته‌شده از نرم‌افزار وِنسیم[۲۷] استفاده‌شده است. نمودار موجودی و جریان مربوط به سیستم موردمطالعه در شکل (۱۳) نشان داده‌شده است.

در حوضه‌ی پویایی‌شناسی سیستمی، متغیرها به دو صورت حالت و جریان می‌باشند. متغیر حالت یا انباشت تجمعی می‌باشد مثل مقدار آب موجود در حوضه‌ی آبریز. به‌طورکلی، متغیرهای انباشت، نشان‌دهنده‌ی حالت سیستم می‌باشند.

نرخ جریان‌های ورودی و خروجی قابلیت تغییر در متغیر انباشت را دارند؛ برای مثال مقدار انباشت آب در یک مخزن (متغیر انباشت) با نرخ ورود و خروج (نرخ جریان) تغییر می‌یابد [٤٠]. در این پژوهش تنها متغیر حالت حجم آب دریاچه می‌باشد که براثر نرخ‌های ورودی و خروجی مقدار آن تغییر می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ملاحظه می‌شود تعداد متغیرهای مدل طراحی‌شده بسیار زیاد بوده و روابط بین آن‌ها پیچیده و غیرخطی می‌باشد بنابراین مدل کردن آن غیر از حالت پویایی سیستم دشوار می‌باشد. توضیح تمام معادلات این مدل به دلیل حجم زیاد در این مقاله ممکن نیست، اما برای نمونه به روابط بین چند متغیر می‌پردازیم. در ضمن روابط موجود در سیاست‌های اعمالی در بخش بعد بیان می‌گردد.

مقدار انباشت در متغیر حالت در هرلحظه از زمان مثل (t) وقتی تنها یک ورودی و خروجی دارد با استفاده از معادله‌ی (۱) به‌صورت زیر به دست خواهد آمد :

$$Stock(t) = \int_{t_0}^{t_m} [Inflow(t) - Outflow(t)]dt + Stock(t_0) \qquad (1)$$

Stock(t) = t *مقدار متغیر انباشت در زمان*

بر اساس معادله‌ی (۱) می‌توان حجم آب دریاچه در هرلحظه از زمان را توسط معادله‌ی (۲) به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$A(t) = \int_{t_0}^{t_m} [B(t) + C(t) + D(t) - E(t)]dt + A(t_0) \qquad (2)$$

A(t) = *حجم دریاچه*

B(t) = *حجم آب زیرزمینی ورودی به دریاچه*

C(t) = *حجم بارش ورودی به دریاچه*

D(t) = *حجم آب سطحی ورودی به دریاچه*

E(t) = *حجم تبخیر از دریاچه*

$A(t_0)$ = *حجم اولیه دریاچه*

همچنین تبخیر در هرلحظه از زمان (t) با استفاده از معادله‌ی (۳) به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$E(t) = K_p * K_s * F * G(t) \qquad (3)$$

E(t) = *حجم تبخیر از دریاچه*

K_p = *ضریب تشت (ضریب پَن)*

K_s = *نسبت تبخیر آب‌شور به شیرین*

F = *مساحت دریاچه*

G(t) = t *شدت تبخیر در دوره*

همچنین کل نیاز آبی کشاورزی از طریق معادله‌ی (۴) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$TWR(t) = HAL(t) * HWRL + HAM(t) * HWRM + HAH(t) * HWRH \qquad (4)$$

HAL(t) = *مساحت زمین‌های زیرکشت با نیاز آبی کم در* **t** *دوره*

HAM(t)= *مساحت زمین‌های زیرکشت با نیاز آبی متوسط در* **t** *دوره*

HAH(t)= *مساحت زمین‌های زیرکشت با نیاز آبی زیاد در دوره* **t**

HWRL= *نیاز آبی هر هکتار زمین کشاورزی با الگوی مصرف کم*

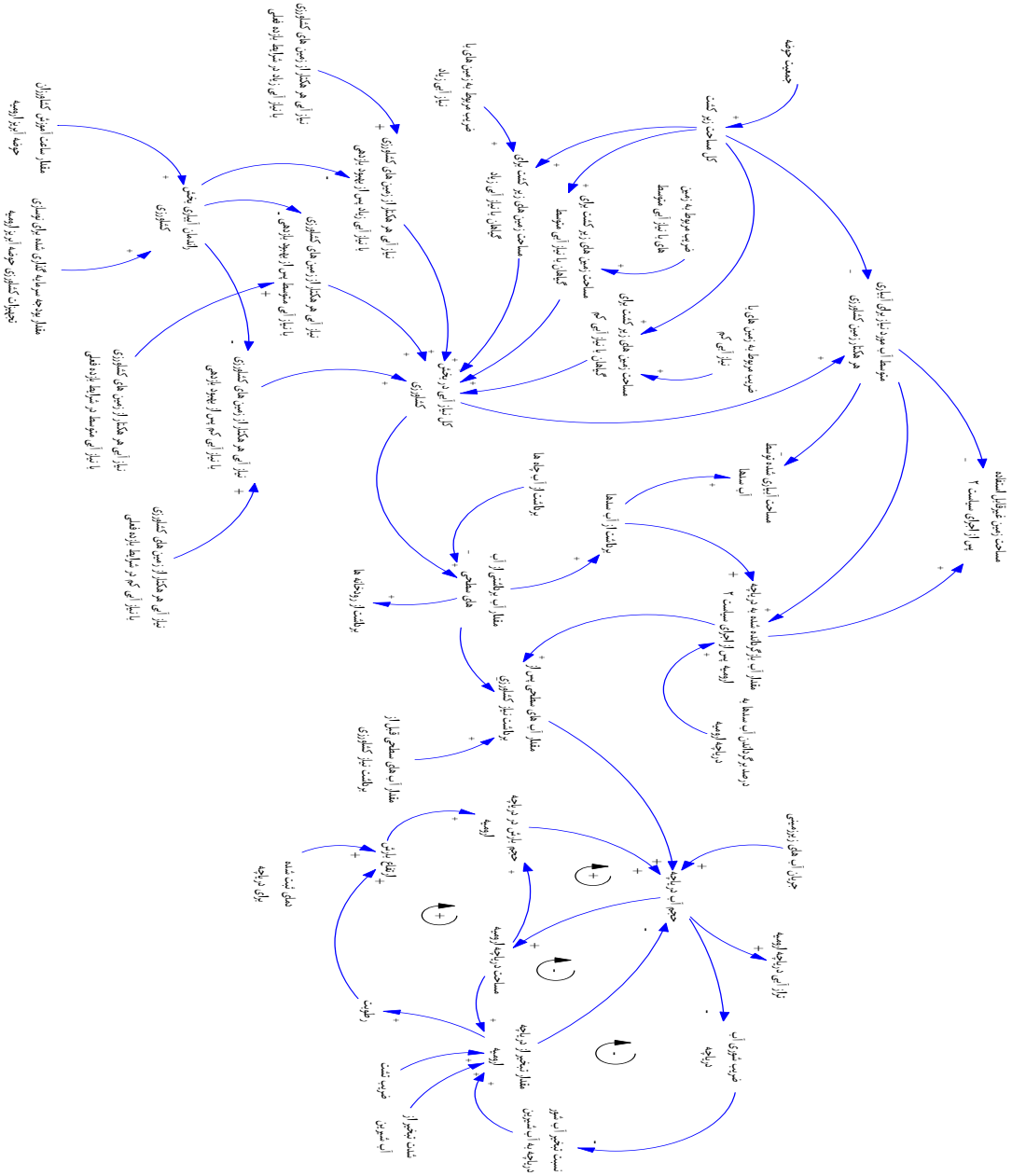
HWRM= *نیاز آبی هرهکتار زمین کشاورزی با الگوی مصرف متوسط*

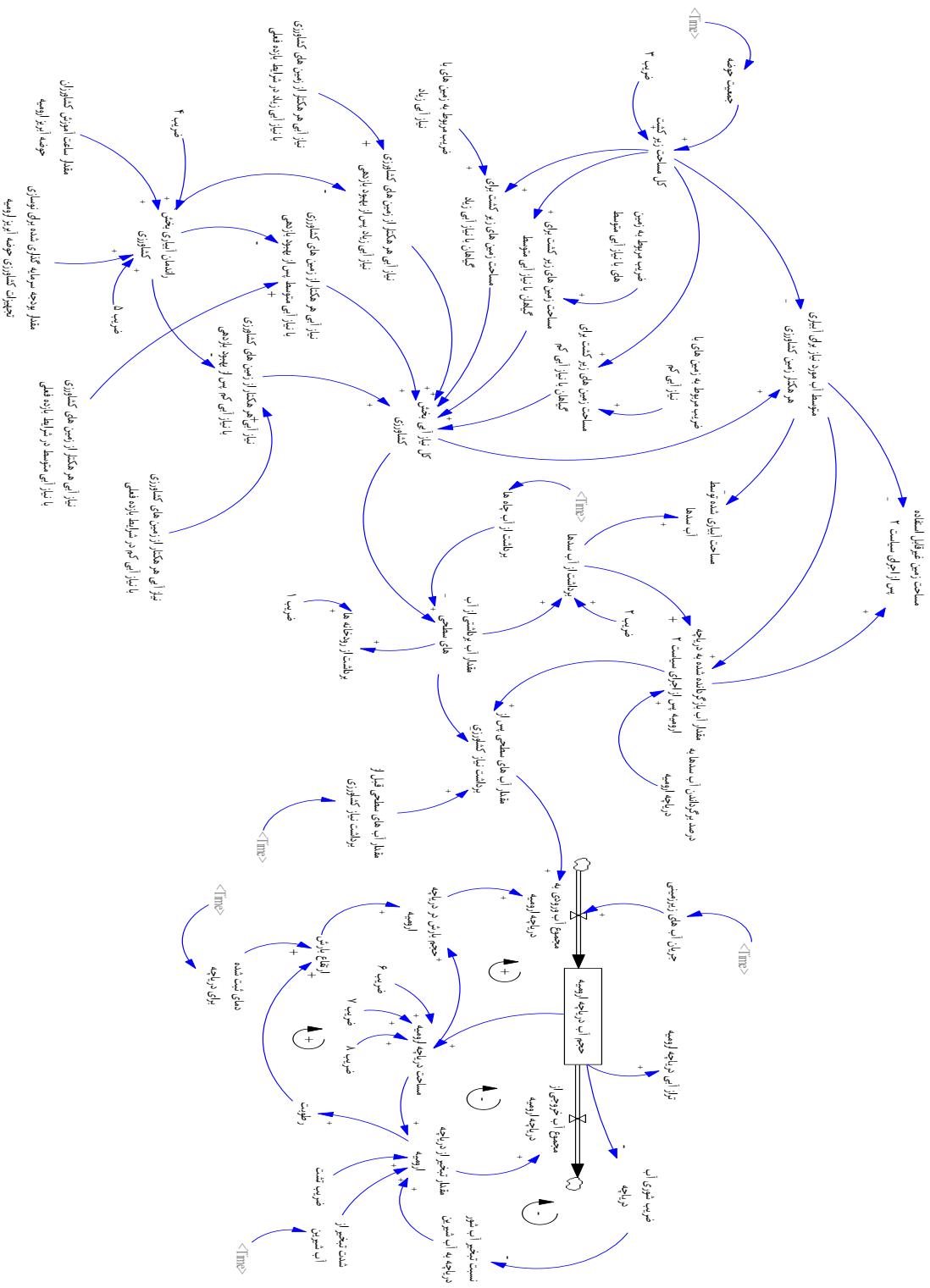
HWRH= *نیاز آبی هر هکتار زمین کشاورزی با الگوی مصرف زیاد*

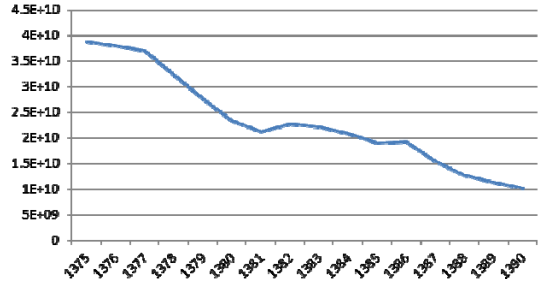
٤- نتایج شبیه‌سازی بر اساس مدل پایه

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این مقاله از نرم‌افزار وِنسیم برای مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز ارومیه استفاده شده است. مدل ارائه‌شده برای یک بازه‌ی ۱۵ ساله بین سال‌های ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۰ طراحی‌شده است. علت در نظر گرفتن این بازه برای

شبیه‌سازی دریاچه، تغییر رفتار دریاچه و شیب نزولی سریع حجم دریاچه طی این مدت بود. ابتدا بدون اعمال سیاست-های کنترلی، خروجی مدل را برای متغیر کلیدی حجم دریاچه نمایش می‌دهیم. در مدل پایه بازده کشاورزی ۳۵٪ و درصد بازگرداندن آب سدها (که به‌منظور آبیاری کشاورزی استفاده می‌شود) ۰٪ می‌باشد. شکل (۱٤) مقادیر شبیه‌سازی‌شده حجم دریاچه‌ی ارومیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد از سال ۱۳۷۵به بعد حجم دریاچه روند نزولی پرشتابی را طی کرده که باعث بروز یک بحران ملی شده است.




جمعیت حوضه
ضریب ۳
کل مساحت زیر کشت
مساحت زیر کشت برای
ضریب مربوط به زمین
های با نیاز آبی متوسط
مساحت زمین های زیر کشت برای
گیاهان با نیاز آبی متوسط
مساحت زمین های زیر کشت برای
گیاهان با نیاز آبی کم
ضریب مربوط به زمین های با
نیاز آبی کم
متوسط آب مورد نیاز برای آبیاری
هر هکتار زمین کشاورزی
مساحت زمین غیرقابل استفاده
پس از اجرای سیاست ۲
مساحت آبیاری شده توسط
آب سدها
مقدار آب بازگردانده شده به دریاچه
ارومیه پس از اجرای سیاست ۲
درصد برگرداندن آب سدها به
دریاچه ارومیه
برداشت از آب سدها
ضریب ۲
برداشت از آب چاه ها
ضریب ۱
برداشت از رودخانه ها
مقدار آب برداشتی از
های سطحی
کل نیاز آبی بخش
کشاورزی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی کم پس از بهبود بازدهی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی متوسط پس از بهبود بازدهی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی زیاد پس از بهبود بازدهی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی کم در شرایط بارنده فعلی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی متوسط در شرایط بارنده فعلی
نیاز آبی هر هکتار از زمین های کشاورزی
با نیاز آبی زیاد در شرایط بارنده فعلی
ضریب ۴
راندمان آبیاری بخش
کشاورزی
ضریب ۵
مقدار بودجه سرمایه گذاری شده برای بهسازی
تجهیزات کشاورزی حوضه آبریز ارومیه
مقدار ساعت آموزش کشاورزان
حوضه آبریز ارومیه
مقدار آب های سطحی قبل از
برداشت نیاز کشاورزی
برداشت نیاز آب های سطحی پس از
مقدار آب های سطحی پس از
برداشت نیاز کشاورزی
مجموع آب ورودی به
دریاچه ارومیه
جریان آب های زیرزمینی
حجم آب دریاچه ارومیه
مجموع آب خروجی از
دریاچه ارومیه
نیاز آبی دریاچه ارومیه
ضریب شوری آب
دریاچه
نسبت نیتروژن
دریاچه به آب شیرین
شدت نیتروژن
آب شیرین
ضریب تبخیر
مقدار تبخیر از دریاچه
ارومیه
رطوبت
ارتفاع بارش
دمای ثبت شده
برای دریاچه
حجم بارش در دریاچه
ارومیه
مساحت دریاچه ارومیه
ضریب ۶
ضریب ۷
ضریب ۸
Time



شکل (۱۴): مقادیر شبیه‌سازی‌شده حجم دریاچه ارومیه (برحسب مترمکعب) از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰ (بدون اعمال سیاست)

٤-١- اعتبارسنجی

بعد از مشاهده نتایج شبیه‌سازی باید اعتبار مدل بررسی‌شده تا معلوم گردد نتایج شبیه‌سازی برای حجم دریاچه تا چه حد به واقعیت نزدیک است. برای این منظور از معادله (۵) استفاده می‌کنیم. این رابطه در بعضی پژوهش‌های پیشین در حوضه پویایی سیستم به‌کاررفته است [۳].

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}} \right)^2 \qquad (۵)$$

S_i = مقدار حاصل از شبیه‌سازی برای متغیر حجم در دوره iاُم

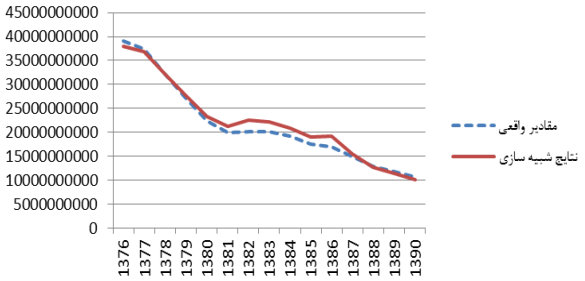
$\bar{S}$ = میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده برای متغیر حجم

O_i = مقدار واقعی برای متغیر حجم در دوره iاُم

$\bar{O}$ = میانگین مقادیر واقعی برای متغیر حجم

n = تعداد دوره‌های شبیه‌سازی (در اینجا ۱۵ دوره)

با استفاده از معادله‌ی (۵) اعتبار مدل برابر ۹۷٪ خواهد شد که مقدار بسیار مطلوبی می‌باشد و حکایت از اعتبار مدل و اختلاف اندک بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده دارد. همچنین شکل (۱۵) که مقایسه‌ای بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده‌ی حجم دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد نیز این میزان اعتبار را تأیید می‌نماید.



شکل (۱۵): مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مقادیر واقعی حجم دریاچه

٥- سیاست‌های بهبود

سیاست‌هایی که در این مقاله ارائه‌شده است تماماً بر اساس نظرات خُبرگان بنام و همچنین پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه می‌باشند. برای این امر سعی شده تا سیاست‌هایی که بیشترین تکرار را در مقالات داشتند و نیز موردتوجه متخصصان بیشتری بودند بیان شوند که مراجعات ذیل مؤید این مهم می‌باشد. با توجه

به مطالب فوق، در این بخش جهت حل بحران ملّی دریاچه‌ی ارومیه و بازیابی حجم آبی سابق، سه سیاست زیر پیشنهادشده است:

۱- سیاست افزایش بازده آبیاری بخش کشاورزی (مانند، [٤و٥و١٠و٣٠و٣٢و٣٥و٣٦])

۲- سیاست بازگرداندن آب سدها به دریاچه (مانند، [٣و٤و٥و١٠و٣٠و٣٢])

۳- ترکیب سیاست ۱ و ۲ (مانند، [٤و٥و١٠و٣٠و٣٢])

٥-١- سیاست اول

همان‌گونه که ذکر شد این سیاست مربوط به افزایش بازدهی آبیاری بخش کشاورزی می‌باشد. برای اصلاح آبیاری کشاورزی و افزایش بهره‌وری در حوضه‌ی ارومیه، رویکردهایی مثل تعمیر کانال‌های آبیاری، آموزش روش‌های نوین آبیاری به کشاورزان، تغییر روش‌های کشت و انتخاب محصولات با نیاز آبی کم و بازده تولیدی بالا و تغییر آبیاری باغات میوه از آبیاری غرقابی به قطره‌ای پیشنهادشده است [٤١]. دو اهرم در نظر گرفته‌شده برای افزایش بازده در این مقاله عبارت‌اند از: ۱- آموزش کشاورزان برای آشنایی و استفاده از روش‌های نوین و اثربخش آبیاری (مانند قطره‌ای) به‌جای روش‌های سنتی با اتلاف زیاد آب (مانند غرقابی). ۲- اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره از طرف وزارت جهاد کشاورزی به کشاورزان به‌منظور خرید تجهیزات جدید برای اصلاح روش‌های آبیاری کشاورزی. تعداد ساعاتی که برای آموزش کشاورزان فرض شده ٥٠٠ ساعت (معادل روزی ٥ ساعت آموزش در ١٠٠ روز) می‌باشد و همچنین مبلغی که برای واگذاری به کشاورزان حوضه جهت نوسازی تجهیزات کشاورزی برای آبیاری بهینه در نظر گرفته‌شده ۳۰ میلیارد تومان می‌باشد. بازده فعلی آبیاری بخش کشاورزی حوضه‌ی آبریز ارومیه حدود ۳۵٪ است و ما قصد داریم تا با سیاست‌های ذکرشده آن را به ۷۵٪ که نزدیک به متوسط جهانی می‌باشد برسانیم. اگر دو اهرم مدیریتی به‌طور کامل اجرا گردند بازدهی به عدد ۷۵٪ خواهد رسید. چنانچه از شکل‌های (۱۲) و (۱۳) پیداست با افزایش بازدهی آبیاری کشاورزی، نیاز آبی در هر سه نوع زمین کشاورزی کاهش می‌یابد. بنابراین کل نیاز آبی بخش کشاورزی نیز کاهش خواهد یافت. پس مقدار کمتری از آب‌های سطحی برداشت‌شده و مقدار بیشتری رواناب به دریاچه وارد می‌شود و سبب افزایش حجم آن می‌شود. روابطی که در این سیاست استفاده‌شده در این بخش ذکر خواهد شد. رابطه‌ی (٦) نیاز آبی هر هکتار زمین کشاورزی با نیاز آبی زیاد را پس از بهبود بازدهی نشان می‌دهد. این رابطه برای زمین‌های کشاورزی با نیاز آبی کم و متوسط هم صادق است.

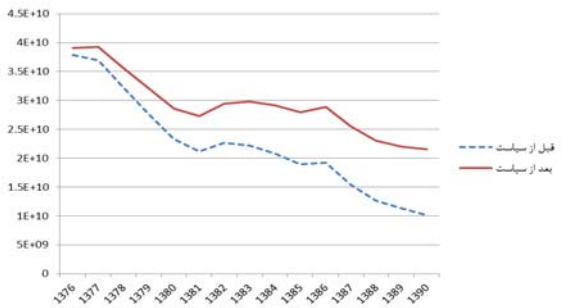
$$WRHA(t) = WRHB(t) * (1/(EF+0.65)) \qquad (۶)$$

WRHA(t)= *نیاز آبی در هر هکتار با نیاز آبی زیاد پس از بهبود بازده*

TWRB(t) = *نیاز آبی در هر هکتار با نیاز آبی زیاد قبل از بهبود بازده*

EF = *راندمان آبیاری*

حال باید تأثیرگذاری سیاست کنترلی اول را بر روی حجم دریاچه تعیین کنیم که این امر توسط شکل (١٦) صورت گرفته است.



شکل (۱۶): حجم آب دریاچه (برحسب مترمکعب) قبل و بعد از اعمال سیاست اول

۵-۲- سیاست دوم

سیاست دیگری که می‌خواهیم به بررسی آن بپردازیم تأثیر برگرداندن درصدی از آب خروجی از سدها برای بخش کشاورزی به دریاچه می‌باشد. با توجه به بسیاری از گزارش‌ها، یکی از دلایل اصلی کاهش حجم آب دریاچه احداث چندین سد بر روی رودخانه‌های منتهی به دریاچه بدون مطالعات و ارزیابی‌های قبلی می‌باشد. سدها برای ذخیره‌ی آب احداث می‌شوند و عمده‌ی ذخیره‌ی آن‌ها برای استفاده‌ی بخش کشاورزی رها می‌شود و به علت هزینه‌ی هنگُفت احداث، امکان تخریب آن‌ها برای افزایش دبی ورودی به دریاچه وجود ندارد ولی می‌توان مقداری از آبی که توسط آن‌ها به مزارع سرازیر می‌شود را به دریاچه برگردانیم. البته این سیاست ضربه‌ی بزرگی به بخش کشاورزی وارد می‌کند و قسمتی از زمین‌های کشاورزی به علت عدم آب کافی برای آبیاری، نابودشده که این باعث بیکاری جمع زیادی از ساکنین سه استان کردستان، آذربایجان شرقی و غربی می‌شود. بنابراین باید حالت تعادلی بین نابودی مزارع کشاورزی و خشک شدن دریاچه برقرار کرد. در این سیاست می‌خواهیم تأثیر بازگشت ۵۰٪ از آب سدها به دریاچه را بررسی کنیم. زیرا اگر این مقدار بیشتر از ۵۰٪ شود اگرچه حجم دریاچه بیشتر می‌شود ولی اثرات نامطلوب اقتصادی و اجتماعی دیگری براثر خشک شدن مزارع حاصل می‌شود. پس از تعیین کل مساحت زیر کشت و کل نیاز آبی کشاورزی، متوسط آب موردنیاز برای آبیاری هر هکتار به دست می‌آید. همچنین پس از تعیین مقدار برداشت آب از سدها و با توجه به درصد بازگشت آب که به‌عنوان سیاست کنترلی در نظر گرفته‌شده است می‌توان مقدار آب بازگشتی به دریاچه را تعیین نمود. رابطه‌ی (۷) مقدار آب بازگشتی به دریاچه پس از اجرای سیاست کنترلی دوم را نشان می‌دهد.

$$WRL(t) = DR(t) * PR \qquad (۷)$$

WRL(t) = t *مقدار آب بازگشتی به دریاچه در دوره*

DR(t) = t *مقدار برداشت آب از سدها در دوره*

PR = *درصد برگرداندن آب به دریاچه*

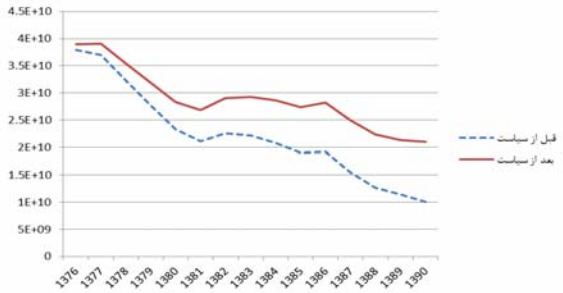
همچنین براثر این سیاست قسمتی از زمین‌های کشاورزی زیر کشت نمی‌روند که این مقدار توسط معادله‌ی (۸) به دست می‌آید.

$$OI(t) = WRL(t) / WA(t) \qquad (۸)$$

$OI(t) = t$ مساحت زمین‌های غیرقابل کشت در دوره

$WA(t) = t$ متوسط آب مصرفی برای آبیاری هر هکتار زمین در دوره

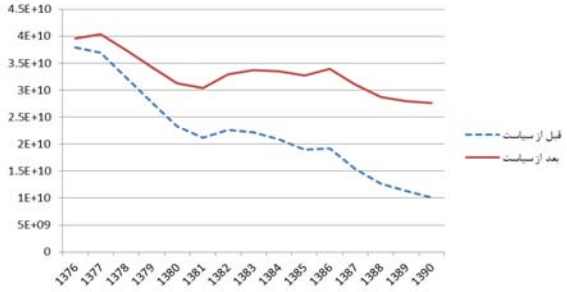
شکل (۱۷) تأثیر سیاست دوم بر حجم دریاچه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): حجم آب دریاچه (برحسب مترمکعب) قبل و بعد از اعمال سیاست دوم

۵-۳- سیاست سوم

این سیاست ترکیب دو سیاست قبلی می‌باشد؛ یعنی هم بازدهی را به ۷۵٪ می‌رسانیم و هم ۵۰٪ درصد آب سدها را به دریاچه برمی‌گردانیم. بنابراین ادعا می‌کنیم تأثیر این سیاست بیش از دو سیاست قبلی می‌باشد. شکل (۱۸) علاوه بر نمایش تأثیر اعمال این سیاست، تأکیدی بر صحت این ادعا نیز می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود روند نزولی حجم دریاچه پس از اعمال این سیاست متوقف‌شده و حجم به حالت ثبات می‌رسد. همچنین به کمک شکل (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت که حجم آب دریاچه در صورت اجرای سیاست پیشنهادی حدود ۲٫۵ برابر خواهد شد که این امر تا حدود بسیار خوبی مشکل دریاچه را برطرف می‌نماید.

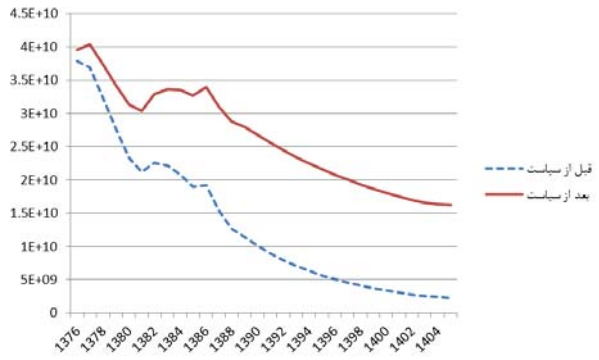


شکل (۱۸): حجم آب دریاچه (برحسب مترمکعب) قبل و بعد از اعمال سیاست سوم

٦- پیش‌بینی

یکی از مزایای استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، امکان پیش‌بینی برای آینده است. به‌این‌ترتیب که مدت‌زمان اجرای مدل ارائه‌شده را زیاد کرده و پیش‌بینی برای وضعیت آینده سیستم بر پایه مدل، به دست خواهد آمد. بدیهی است هرقدر اعتبار مدل پیشنهادی بیشتر باشد یا به‌عبارت‌دیگر، مدل برای مدت‌زمان اجراشده مقادیر نزدیک‌تری به واقعیت را تولید نماید، پیش‌بینی حاصل از آن نیز دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به این‌که اعتبار مدل پیشنهادی در این مقاله ۹۷٪ می‌باشد به نظر می‌رسد بتوان پیش‌بینی خوبی برای آینده انجام داد.

پیش‌بینی برای ۱۵ سال صورت گرفته است. به‌عبارت‌دیگر بعد از آن‌که مدل برای یک بازه ۱۵ ساله بین سال‌های ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۰ اجرا گردید حال برای ۱۵ سال دیگر تا سال ۱٤۰۵ اجرا می‌شود تا مقادیر حاصل از این ۱۵ سال به‌عنوان مقادیر پیش‌بینی مورد استفاده قرار بگیرد. شکل (۱۹) مقادیر پیش‌بینی برای حجم دریاچه تا سال ۱٤۰۵ را قبل و بعد از اعمال سیاست سوم نشان می‌دهد. با توجه به این‌که سیاست سوم تأثیرگذارترین سیاست در افزایش حجم دریاچه می‌باشد لذا تنها تأثیر آن در پیش‌بینی در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۹): پیش‌بینی حجم آب دریاچه (برحسب مترمکعب) تا سال ۱۴۰۵ قبل و بعد از اعمال سیاست سوم

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد اگر روند خشک شدن دریاچه به همین صورت پیش رود تا سال ۱٤۰۵ تقریباً اثری از دریاچه باقی نخواهد ماند و حجم عمده آن خشک شده و تبدیل به شوره‌زارهای خطرناکی می‌شود که سلامتی بسیاری از ساکنان آن منطقه را با مخاطرات جدی روبرو می‌کند.

نتیجه‌گیری

دریاچه‌ی ارومیه تأثیرات اقتصادی و اجتماعی مهمی دارد و نقش زیست‌محیطی قابل‌توجهی را در شمال غرب ایران بازی می‌کند. سطح اکولوژیکی موردنیاز برای دریاچه ارومیه ۱۲۷٤,۱ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد اما هم‌اکنون (سال ۱۳۹۳) این مقدار حدود ۱۲۷۰ متر می‌باشد. هدف از ارائه‌ی مدل پویایی‌شناسی سیستم در حوضه‌ی آبریز ارومیه، نمایش پویایی موجود در حوضه‌های آبریز به‌خصوص دریاچه‌ی ارومیه و کمک به سیاست‌گذاران کشور برای تصمیم-گیری صحیح به‌منظور حل بحران ملی دریاچه ارومیه می‌باشد. این سیستم (که به سیستم حوضه‌ی آبریز معروف هست) توسط نرم‌افزار ونسیم و در قالب نمودارهای علی و معلولی و نیز موجودی و جریان مدل شده است. بعد از اعتبارسنجی موفق مدل، سه سیاست کنترلی برای افزایش حجم دریاچه مورد تحلیل قرارگرفته است. نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه‌شده به‌روشنی بیان می‌کند که مدیران حوضه‌ی آبریز ارومیه و مسئولان جهاد کشاورزی باید برای جلوگیری از نابودی همیشگی این میراث ملّی به‌سرعت تصمیمات مهمی برای کوتاه‌مدت و بلندمدت اتخاذ کنند. تصمیمات کوتاه-مدت برای تثبیت وضعیت فعلی دریاچه و تصمیمات بلندمدت برای احیای تراز آن باید اتخاذ گردند.

از جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده بر روی دریاچه‌ی ارومیه می‌توان مهم‌ترین راه‌کارهای حل این بحران ملّی را به‌صورت زیر برشمرد:

۱- انتقال آب دریاچه‌ی خزر به دریاچه‌ی ارومیه

۲- برداشت از حقابه‌ی رودخانه‌ی ارس و انتقال آن برای آبیاری دشت‌های کشاورزی حوضه‌ی آبریز ارومیه

۳- بارورسازی ابرهای حوضه‌ی دریاچه ارومیه

٤- کاهش آبگیری سدهای ساخته‌شده

۵- اصلاح روش‌های آبیاری و افزایش بازدهی در بخش کشاورزی

البته نقدهایی نیز به برخی از راه‌کارهای فوق وارد می‌شود که به نظر تا حدودی منطقی می‌باشند و در اینجا مختصر بیان می‌کنیم. راه‌کار اول که یک سیاست انتقال بین حوضه‌ای آب می‌باشد جدای از هزینه‌ی بسیار بالایی که برای پمپاژ آب بین دو حوضه مصرف می‌گردد زمان زیادی هم به طول خواهد انجامید و حداقل به‌عنوان یک راه‌حل کوتاه‌مدت، مفید نمی‌باشد. در ضمن بررسی‌ها نشان می‌دهد که این راه‌کار مشکلاتی را هم برای دریاچه‌ی خزر و هم دریاچه‌ی ارومیه پدید خواهد آورد. برای مثال پُرکردن دریاچه‌ی ارومیه با آب شورِ خزر، منجر به شورتر شدن این پهنه‌ی فوق اشباع از نمک گشته که این امر مشکلات زیست‌محیطی دیگری را پدید خواهد آورد. با توجه به نکات مطرح‌شده و همچنین عظمت این پروژه، عملی شدن آن در هاله‌ای از ابهام فرو می‌رود. اجرای راه‌کار دوم نیز ساده نمی‌باشد؛ زیرا برداشت حقابه‌ی بیشتر تنش‌هایی بین ایران کشورهای بهره‌مند از این رودخانه ازجمله جمهوری آذربایجان ایجاد خواهد کرد. هرچند نابودی دریاچه تأثیراتی را بر اقلیم کل منطقه ازجمله کشور آذربایجان خواهد گذاشت ولی بعید به نظر می‌رسد که آذربایجان به افزایش حقابه‌ی ایران راضی شود. مسئولان کلان کشور نیز معتقدند اجرای این راه‌کار نیازمند ارزیابی-های زیست‌محیطی می‌باشد که تاکنون در این زمینه مطالعاتی صورت نگرفته است و اجرای آن به بخش کشاورزی

منطقه زیان خواهد رساند [۴۲]. در مورد راه‌کار سوم جدای هزینه‌ی چند میلیارد دلاری که برای انجام آن تخمین زده‌اند، اجرای آن نیز عدم قطعیت بالایی دارد و نه‌تنها امکان عدم وقوع آن وجود دارد بلکه در صورت وقوع، ایجاد بارش در نقطه‌ای غیر از نقطه‌ی برنامه‌ریزی‌شده نیز بسیار محتمل است. در ضمن وضعیت دریاچه به‌قدری بحرانی شده است که با این مقدار ناچیز بارش‌ها تغییر مهمی در حجم آن ایجاد نمی‌شود. اما راه‌کار چهارم و پنجم بیشترین موافق را در بین تصمیم‌گیران امر دارا می‌باشد و در این مقاله نیز سیاست‌های پیشنهادی بر پایه‌ی این دو راه‌کار ارائه‌شده‌اند. مدل‌هایی با قابلیت شبیه‌سازی اجرای سیاست‌ها و مشاهده‌ی نتایج قبل از اعمال آن‌ها در این حوضه به‌ندرت دیده می‌شود که این امر از مزایای این پژوهش محسوب می‌گردد و در ضمن کمک شایانی به تصمیم‌گیری برای بهبود وضعیت آینده‌ی دریاچه می‌کند. در مورد راه‌کار چهارم این رویکرد به همراه نتایج اجرای آن به‌تفصیل در بخش سیاست‌های پیشنهادی توضیح داده‌شده و فقط باید گفت به علت هزینه‌ی بالای ساخت سدها امکان تخریب آن‌ها وجود ندارد و باید ذخیره‌ی آب توسط این سدها را به حداقل مقدار ممکن برسانیم. راه‌کار چهارم نیز در اولین سیاست بیان شد. اصلاح روش‌های کشاورزی و بهبود بازده آبیاری موجب کاهش برداشت از حقابه‌ی دریاچه‌ی ارومیه شده و افزایش دبی ورودی به دریاچه را در پی دارد. این راه‌کار هماهنگی بین تمامی بازیگران تأثیرگذار در بحران دریاچه‌ی ارومیه را طلب می‌کند.

اگرچه تا امروز راه‌کارهای فراوانی برای حل معضل دریاچه‌ی ارومیه پیشنهادشده ولی متأسفانه تغییر چندانی در بهبود دریاچه ایجاد نشده است. به نظر می‌رسد از بین راه‌کارهای موجود برای حل بحران دریاچه، اصلاح روش‌های کشاورزی و آبیاری (که در این مقاله نیز تأکید زیادی بر روی آن شده و مهم‌ترین راه‌کار موجود شناخته‌شده است) و کاهش آبگیری سدها از اولویت بیشتری برخوردار باشند. هردوی این راه‌کارها در کوتاه‌مدت قابل‌اجرا می‌باشند و می‌توانند از نابودی کامل دریاچه جلوگیری کنند. دولت می‌تواند با اعطای تسهیلات لازم به کشاورزان برای خرید تجهیزات جدید کشاورزی، انگیزه‌ی لازم برای استفاده از روش‌های جدید را به آن‌ها بدهد. وزارت جهاد کشاورزی نیز با روش‌هایی مانند تعمیر کانال‌های آب‌رسانی و آموزش‌های عملی به کشاورزان نقش بسزایی در کاهش مصرف آب توسط کشاورزان و حل بحران دریاچه خواهد داشت. همچنین با نظارت دولت باید مقداری از آب ذخیره‌ی سدها به دریاچه واریز شود. اگرچه با اعمال سیاست‌های پیشنهادی حجم دریاچه به‌طور کامل بازیابی نمی‌شود اما به میانگین درازمدت آن نزدیک شده و امید بازگشت به وضع تعادل اولیه و حل بحران را ایجاد می‌کند. همچنین پیش‌بینی حجم آب دریاچه‌ی ارومیه گویای این واقعیت است که با ادامه روند فعلی، دریاچه در آینده با چالش جدی مواجه خواهد شد و برای جلوگیری از این امر، نیازمند اقدامی عاجل از طرف مسئولین و مردم برای نجات دریاچه هستیم.

۸- تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات بی‌دریغ آقای مهندس طلایی و مسئولان محترم شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی برای تهیه داده‌ها و اطلاعات و همچنین راهنمایی‌های آقای دکتر ضرغامی، خانم دکتر سیما، آقای دکتر جوادی، آقای مهندس اخلاقی و آقای مهندس اکبرزاده در مراحل مختلف تهیه‌ی این مقاله قدردانی می‌گردد.

منابع

[1] Sima, S., Tajrishi, M. (2013). Using Satellite data to extract volume-area-elevation relationship for Urmia Lake, Iran, Journal of Great Lake Research, 39, 90-99.

[۲] برنامه مدیریت جامع دریاچه ارومیه (۱۳۸۹). تفاهم‌نامه مشترک حفاظت و مدیریت پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین سازمان حفاظت محیط‌زیست، وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی و استانداری‌های آذربایجان غربی، شرقی و کردستان.

[3] Hassanzadeh, E., Zarghami, M., Hassanzadeh, Y. (2011). Determining the main factors in declining the urmia lake level by using system dynamics modeling, Water Resources Management, 26, 129-145.

[۴] حسن‌زاده، المیرا.، حسن‌زاده، یوسف.، ضرغامی، مهدی.، نورانی، وحید. (۱۳۸۹). تعیین سهم تأثیر ساخت سازه‌های هیدرولیکی بر کاهش تراز آب دریاچه ارومیه، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

[۵] حسن‌زاده، ی. (۱۳۹۱). بررسی علل کاهش تراز آب دریاچه ارومیه و ارائه راه‌کارهای علاج بخشی، پنجمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، دانشگاه تبریز.

[6] Ford, A. (1999). Modeling the environment, an introduction to system dynamics modeling of environmental systems, 1st Edition, Island Press, Washington, DC.

[7] Fletcher, E. (1998). The use of system dynamics as a decision water support tool for the management of scare resources, First International Conference on New Information Technology for Decision Making in Civil Engineering, Montreal, Canada.

[۸] صلوی‌تبار، ع.ا.، ضرغامی، م.، ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۵). مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران، مجله‌ی آب و فاضلاب، ۵۹، ۱۲-۲۸.

[۹] گلیان، س.، ابریشم‌چی، ا.، تجریشی، م. (۱۳۸۶). تحلیل سیاست بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم، مجله‌ی آب و فاضلاب، ۶۳، ۷۰-۸۰.

[10] Article reproduce from United Nations Environment Programme (UNEP) Global Environmental Alert Service (GEAS). (2012). The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences, Environmental Development, 2: 128-137.

[11] Forrester, J.W. (1961). Industrial dynamics, MIT Press, Cambridge.

[12] Forrester, J.W. (1968). Principles of system productivity. Cambridge, MA.

[13] Sterman, J.D. (2000). Business dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill, Boston.

[14] Palmer, R.N., Keyes, A.M., Fisher, S. (1993). Empowering stakeholders through simulation in water resources planning in water management in the 90s, In: A Time for Innovation, ASCE, New York, 451-454.

[15] Simonovic, S.P., Fahmy, H., El-Shorbagy, A. (1997). The use of object-oriented modeling for water resources planning in Egypt, Water Resources Management, 11(4), 243-261.

[16] Guo, H.c., Liu, L., Huang, G.H., Fuller, R., Zou, R., Yin, Y.Y. (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin, Environmental Management, 61(1), 93-111.

[17] Skebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., Marc, V. (2005). Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile Basin, Ethiopia, Journal of Hydrology, 316, 233-247.

[18] Jalali, M., Afshar, A., 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.

[19] Ewers, M. (2005). Combining hydrology and economics in a system dynamics approach: modeling water resources for the San Juan Basin, 23rd International Conference of the System Dynamics Society, Boston.

[20] Mc Bean, E.A. (2008). Global climate change, its projected impacts on water resources, 3rd Iran Water Resources Management Conference, University of Tabriz.

[21] Liu, Y., Guo, H.C., Yajuan, Y.U., Dai, Y.L., Zhou, F. (2008). Ecological–economic modeling as a tool for watershed management: a case study of Lake Qionghai watershed, China, Limnological-Ecology and Management of Inland Waters, 38(2), 89-104.

[۲۲] مجتهدزاده، م.م. (۱۳۷۱). یک مدل دینامیک برای برنامه‌ریزی توسعه مناطق کم آب، مجله برنامه و توسعه، موسسه عالی پژوهش در برنامه‌ریزی و توسعه، ۲(۴).

[۲۳] جلالی، م.ر.، افشار، ع. (۱۳۸۳). شبیه‌سازی پویایی سیستم تولید انرژی مخازن برقابی، اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

[۲۴] مطیعی، ه. (۱۳۸۷). ارزیابی تأثیرات تغییرات آب‌وهوا و خشک‌سالی بر منابع آب کانادا (مطالعه‌ی موردی دریاچه‌ی Superior)، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.

[۲۵] دلاور، م.، مرید، ی.، شفیعی‌فر، م. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات تراز آب دریاچه‌ی ارومیه نسبت به مؤلفه‌های بیلان آبی، مجله هیدرولیک، ۳، شماره ۱، ۴۵-۵۵.

[26] Madani, K., Marino, M. (2009). A System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin, Water Resources Management, 23(11), 2163-2187.

[27] Bagheri, A., Darijani, M., Asgary, A., Morid, S. (2010). Crisis in urban water systems during the reconstruction period: a system dynamics analysis of alternative policies after the 2003 earthquake in Bam-Iran, Water Resources Management, 24(11), 2567-2596.

[28] 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.

[۲۹] رسولی، ع.ا.، عباسیان، ش. (۱۳۸۸). تحلیل مقدماتی سری‌های زمانی تراز سطح آب دریاچه‌ی ارومیه، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، شماره ۲۸، صفحات ۱۳۷-۱۶۵.

[۳۰] نظرنژاد، ح. (۱۳۸۴). بررسی علل کاهش سطح آب دریاچه ارومیه، دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب‌وخاک، دانشگاه شهید باهنر، ۲۱۹۸-۲۲۰۵.

[۳۱] خانی‌تملیه، ذ.ا.، خانی‌تملیه، س.، منتصری، م.، رضایی، ح.، (۱۳۹۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ۱-۸.

[۳۲] طباطبایی، ا. (۱۳۸۸). بررسی علل افت آب‌های زیرزمینی در منطقه شرق دریاچه ارومیه، کنفرانس بین‌المللی منابع آب(ICWR).

[۳۳] جهانبخش، س.، عدالت‌دوست، م.، تدینی، م. (۱۳۸۹). دریاچه ارومیه شاخصی کلاسیک از ارتباط بین لکه‌های خورشیدی و اقلیم در شمال غرب ایران، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، ۹۹، ۴۹-۷۶.

[۳۴] ناصری، ح.ر.، احمدی، س.، صلوی‌تبار، ع.ا. (۱۳۸۹). مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب پایاب سد شهرچای (ارومیه) به روش پویایی سیستم، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶، ۹۷-۱۰۸.

[۳۵] احمدزاده، ح.، مرید، س.، قائمی، ه. (۱۳۹۰). شناسایی مناطق همگن خشک‌سالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش-های خوشه‌بندی، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب‌وخاک، کرمان.

[۳۶] پوراصغر، ف.، حسنعلیزاده، ا.ش.، اکبرزاده، ی.، سلطانی، م.، امیدفر، م. (۱۳۹۱). بررسی انتشار ذرات نمک به محیط پیرامون در اثر خشک شدن دریاچه ارومیه، همایش ملی جریان و آلودگی هوا، دانشگاه تهران، ۱-۷.

[37] Alipour, S. (2006). Hydrogeochemistry of seasonal variation of Urmia Salt Lake, Iran, Saline System, 2-9.
[38] Abbaspour, M., Nazaridoust, A. (2007). Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. International Journal of Environmental Studies, 64(2), 161-169.
[39] Forrester, J.W. (1958). Industrial dynamics a major breakthrough for decision makers, Harvard Business Review, July-August 1958.
[40] Simonovic, S.P. (2009). Managing water resources, methods and tools for a systems approach. UNESCO and Earthscan, UK.
[41] Iran Department of Environment. (2009). Urmia Lake Water and Agricultural Working Group, Sanandaj, http://www.kdrw.ir/fa/page.asp?page_id=294, (in Farsi).
[42] Iran Department of Environment. (2014). Urmia Lake Reclamation Working Group, Tabriz, http://www.irna.ir/fa/News/81030759/, (in Farsi).

پی نوشت

[1] Artemia
[2] Ecological
[3] System Dynamics
[4] Forrester
[5] Sterman
[6] Ford
[7] Palmer
[8] Simonovic
[9] Fletcher
[10] Guo
[11] Erhai
[12] Skebede
[13] Tana
[14] San Juan
[15] Ewers
[16] Mc Bean
[17] Liu
[18] Dynamo
[19] Marino
[۲۰] Hydrography یا آب‌نگاری شاخه‌ای از علوم نقشه‌برداری می‌باشد که پیرامون تهیه‌ی نقشه و داده‌های مکانی از ژرفای آب‌ها بحث می‌کند. به‌طور ویژه تمامی فعالیت‌های تهیه‌ی نقشه از عمق دریاها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌های طبیعی، سدها و همچنین رودخانه‌ها در حیطه‌ی تخصصی دانش آب‌نگاری است.
[21] Exogenous
[22] Pan coefficient
[23] Regression
[24] Methodology
[25] Causual loop diagram
[26] Stock & Flow diagram
[27] Vensim