مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هشتم، شماره بیست و یکم، پاییز ۱۳۹۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

صفحات: ۲۳۰ - ۲۰۷

مدل‌سازی علل خشک شدن دریاچه ارومیه با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم

علیرضا بافنده زنده[۱*]، لیلا حاجی حتملو[۲]، ناصر دانای نعمت آباد[۳]

چکیده

اگر چه دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران، دومین دریاچه شور جهان و بیستمین دریاچه بزرگ جهان است و از نظر آب و هوایی متعادل کننده هوای محیط زیست منطقه می‌باشد، اما در چند دهه اخیر رو به زوال گذاشته است. دلایل متعددی برای خشک شدن این دریاچه ذکر شده است. در این مقاله با توجّه به پویایی مسئله محیط زیست، پویائی شناسی سیستم به‌عنوان متدولوژی مناسب برای مدل‌سازی علل خشک شدن دریاچه ارومیه به کار گرفته شده است. مطابق متدولوژی معرفی شده توسط استرمن، ابتدا مرز مسئله مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای کلیدی و رفتار تاریخی آنها در این مرحله بررسی و مطالعه شد. سپس با استفاده از نمودار زیرسیستم، نمودارهای علی حلقوی و نقشه جریان انباشت، فرضیه پویای مسئله تدوین گردید. پس از شبیه‌سازی و آزمون مدل در نهایت برخی از راه‌کارهای احتمالی احیاء دریاچه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، کاهش ورودی آب‌های سطحی به دریاچه و سدسازی دو عامل اصلی کاهش آب دریاچه می‌باشند. بنابراین تأمین حق آبه دریاچه، محدود نمودن ساخت و ساز سدها می‌تواند دو راه‌کار برای توقف روند خشک شدن دریاچه ارومیه باشد. هر چند دینامیزم موجود در درون مسئله به کارگیری هر راه حلی را با دشواری‌ها و عوارض جانبی متعدد می‌توانند مواجهه کند.

واژگان کلیدی: دریاچه ارومیه، پویائی شناسی سیستم، محیط زیست، بحران آب.

[۱]- دانشیار، گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز (نویسنده مسئول) bafandeh@iaut.ac.ir

[۲]- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع سیستم، موسسه غیر دولتی الغدیر، تبریز hatamloo@gmail.com

[۳]- کارشناسی ارشد،گروه مدیریت توسعه و مهندس صنایع،پژوهشکده توسعه وبرنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی،تبریز n.danaye.n@gmail.com

مقدمه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی کشور است. این حوضه بین استان‌های آذربایجان غربی (۴۶٪)، آذربایجان شرقی (۴۳٪) و کردستان (۱۱٪) قرار دارد. دریاچه ارومیه به عنوان بزرگترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به شمار می‌آید (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴). در سال ۱۳۴۶ دریاچه ارومیه و کلیه جزایر آن به غیر از جزیره اسلامی منطقه حفاظت شده اعلام شده است. بعد از تشکیل کنوانسیون رامسر، از سال ۱۳۵۴ دریاچه ارومیه در فهرست کنوانسیون رامسر قرار گرفت. در سال ۱۳۵۵ در فهرست ذخیره‌گاه‌های بیوسفریک برنامه انسان و بیوسفر یونسکو قرار گرفت (کردوانی و همکاران، ۱۳۹۵). این دریاچه از چهارده رودخانه دائمی همانند رودهای زرینه رود، سیمینه رود، گدار، باراندوز، شهر چای، نازلو چای، هفت رود فصلی، سی‌ونه جریان سیلابی، چشمه‌های داخل دریاچه و بارش مستقیم باران و برف تغذیه می‌شود (سامانی، ۱۳۸۹).

این دریاچه طی دهه گذشته به علت کاهش شدید سطح آب و افزایش شوری، با شرایط بحرانی مواجه شده است. بسیاری از تالاب‌های اقماری اطراف دریاچه نیز در اثر اجرای طرح‌های زیر بنائی، تغییر کاربری زمین، آلودگی و کاهش جریان‌های ورودی آب آسیب دیده‌اند. این مشکلات تنوع زیستی این مجموعه تالابی را که از اهمیّت بین‌المللی برخوردار بوده و برای جوامع محلی فوائد متعدد دیگری نیز فراهم می‌نماید، تهدید می‌کند (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹). کاهش آب دریاچه، افزایش شوری آن، به خطر افتادن حیات موجودات زنده این حوضه، گسترش وسعت شوره‌زارهای حاشیه دریاچه، نفوذ آب شور به آب‌های زیرزمینی و شور شدن آب‌های کشاورزی، این اکوسیستم با ارزش را رو به زوال برده است. با ادامه این روند، کشاورزی در این منطقه در حال از بین رفتن است. با به تأخیر افتادن حل مشکل این اکوسیستم با ارزش، مشکلات عدیده‌ای در آینده نه‌چندان دور به وقوع خواهد پیوست که نه تنها منطقه شمال غرب، بلکه تمامی کشور را تحت تأثیر قرار خواهد داد. خشک شدن دریاچه و افزایش میزان شوری آب، حیات آرتمیا که مهم‌ترین موجود زنده در آب‌های دریاچه ارومیه می‌باشد را با خطر نابودی مواجه کرده است. این خود باعث توقف تولید مثل فلامینگوها از سال ۱۳۷۷ شده که از آرتمیا تغذیه می‌کنند. نسل این پرنده و حیوانات کمیاب دیگری که در این منطقه زندگی می‌کنند، ازجمله: قوچ و میش در جزیره کبودان، گوزن زرد ایرانی در جزیره اشک و پلیکان، کاکایی و غاز در جزیره اسپیر با خطر نابودی مواجه هستند (جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰).

علاوه بر آن افزایش شوری آب دریاچه و تبدیل سطح زیادی از سواحل اطراف آن به شوره‌زار، از تعداد گردشگران این منطقه توریستی کاسته و از نظر اقتصادی صدمات زیادی را به منطقه و کشور وارد نموده است. زوال دریاچه ارومیه دلایل متعددی دارد که برخی از آنها برون‌زا و برخی دیگر با تصمیمات سیاست‌گذاران در گذشته ارتباط دارد. به طور کلی در یک جمع‌بندی می‌توان گفت عوامل مهم مؤثر بر خشک شدن دریاچه ارومیه عبارتند از: نوسانات دوره‌ای اقلیمی، عدم عبور توده هوای مرطوب و باران‌آور مخصوصاً توده هوای مرطوب مدیترانه‌ای (زاهدی و قویدل، ۱۳۸۶)، بهره‌برداری از جریان رودخانه‌ها از طریق سدها و شبکه‌های وابسته جهت مصارف کشاورزی و صنعتی که باعث کاهش آب ورودی به دریاچه گردیده است (سلیمی، ۱۳۹۰)، گرم شدن هوا (توفیقی و همکاران، ۱۳۸۵)، حفر چاه-

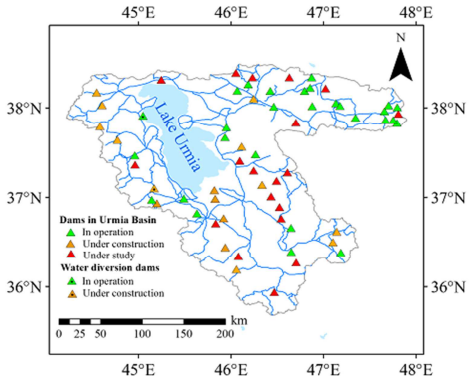
های عمیق و استفاده از سفره‌های زیرزمینی، افزایش سطح اراضی زیر کشت به دلیل پتانسیل آب و خاک مناسب در حوضه دریاچه ارومیه، کاشت درختان مثمر در اراضی شیب‌دار، احداث میان‌گذر شهید کلانتری که باعث افزایش رسوبات در بخش جنوبی دریاچه شده است. این عوامل اگرچه مهم می‌باشند اما نباید فراموش کرد که تغییر و پویایی، یکی از ویژگی‌های محیط زیست است. اکوسیستم‌ها از اجزاء و عناصر به‌هم پیوسته‌ای تشکیل شده‌اند که تغییر در هر عنصر منجر به ایجاد تغییراتی در سایر اجزاء می‌گردد. تعاملات بین عوامل، اثر هر کدام از آنها را تشدید یا تضعیف می‌کند. بنابراین برای بررسی مسائلی همچون خشک شدن دریاچه ارومیه، باید روش‌هایی به کار گرفته شوند که توان توضیح پیچیدگی‌های سیستم را داشته، ارتباط بین متغیرها را شناسایی و در نهایت راه‌کارهایی مناسب جهت حل مشکل ارائه نمایند.

به دلایل ذکر شده، در این مقاله از پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان ابزار مناسبی جهت توضیح پویائی‌های دریاچه ارومیه استفاده شده است. پویائی شناسی سیستم این امکان را می‌دهد که بر خلاف تکنیک‌های آماری چون رگرسیون، ساختار مسئله مشخص شود. منظور از ساختار مسئله، تعاملات و دینامیزمی است که بین متغیرها وجود دارد. پویائی شناسی سیستم علاوه بر این که ساختار مسئله را به صورت تعاملات بین متغیرها نشان می‌دهد، نتیجه این تعاملات را به صورت پویا منعکس می‌کند. به عبارت دیگر پویائی شناسی سیستم برخلاف رویکردهای دیگر که در بررسی مسائل، رویداد محور و ایستا عمل می‌کنند، سعی می‌کند علل بروز مسئله را به صورت پویا و در طول زمان شبیه‌سازی نماید. متغیرهای متعددی در تعامل با هم مسئله خشک شدن دریاچه ارومیه را موجب شده‌اند. به همین دلیل دیدگاه‌ها در خصوص علل خشک شدن دریاچه و در نتیجه راه‌حل‌های احیاء آن متفاوت است. پویائی شناسی سیستم با تمرکز بر ساختار مسئله، کشف متغیرها و روابط علی بین آنها می‌تواند بخشی از پیچیدگی مسئله را توضیح داده، دینامیزم خشک شدن را به وضوح نشان دهد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

از سال ۱۳۵۵ ایران به دلایل مختلف، با روند رو به رشد جمعیت مواجه بوده است؛ به‌طوری‌که تا سال ۱۳۸۹ جمعیت کل سه استان آذربایجان شرقی، غربی و کردستان، ۷۳ درصد رشد داشته است. با افزایش جمعیّت و با توجه به این‌که بخش زیادی از ساکنان این منطقه را روستاییان تشکیل می‌دهند و از ۴۱/۳ درصد جمعیّت فعال این منطقه حدود ۵۲ درصد آنها به کشاورزی مشغول هستند، سطح زیر کشت در این بخش با افزایش قابل توجهی روبه‌رو بوده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده این روند افزایشی جمعیّت تا سال ۱۴۱۰ منجر به ۳/۱۴ برابر شدن جمعیّت در این حوضه می‌گردد (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۰). رشد جمعیّت، منجر به توسعه روستاها و شهرها و رشد کشاورزی و صنعت گردید. این امر باعث افزایش مصرف آب در سه بخش خانگی، کشاورزی و صنعت شده است. بنابراین آب رودخانه‌ها و چاه‌های حفر شده جوابگوی آب مصرفی مورد نیاز نبودند. احداث سدها و پروژه‌های آب‌رسانی، برداشت بی‌رویه از رواناب‌ها و حفر چاه‌های آب، پاسخی در برابر افزایش تقاضای آب بود. شکل ۱ تعداد سدهای بهره‌برداری شده، در حال ساخت و در حال مطالعه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. بدیهی است راه‌حل‌های مذکور

تأثیر به‌سزایی در کاهش حق‌آبه دریاچه ارومیه داشته‌اند. یکی دیگر از عواملی که در زمینه کشاورزی تأثیر به‌سزایی بر مصرف آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه داشت، تغییر الگوی کشت می‌باشد. طی چند دهه اخیر در این منطقه محصولات آب‌دوستی همچون یونجه، پیاز، گندم، چغندرقند، هندوانه، نباتات علوفه‌ای، دانه‌های روغنی، حبوبات و... کشت می‌شود. اکثر این محصولات به دلیل درجه تحمل شوری (EC_e) بیشتر از ۴ دسی زیمنس بر متری که دارند، جهت رشد، به آب زیادی نیاز دارند (اتا اف، ۱۳۷۸). انهدام پوشش طبیعی زمین‌های شیب‌دار اطراف دریاچه و استفاده جهت کشت دیم، باعث کاهش قابلیت خاک برای کشاورزی و فرسایش شدید خاک شده است. بنابراین نه-تنها پوشش گیاهی که می‌توانست ابرهای باران‌زا را برای مدّت زمان بیشتری در این منطقه نگه دارد، از بین رفته، بلکه در اثر فرسایش خاک، آب باران نیز به‌جای سرریز شدن به دریاچه به هدر می‌رود (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۰).



شکل ۱. تعداد سدهای حوضه آبریز دریاچه ارومیه (*حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲*)

مراتع و پوشش‌های گیاهی طبیعی از این جهت که تنظیم‌کننده گردش آب در طبیعت، افزایش‌دهنده نفوذپذیری خاک، خنک‌کننده هوا و کاهنده تبخیر در منطقه هستند، از اهمیّت ویژه‌ای برخوردارند. بنابراین از بین رفتن آنها از طریق چرای دام‌ها در مراتع حوضه ارومیه باعث افزایش دمای محیط و نیز افزایش تبخیر می‌شود. در هر دریاچه گردش آب باعث انتقال اکسیژن و مواد محلول در آب، به نقاط مختلف می‌گردد. با توجّه به شیب حدود یک درصدی شمال به جنوب دریاچه ارومیه، گردش آب مانع تشکیل بلورهای نمک می‌شود. با خاک‌ریزی و پرکردن دریاچه توسط بتون، جهت احداث بزرگراه شهید کلانتری و تقسیم دریاچه به دو بخش شمالی و جنوبی، این گردش طبیعی آب در دریاچه ارومیه مختل و باعث ته‌نشینی مواد موجود در آب شده است که منجر به افزایش غلظت نمک آب بخش شمالی دریاچه به بیشتر از ۳۶۰ گرم در لیتر شده است. این عملیات در تبدیل دریاچه به توده عظیم نمک مؤثر است (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۰).

میزان تبخیر و بارندگی در اثر افزایش دمای محیط تغییر می‌کند. در منطقه مورد مطالعه دما طی ۳۰ سال اخیر حداقل به‌اندازه یک درجه افزایش داشته است. به‌طورکلی به ازای هر یک درجه افزایش دما، ۲۰ میلی‌متر افزایش تبخیر و ۲/۵ درصد افزایش مصرف آب در بخش‌های مختلف خواهیم داشت (جلیلی و همکاران، ۱۳۹۰). بارندگی که

شامل کلیه نزولات آسمانی (باران، برف و تگرگ) است، مهم‌ترین منبع تأمین آب قابل تجدید محسوب می‌گردد (علیزاده، ۱۳۷۴). طی سال‌های اخیر افزایش دما (۰/۱۸ درجه سانتیگراد در دهه) و کاهش بارش باران و برف (حدود ۹ mm در دهه) در حوضه این اکوسیستم، بروز و گسترش خشکسالی را به دنبال داشته است. افزایش دمای هوا و تبخیر و همچنین کاهش بارش نشان می‌دهد که دریاچه ارومیه شرایط خشکی را تجربه کرده است. از سوی دیگر تأثیر اصلی آنتروپژونیک[1] (انسان‌شناختی)، هدایت منابع آب جهت آبیاری کشاورزی و مصرفی بوده است؛ در نتیجه منجر به خشکسالی اجتماعی-اقتصادی که نقش مهمی در خشکسالی منطقه دارد، شده است؛ زیرا تقاضا برای آب از عرضه بیش از حدّ است (چوباری و همکاران، ۲۰۱۶). کاهش ورودی دریاچه و به دنبال آن کاهش سطح دریاچه و افزایش سطح شوره‌زارهای خط ساحلی پیامد این امر طی دهه‌های اخیر می‌باشد. از طرفی بخشی از این بارندگی اندک، به دلیل عدم مدیریت و هدایت نشدن، به هرز آب تبدیل شده و بخشی از آن نیز تبخیر می‌گردد. اهمیت موضوع موجب شده اخیراً تحقیقات متعددی در مدت زمان کوتاه در خصوص مسائل مرتبط با دریاچه ارومیه انجام پذیرد. این تحقیقات هر کدام از منظری به علل و تبعات خشک شدن دریاچه ارومیه پرداخته‌اند. سلیمی (۱۳۹۰)، مشکل زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را از منظر حقوق بین‌الملل محیط‌زیست مورد بررسی قرار داده است. ایشان با مبنا قرار دادن کنوانسیون رامسر در حفاظت از تالاب‌ها، انجام پروژه‌های اقتصادی نظیر احداث بزرگ‌راه شهید کلانتری روی دریاچه و سدهای متعدد مخزنی روی رودخانه‌های تغذیه کننده آن را در مغایرت با اصول و قواعد عام بین‌المللی، از دلایل اصلی مسائل زیست محیط دریاچه ارومیه می‌داند. گلابیان (۱۳۸۸) به بیان برخی دلایل خشک شدن دریاچه ارومیه و بررسی پروژه انتقال آب از دریاچه خزر به دریاچه ارومیه، از جنبه‌های مختلف پرداخته است. علوی پناه و همکاران (۱۳۸۴) تأثیر میان‌گذر شهید کلانتری در تغییرات کیفی آب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بر اثر نتایج حاصل از مطالعه پروفیل بازتاب‌های طیفی، اختلافات قابل توجهی در توزیع پارامترهای کیفی آب در دو سوی میان‌گذر مشاهده می‌گردد که احتمالاً ناشی از عدم ارتباط هیدرولیکی کامل بین دو سوی میان‌گذر از طریق بازه موجود می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هم باندهای انعکاسی و هم باند حرارتی توانایی زیادی برای تشخیص اثر گل‌آلودگی و شوری دارند. باندهای TM۳ و TM ۶ در مقایسه با باندهای دیگر انعکاسی نقش مهم‌تری در بازتاب‌های طیفی آب‌های شور و محتوی رسوب دارند.

در گزارش جامعه مهندسان مشاور ایران (۱۳۹۰)، اقلیم و پدیده خشکسالی، تغییرات کالبدی حوضه دریاچه و افزایش جمعیّت، احداث فزاینده سد بر رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه، توسعه سطح کشت و بهره‌برداری مفرط از منابع آب، تخریب مراتع و پوشش گیاهی در حوضه آبریز، احداث بزرگراه شهید کلانتری و فقدان مدیریت مناسب در این حوضه از عوامل اصلی تخریب اکوسیستم ارومیه شناخته شده است. جلیلی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی تأثیر فاکتورهای اقلیمی و تغییرات سری زمانی آنها پرداخته، درنهایت به این نتیجه می‌رسند که عوامل اقلیمی در افت تراز آب دریاچه سهیم بوده‌اند. محمدرضاپورطبری (۱۳۹۰) به ارائه برنامه بهینه بهره‌برداری از منابع آب داخل حوضه و

1- anthropogenic

احیای منابع آبی برون‌حوضه‌ای می‌پردازد. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) با متدولوژی پویائی شناسی سیستم، متغیر سدسازی را یکی از اصلی‌ترین عوامل دانسته و تأثیر سدهای علویان، مهاباد، سهند و زرینه‌رود را بررسی کرده است. آنها تأثیر سدهای احداثی جدید را بر دریاچه ارومیه مشخص و راهکارهای مدیریت آب‌های ورودی و خروجی دریاچه را بررسی نموده است. نتایج نشانگر آن است که از بین این عوامل بررسی شده، احداث چهار سد منتخب در حدود ۲۵٪، تغییرات بارش بر سطح دریاچه در حدود ۱۰٪ و اضافه برداشت از منابع آب سطحی ۶۵٪ در کاهش تراز آب دریاچه در سال‌های اخیر تأثیر داشته است. گلیان و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهشی با استفاده از متدولوژی پویائی شناسی سیستم اثر اجرای سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بر تراز آن مورد بررسی قرار داده‌اند. راهکارهای مورد مطالعه آنها جهت کاهش تأثیر این سیاست‌ها بر تراز آب دریاچه شامل احداث سد شهید مدنی (ونیار)، کاهش نیاز آبی در هر هکتار و ترکیبی از دو سیاست اول و دوم می‌باشد.

فاضل و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه الگوی فضایی بارش موجود در حوضه دریاچه ارومیه، حاصل از مؤلفه اصلی (PC[1]) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای نشان داد که تغییرات بارش فصلی مهم‌ترین ویژگی کنترل الگوی فضایی بارش در حوضه دریاچه است. ۲۵ و ۷۵ درصد از بارش‌های زمستان و پاییز مهم‌ترین متغیرهایی هستند که الگوی فضایی اولین مؤلفه اصلی چرخان را کنترل می‌کنند که ۳۲ درصد از واریانس کل را بیان می‌کند. تغییرات بارش تابستان و بهار به ترتیب مهم‌ترین متغیرها در مؤلفه‌های اصلی دوم و سوم هستند. تنوع فصلی در مقدار بارش و فصلی بودن با توپوگرافی توضیح داده شده و تحت تأثیر دریاچه و بادهای غربی است که به قدرت نوسانات آتلانتیک شمالی ارتباط دارد. علیرغم استفاده از سری‌های زمانی ناقص با طول‌های مختلف، مناطق تحت شناسایی از لحاظ فیزیکی معنی‌دار هستند.

نتایج مطالعه شادکام و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که جریان سالانه دریاچه ارومیه طی دوره مطالعه ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰، ۴۸٪ کاهش یافته است. حدود سه پنجم این تغییر ناشی از تغییرات آب و هوایی بود و حدود دوپنجم به دلیل توسعه منابع آب بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای جلوگیری از خشک شدن بیشتر دریاچه ارومیه، برنامه‌های ملی برای کاهش استفاده از آب آبیاری و توسعه برنامه‌های بین‌المللی برای مقابله با تغییرات اقلیمی ضروری می‌باشد. بوروفکا[2] و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی تأثیر تغییرات فعالیت‌های تەنشینی رسوبات بر نوسانات اصلی دریاچه آرال بیان کرده‌اند که تغییرات آب و هوایی باعث کاهش عمق دریاچه آرال به ۴۳-۴۲ متر گردیده است؛ درصورتی‌که حداکثر سطح آن باید ۷۳-۷۲ متر باشد. میکلین[3] (۱۹۹۸) بیان می‌کند که دلیل اصلی خشک شدن دریاچه آرال بهره‌برداری بی‌رویه از آب آن جهت آبیاری اراضی کشاورزی بوده است. این عمل منجر به عقب‌نشینی ۱۳ متری دریاچه بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۷ و کاهش ۴۰ درصد آب آن شده است. شهریاری (۱۳۸۰) به این مطلب می‌پردازد که آرال به دلیل منفعت‌طلبی‌های شوروی سابق، در راستای خودکفایی در کشت گندم و برنج، دچار معضل خشکسالی دریاچه آرال شده، به‌طوری‌که این خشکسالی عواقب جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته است.

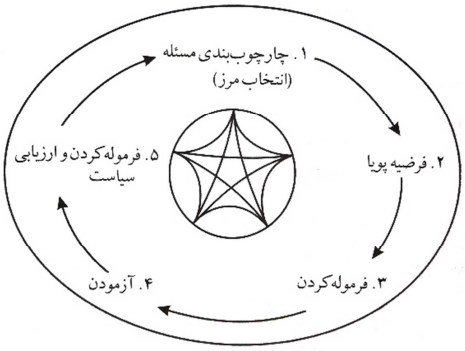
1- principal component
2- Boroffka
3- Micklin

همچنین راهکارهای دگرگونی و اصلاح در کشاورزی، تشکیلات و بازرسی روش آبیاری، کاهش سطح کشت، جنگل کاری مجدد حوضه دریاچه، پرورش آبزیان و بازسازی سدها را جهت کاهش بحران دریاچه آرال پیشنهاد داده است که موجب ایجاد مجدد اکوسیستم طبیعی منطقه می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

با توجّه به پیچیدگی مسئله و پویا بودن آن، در این مقاله، پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان روش مدل‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی، پنج مرحله معرفی شده توسط استرمن بکار گرفته شده است (استرمن[1]، ۲۰۰۰). شکل۲، مراحل متدولوژی پویائی شناسی سیستم را نشان می‌دهد. اولین مرحله چارچوب‌بندی مسئله (انتخاب مرز مدل) است. در این مرحله، متغیرهای کلیدی، قلمرو زمانی و مکانی مسئله مشخص شده است. همچنین تاریخچه و روند گذشته مربوط به متغیرهای کلیدیِ دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرحله روش گردآوری داده به صورت اسنادی می‌باشد. اطلاعات با مراجعه به پایگاه داده سازمان‌های مختلف از قبیل سازمان حفاظت محیط زیست، آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی و غربی، مرکز آمار ایران (۱۳۹۵) و وب سایت ستاد احیاء دریاچه ارومیه به دست آمد. در مرحله دوم فرضیه پویائی مسئله تدوین شد. در این مرحله ساختاری که رفتار مسئله‌زا را به وجود آورده، به صورت فرضیه‌های پویا، شناسایی گردید. برای این کار نمودار زیرسیستم، نمودارهای علی–حلقوی و نقشه‌های جریان- انباشت به کار رفت. فرضیه‌های پویا بر اساس اطلاعات به دست آمده از ادبیات موضوع، بررسی رفتارهای مرجع و همچنین دیدگاه افراد خبره تدوین شده‌اند. در مرحله سوم، مدل شبیه‌سازی شده از طریق تخمین پارامترها، بیان روابط ریاضی بین متغیرها و تعیین شرایط اولیه متغیرها طراحی شد. برخی از پارامترها و توابع با مراجعه به ادبیات تحقیق به دست آمد و برخی دیگر بر اساس روابط منطقی موجود بین متغیرها، توسط محققین برآورد شدند. شبیه‌سازی مسئله با نرم‌افزار ونسیم[2] انجام پذیرفت. مرحله چهارم اختصاص به آزمون مدل شبیه‌سازی شده دارد. برای اطمینان از اعتبار مدل از آزمون‌های شرایط حدی و آزمون رفتار مجدد استفاده گردید. در نهایت در مرحله پنجم برخی سیاست‌ها و سناریوهای احیاء دریاچه ارومیه، طراحی، ارزیابی و پیشنهاد شدند. نمودار ۲ متدولوژی انجام کار را نشان می‌دهد.

1- Sterman
2- Vensim (https://vensim.com)



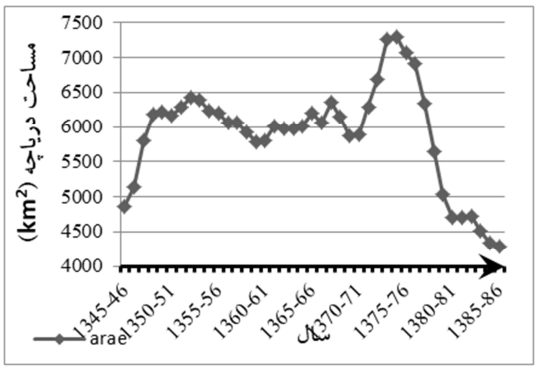
شکل ۲: روش پویایی شناسی سیستم (*استرمن، ۲۰۰۰*)

یافته‌های تحقیق

مطابق متدولوژی معرفی شده در قسمت داده‌ها و روش‌ها، نتایج پژوهش در پنج مرحله توضیح داده می‌شود.

الف) چارچوب‌بندی مسئله (انتخاب مرز مدل):

همچنان که شکل ۳ نشان می‌دهد روند کاهشی مساحت دریاچه ارومیه طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ تسریع یافت و سطح دریاچه در سال ۱۳۸۰ به ۴۷۱۶ کیلومتر مربع رسید که نسبت به سال ۱۳۶۸ به‌اندازه ۱۴۴۱ کیلومتر مربع با کاهش روبه‌رو بوده است. اندازه سطح دریاچه، در سال ۱۳۸۹ به کمترین میزان خود در ۴۰ سال، یعنی به اندازه ۴۰۱۷ کیلومترمربع رسید. روند تغییرات تراز دریاچه ارومیه در یک قرن اخیر در شکل ۴ ترسیم گردیده است. روند نزولی این دریاچه پس از دوران پرآبی آن در سال ۱۳۷۴، شروع گردیده و در طی بیست سال، تراز دریاچه بیش از ۸ متر افت کرده است. در واقع با توجه به ارقام ثبت شده، به‌طور متوسط دریاچه در این بیست سال اخیر سالیانه با افت ۴۰ سانتی متری مواجه بوده است. با توجه به عمق کم این دریاچه، این میزان افت تراز منجر به خشکی درصد قابل ملاحظه‌ای از سطح دریاچه گردیده و بیش از ۳۰ میلیارد مترمکعب از حجم آب آن در اثر تبخیر و عدم ورود منابع آب کافی به آن از بین رفته است (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴). متغیرهای متعددی در کاهش سطح و تراز دریاچه ارومیه مؤثر بوده‌اند. برخی از این متغیرها خارج از اراده انسانی و برخی از طریق مداخلات انسانی باعث خشک شدن دریاچه ارومیه شدند. شرایط اقلیمی همچون میزان بارندگی و دمای حوضه آبریز دریاچه ارومیه و همچنین جمعیت از جمله متغیرهای برون زای مؤثر بر روند خشک شدن دریاچه ارومیه هستند.



شکل ۳: مساحت دریاچه ارومیه (*وزارت نیرو، ۱۳۹۱*)



شکل ۴: روند تغییرات تراز دریاچه ارومیه در یک قرن اخیر (*رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴، ص ۱۱*).

در فاصله زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۵، حداقل دمای ایستگاه‌های محدوده حوضه دریاچه ارومیه به ازای یک دهه، افزایش ۰/۱ تا ۰/۵ درجه سانتی‌گرادی داشته است. به عبارت دیگر مقدار تجمعی افزایش دمایِ حداقل، در طی ۴۵ سال برای ایستگاه‌های تبریز و ارومیه به ترتیب حدود ۲ و ۰/۵ درجه سانتیگراد بوده است. در همان دوره ۴۵ ساله‌ی منتهی به ۲۰۰۵، حداکثر دمای ایستگاه‌های محدوده حوضه دریاچه ارومیه (ارومیه، تبریز و خوی) به ازای یک دهه، افزایش ۰/۱ تا ۰/۳ درجه سانتیگرادی داشته است. به عبارتی مقدار تجمعی افزایش دمایِ حداکثر، در طی ۴۵ سال برای ایستگاه‌های تبریز و ارومیه به ترتیب حدود ۱ و ۰/۵ درجه سانتیگراد بوده است. افزایش دمای حداقل و حداکثر در حوضه دریاچه ارومیه از یک طرف باعث افزایش تبخیر، تعرق و بالا رفتن نیاز آبی گیاهان شده و از طرف دیگر با افزایش تبخیر از سطح دریاچه، باعث کاهش تراز دریاچه ارومیه گردیده است (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴). همچنین پیش‌بینی می‌شود (صلاحی و همکاران، ۱۳۹۴) که تا سال ۲۰۵۰ میزان دمای هوای حوضه آبریز دریاچه ارومیه در حدود ۳,۱ درجه افزایش داشته باشد.

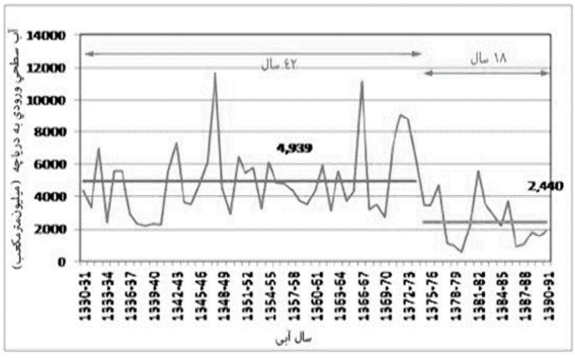
بر اساس آخرین آمار ایستگاه‌های بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه، میانگین بارش حوضه در دوره آماری ۱۳۷۴-۷۵ تا ۱۳۹۱-۹۲، برابر با ۳۱۷ میلی‌متر بوده است .این میزان نسبت به دوره آماری ۱۳۳۰-۳۱ تا ۱۳۷۳-۷۴، ۶۸ میلی‌متر کاهش داشته است. به عبارت بهتر میزان بارش حوضه با کاهش ۱۸ درصدی در دوره اخیر نسبت به دوره قبل همراه بوده است. از سوی دیگر، صلاحی و همکاران (۱۳۹۴) پیش‌بینی کرده‌اند که میزان بارش تا سال ۲۰۵۰ کاهش ۸/۲۲ درصدی داشته باشد. لازم به ذکر است که علاوه بر کاهش میانگین بارش، درصد فراوانی تعداد روزهای با بارش مؤثر نیز در سطح حوضه در سال‌های اخیر کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. این مسئله منجر به کاهش میزان رواناب تولیدی در سطح حوضه و در نتیجه کاهش حجم آب ورودی به دریاچه گردیده است (کمیته اجتماعی- فرهنگی ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۱۳۹۴).

جمعیّت متغیر دیگری است که به طرق مختلف بر زوال دریاچه ارومیه تأثیر گذاشته است. بر اساس نتایج سرشماری نفوس و مسکن، جمعیت کشور در سال ۱۳۹۰ نسبت به اولین دوره سرشماری (۱۳۳۵) نزدیک چهار برابر و در

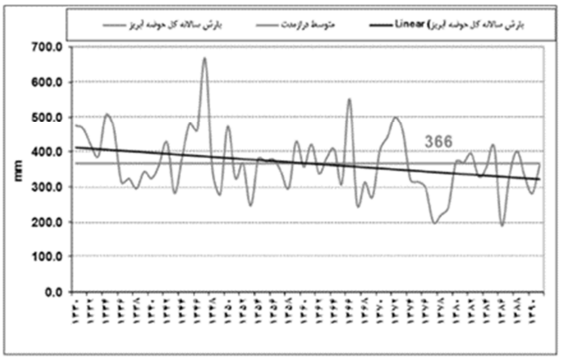
مقایسه با اواخر دوره قبل از انقلاب ۲/۲ برابر شده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). افزایش جمعیّت نه تنها تقاضای آب خانگی بلکه تقاضای آب کشاورزی و صنعتی را نیز افزایش داد. علاوه بر روند افزایشی سطح زمین‌های کشاورزی، الگوی آبیاری در این منطقه به صورت کشت آبی گسترش یافته است. به طوری که سطح زیرکشت آبی از میزان ۱۵۰ هزار هکتار در سال ۱۳۵۸ به بیش از ۴۰۰ هزار هکتار در سال ۱۳۸۵ رسیده که افزایش مصرف آب از منابع سطحی و زیرزمینی را از ۱/۸ میلیارد مترمکعب به ۵/۶ میلیارد مترمکعب در پی داشت (وزارت نیرو، ۱۳۹۱؛ جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰). همچنین روش‌های آبیاری سنتی همچون غرق آبی بازدهی آبیاری در منطقه را به ۳۰ درصد رسانده است. این بدان معناست که بازدهی هر مترمکعب آبی که برای آبیاری استفاده می‌گردد کمتر از ۵۰۰ گرم می‌باشد، در حالی‌که در سطح جهانی با به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری این بازدهی در حدود ۱۵۰۰ گرم در ازای مصرف هر لیتر آب است (جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰).

یکی دیگر از عواملی که در زمینه کشاورزی تأثیر بسزایی در به وجود آمدن این مشکل داشته است، تغییر الگوی کشت می‌باشد. در این منطقه طی سال‌های اخیر کشت محصولات آب دوستی همچون چغندر قند و باغات میوه میزان مصرف آب را افزایش داده است (کمالی و یونس زاده، ۱۳۹۵). علاوه بر کشاورزی، دامداری نیز از مشاغل اصلی مردم این منطقه است. چرایِ دام‌های اهلی در مراتع این حوضه، باعث متراکم شدن خاک گشته و تخلخل و نفوذ-پذیری خاک را کاهش داده و مانع رشد گیاه در آن می‌شود. کاهش نفوذپذیری خاک، مانع نفوذ آب به آبخوان‌ها شده؛ بنابراین بارش‌ها به هرزآب تبدیل و بخش وسیعی از آن تبخیر می‌گردد. مراتع و پوشش‌های گیاهی طبیعی از این جهت که تنظیم‌کننده گردش آب در طبیعت، افزایش‌دهنده نفوذپذیری خاک، خنک‌کننده هوا و کاهنده تبخیر در منطقه هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. بنابراین از بین بردن آنها در حوضه ارومیه باعث افزایش دمای محیط و نیز افزایش تبخیر خواهد شد (جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰).

افزایش جمعیت و رشد کشاورزی و صنعت، افزایش مصرف آب را در سه بخش خانگی، کشاورزی و صنعت در پی دارد. بنابراین آب رودخانه‌ها و چاه‌های حفر شده جوابگوی آب مصرفی مورد نیاز نخواهد بود. بنابراین نیاز به تأمین آب، احداث سدها و چاه‌های آب را در پی داشت. با احداث سدها بر روی رودخانه‌های منتهی به دریاچه، میزان آب ورودی به دریاچه کاهش یافته و سهم دریاچه از نزولات آسمانی کمتر شده است. این اقدامات انقباض دریاچه و انبساط سامانه‌های پیرامون آن را به دنبال داشته است.



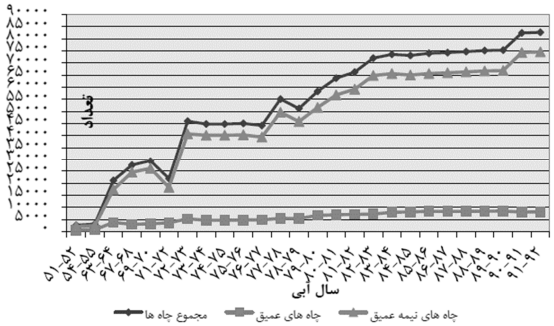
شکل ۶: سری بلند مدت رواناب‌های ورودی به دریاچه ارومیه (میلیون متر مکعب) *(رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴)*



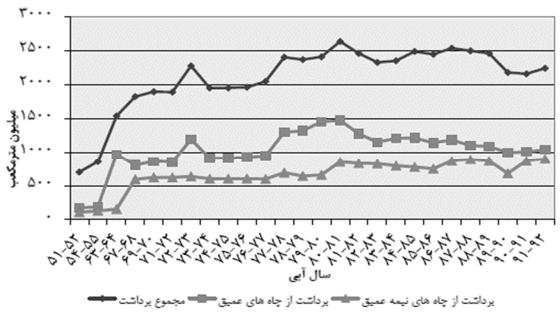
شکل ۵: روند کاهشی بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (کمیته اجتماعی- فرهنگی ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۲۰۱۶)

همان گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌گردد، میانگین مجموع منابع آب سطحی ورودی به دریاچه ارومیه از ۴۹۳۹ میلیون مترمکعب در دوره اول به ۲۴۴۰ میلیون مترمکعب در دوره دوم کاهش یافته است. در واقع میانگین حجم منابع آب سطحی ورودی به دریاچه در دوره آماری ۱۸ ساله اخیر، در حدود ۲۵۰۰ میلیون مترمکعب یعنی حدود پنجاه درصد کاهش داشته است (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴). علاوه بر آب رودخانه‌ها، آب‌های زیر زمینی از جمله منابعی هستند که بخشی از آب دریاچه را تأمین می‌کنند. همه این آب‌ها، به دلیل شرایط مکانی خاص دریاچه، به سمت آن جاری می‌گردند. متوسط آبی که به‌طور مستقیم از جریان‌های زیرزمینی به دریاچه می‌ریزد حدود ۲۱۶ میلیون مترمکعب می‌باشد (جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰).

منابع زیرزمینی حدود ۵۰ درصد از نیاز آب مصرفی این حوضه را تأمین می‌کند (وزارت نیرو، ۱۳۸۹). حفر حدود ۸۸۰۰۰ حلقه چاه در سطح حوضه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر آبدهی رودخانه‌های حوضه داشته و این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه رواناب ورودی به دریاچه گردیده است که بسیاری از این چاه‌ها غیرمجاز می‌باشند (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴). بر طبق آمار موجود تعداد چاه‌های غیر مجاز حوضه بیش از ۴۰۰۰۰ حلقه می‌باشد. تعداد کل چاه‌های عمیق و نیمه عمیق حفاری شده در سطح حوضه در طی چهار دهه منتهی به سال آبی ۹۱-۹۲، ۳۱ برابر و نسبت به سال آبی ۶۳-۶۴، ۴ برابر شده است. تعداد قابل ملاحظه‌ای از چاه‌های حفر شده در سطح حوضه به صورت چاه‌های نیمه عمیق می‌باشد که اکثراً در حریم رودخانه‌ها و آبراهه‌های حوضه واقع شده‌اند. بر طبق آمار اعلام شده تعداد چاه‌های نیمه عمیق در سطح حوضه در سال آبی ۹۱-۹۲ نسبت به سال آبی ۶۳-۶۴، بیش از ۴ برابر و میزان تخلیه از آنها در حدود ۶ برابر افزایش داشته است (رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴؛ وزارت نیرو، ۱۳۹۲؛ دمپا، ۱۳۹۳). شکل‌های ۷ و ۸ روند تغییرات تعداد چاه‌ها و میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: روند تعداد چاه‌های عمیق و نیمه عمیق *(رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴)*



شکل ۸: میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه *(رجبی و سراوانی، ۱۳۹۴)*

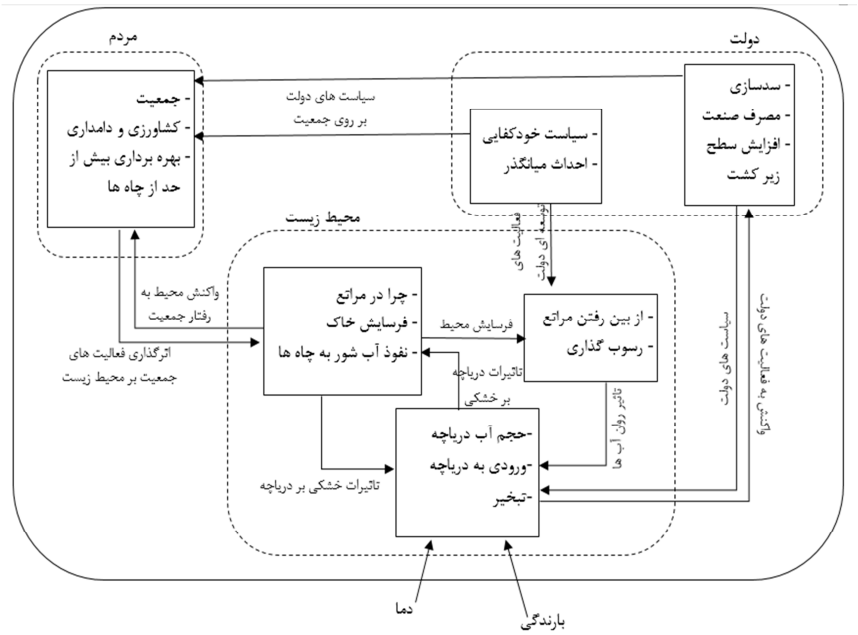
از دیگر عواملی که جزو مداخلات انسانی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بوده احداث بزرگراه شهید کلانتری می‌باشد. در هر دریاچه گردش آب باعث انتقال اکسیژن و مواد محلول در آب، به نقاط مختلف می‌گردد. با توجه به شیب حدود یک درصدی دریاچه ارومیه از شمال به جنوب، گردش آب مانع تشکیل بلورهای نمک می‌شود. با خاک‌ریزی و پر کردن دریاچه، جهت احداث بزرگراه شهید کلانتری و تقسیم دریاچه به دو بخش شمالی و جنوبی، این گردش طبیعی آب در دریاچه ارومیه مختل و باعث ته‌نشینی مواد موجود در آب شده است که این خود تغییراتی را در روند طبیعی دریاچه به دنبال داشته و منجر به افزایش غلظت نمک آب بخش شمالی دریاچه به بیشتر از ۳۶۰ گرم در لیتر شده است. این عملیات در تبدیل دریاچه به توده عظیم نمک کمک می‌کند (جامعه مهندسان مشاور ایران، ۱۳۹۰؛ شفیعی فر و ولی زاده؛ ۱۳۸۷).

ب) تدوین فرضیه پویا

فرضیه پویا، چگونگی بروز مسئله و ساختار آن را در قالب یک تئوری توضیح می‌دهد. در این مقاله برای تدوین فرضیه پویا، نمودار زیرسیستم، نمودارهای علی- حلقوی و نمودارهای حالت و جریان به کار رفته است.

نمودار زیرسیستم

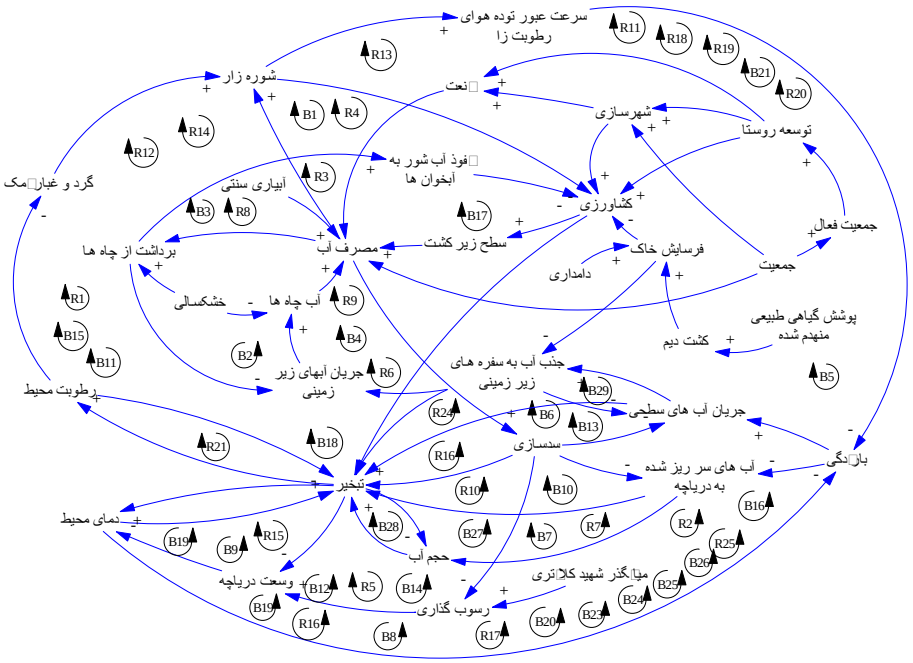
نمودار زیرسیستم معماری کلی مدل را نشان می‌دهد. شکل ۹ نمودار زیرسیستم مربوط به دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به دست آمده از اسناد و مدارک، ادبیات موضوع و مصاحبه با خبرگان به نظر می‌رسد سه زیرسیستم مردم، دولت و محیط زیست در تعامل با هم موجب خشک شدن دریاچه شده‌اند. هر کدام از آنها دارای متغیرهایی می‌باشند که بر سایر متغیرها تأثیرگذارند.



شکل ۹: نمودار زیرسیستم

نمودار علی – حلقوی

شکل ۱۰ نمودار علی – حلقوی مربوط به پویائی‌های دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. این نمودار بر مبنای ادبیات تحقیق و همچنین مصاحبه با افراد خبره به دست آمده است. با توجّه به اینکه تعداد حلقه‌های موجود زیاد است، برای تشخیص راحت‌تر، راهنمایی به صورت جدول ۱ و ۲ این حلقه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار علی – حلقوی

جدول ۱: شرح حلقه‌های علی تعادلی

نام حلقه	شرح	نام حلقه	شرح
B1	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، شوره‌زار، کشاورزی	B2	مصرف آب، برداشت آب از چاه‌ها، جریان آب‌های زیرزمینی، میزان آب چاه‌ها، مصرف آب
B3	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، برداشت آب از چاه‌ها، نفوذ آب شور به آبخوان، کشاورزی	B4	مصرف آب، سدسازی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، میزان آب چاه‌ها، مصرف آب
B5	مصرف آب، حجم شوره‌زارها، سرعت حرکت توده‌های هوای رطوبت‌زا، میزان بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، میزان آب چاه‌ها، مصرف آب	B6	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، جریان آب‌های سطحی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی
B7	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی	B8	مصرف آب، سدسازی، تبخیر، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
B9	مصرف آب، سدسازی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیر-زمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	B10	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب دریاچه، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی

B11	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی	B12	در اثر افزایش مصرف آب، سدسازی و رسوب‌گذاری افزایش، وسعت دریاچه کاهش، دمای محیط افزایش، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها و مصرف آب کاهش دارد.
B13	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره‌زار، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره-های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	B14	مصرف آب، سدسازی، رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
B15	مصرف آب، سدسازی، رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره‌زار، کشاورزی، سطح زیر-کشت، مصرف آب	B16	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره‌زارها، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیر-زمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
B17	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب دریاچه، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره‌زار، کشاورزی	B18	کشاورزی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زارها، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیر-زمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب، برداشت آب از چاه‌ها، نفوذ آب شور به آبخوان، کشاورزی
B19	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	B20	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط
B21	سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار، وسعت شوره‌زار، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا	B22	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، تبخیر، دمای محیط
B23	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، دمای محیط	B24	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط
B25	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	B26	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب، تبخیر، دمای محیط
B27	دمای محیط، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب دریاچه، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	B28	تبخیر، حجم آب دریاچه، تبخیر

جدول ۲: شرح حلقه‌های علی تعادلی

نام حلقه	شرح	نام حلقه	شرح
R1	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی	R2	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
R3	کشاورزی، تبخیر، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیر-	R4	کشاورزی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های

	زمینی، میزان آب چاه‌ها، مصرف آب، شوره‌زار، کشاورزی		زیرزمینی، میزان آب چاه‌ها، مصرف آب، شوره‌زارها، کشاورزی
R5	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی	R6	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر، وسعت دریاچه افزایش، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
R7	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب، تبخیر، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	R8	مصرف آب، برداشت آب از چاه‌ها، نفوذ آب شور به آبخوان، کشاورزی، تبخیر آب، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیر-زمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
R9	مصرف آب، برداشت آب از چاه‌ها، نفوذ آب شور به آبخوان، کشاورزی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	R10	مصرف آب، سدسازی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب دریاچه، تبخیر، وسعت دریاچه افزایش، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب
R11	مصرف آب، سدسازی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره‌زار، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیرزمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	R12	کشاورزی، سطح زیرکشت، مصرف آب، سدسازی، رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی
R13	مصرف آب، سدسازی و رسوب‌گذاری، وسعت دریاچه، دمای محیط، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره-زارها، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، جریان آب‌های زیر-زمینی، آب چاه‌ها، مصرف آب	R14	کشاورزی، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، کشاورزی
R15	دمای محیط، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	R16	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط
R17	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	R18	سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، تبخیر و رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا
R19	سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، تبخیر و رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، وسعت شوره-زارها، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا	R20	سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا، بارندگی، آب سرریز شده به دریاچه، حجم آب، تبخیر، رطوبت محیط، گرد و غبار نمک، شوره‌زار، سرعت عبور توده هوای رطوبت‌زا
R21	تبخیر، رطوبت محیط، تبخیر	R22	دمای محیط، تبخیر، دمای محیط
R23	دمای محیط، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط	R24	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط
R25	دمای محیط، بارندگی، جریان آب‌های سطحی، جذب آب به سفره‌های زیرزمینی، تبخیر، وسعت دریاچه، دمای محیط		

فرموله کردن مدل شبیه‌سازی

در این مرحله فرضیه پویا با استفاده از نرم افزار ونسیم به یک مدل شبیه‌سازی، تبدیل شد. مقادیر اولیه همچون میزان آب موجود در دریاچه و میزان آب پشت سدها در زمان شبیه‌سازی، پارامترهایی همچون ضریب جریان

سطحی، ضریب شوری دریاچه و ضریب تبخیر از سطح تشتک و نیز توابع ریاضی که رابطه بین متغیرها را تبیین می‌کند با مراجعه به ادبیات تحقیق برآورد گردید.

ج) اعتبارسنجی مدل

برای اعتبار سنجی از دو روش آزمون در شرایط حدی و آزمون رفتار مجدد استفاده شد. در آزمون در شرایط حدی میزان حداکثر مقدار آب ذخیره شده در سدها صفر در نظرگرفته شد، طبق انتظار میزان آب دریاچه در مدل شبیه‌سازی شده افزایش را نشان می‌داد. همچنین با فرض عدم برداشت از روان آب‌ها میزان تراز دریاچه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. همچنین در آزمون رفتار مجدد، حجم آب دریاچه حاصل از مدل (محاسباتی) در مقایسه با حجم آب واقعی دریاچه (مشاهداتی)، میزان خطای حدوداً ۱۰ درصد را نشان می‌دهد.

د) طراحی و ارزیابی سیاست‌ها

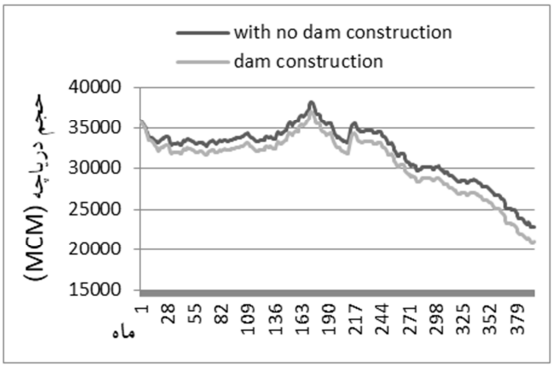
در این مرحله متغیرهای مختلفی که در کاهش حجم آب دریاچه ارومیه نقش دارند مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین این متغیرها بر اساس مطالعات انجام گرفته عبارتند از: ادامه احداث سدها بر روی رودخانه‌های منتهی به دریاچه، کاهش حجم روان آب‌ها به دلیل برداشت در مسیر، کاهش نزولات و افزایش دما (تغییرات اقلیمی)، افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی.

سناریو اول: تأثیر احداث سدها در منطقه

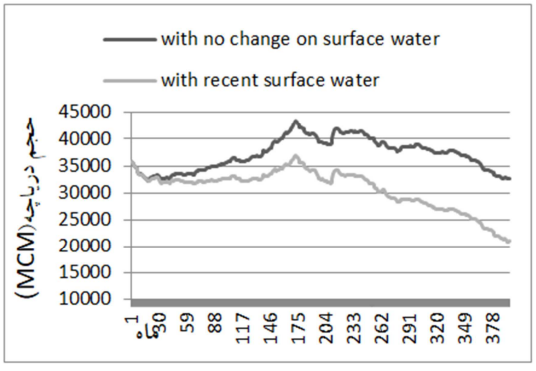
در این سناریو تأثیر ادامه احداث سدها بر روی حجم آب دریاچه مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، با ادامه احداث سدها کاهش حجم آب دریاچه تسریع خواهد یافت.

سناریو دوم: تأثیر کاهش حجم آب‌های سطحی به دریاچه

با توجّه به گذشت زمان، حجم آب‌های سطحی ورودی به دریاچه، به دلیل برداشت‌های بی‌رویه برای مصارف مختلف، کاهش یافته است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص است اگر این منبع اصلی تغذیه دریاچه ارومیه کاهش نمی‌یافت و مانند قبل بود، میزان کاهش حجم آب دریاچه بسیار کمتر از میزانی بود که با آن مواجه هستیم.



شکل ۱۱: تأثیر احداث سدها بر حجم آب دریاچه



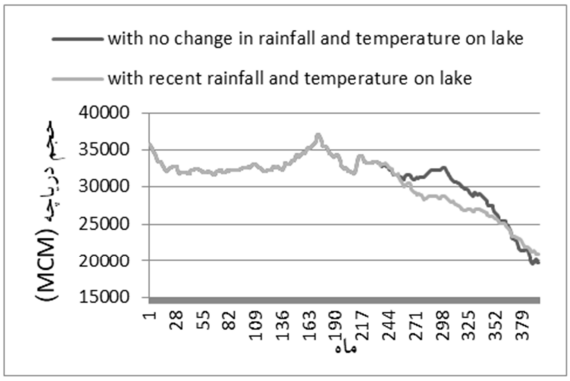
شکل ۱۲: تأثیر کاهش آب‌های سطحی به دریاچه بر حجم آب دریاچه

سناریو سوم: تأثیر کاهش نزولات جوی و افزایش دما (تغییرات اقلیمی)

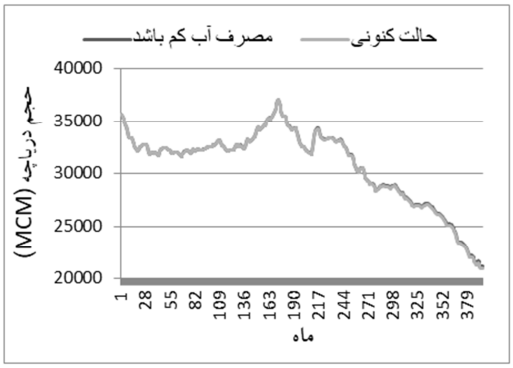
از سال ۱۳۶۹ به بعد نزولات جوی نسبت به سال‌های گذشته کاهش و دما افزایش یافت. در این سناریو فرض بر این است که روند تغییرات دما و بارندگی مانند سال‌های قبل از سال ۱۳۶۹ است. تفاوت تأثیر این تغییر در شکل ۱۳ مشخص شده است.

سناریو چهارم: تأثیر افزایش جمعیّت و رشد صنعت

افزایش جمعیّت منجر به توسعه صنعت خواهد شد. این دو عامل مصرف آب شرب و صنعت را افزایش می‌دهد. در این سناریو فرض بر این است که نرخ رشد جمعیت ۱/۰۰۰۱ و مصرف صنعت از سال آبی ۶۴ – ۶۳ ثابت و تغییرات آن مانند سال آبی قبل باشد. با توجّه به شکل ۱۴، تأثیر این دو عامل بر حجم آب دریاچه اندک است.



شکل ۱۳: تأثیر کاهش بارش و افزایش دما بر حجم آب دریاچه



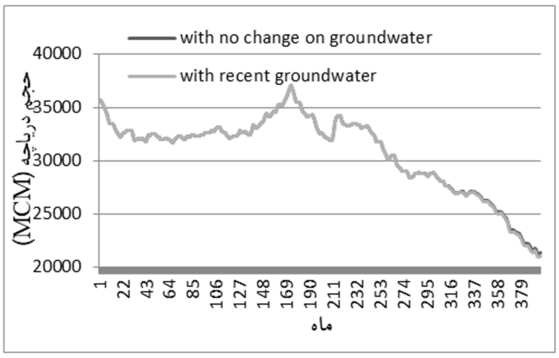
شکل ۱۴: تأثیر افزایش جمعیت و رشد صنعت بر حجم آب دریاچه (نمودارها تقریباً بر هم منطبق شده‌اند)

سناریو پنجم: تأثیر افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی

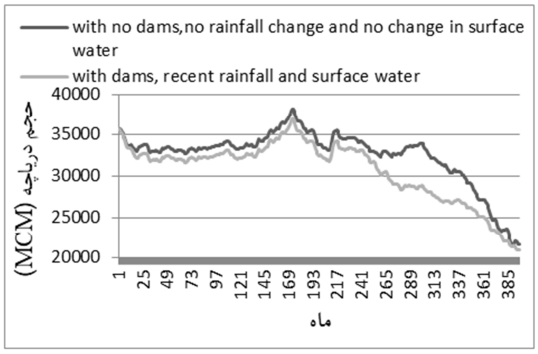
از سال آبی ۷۳ – ۱۳۷۲ برداشت آب‌های زیرزمینی افزایش داشت. بنابراین حجم آب ورودی از این منبع به دریاچه کاهش یافته است. در این سناریو تأثیر افزایش برداشت آب از آب‌های زیرزمینی بر حجم دریاچه بررسی می‌شود. اگر حجم ورودی آب زیرزمینی به دریاچه از سال ۱۳۷۲ به بعد طبق روال گذشته باشد، تغییرات حجم آب دریاچه به صورت شکل ۱۵ می‌باشد. همان‌طور که از شکل برمی‌آید این تغییر به‌تنهایی نقش قابل توجهی بر کاهش حجم آب دریاچه نخواهد داشت.

سناریو ششم: تأثیر احداث سدها، کاهش نزولات جوی و افزایش دما

در این سناریو تأثیر هم‌زمان کاهش بارش، احداث سدها و افزایش دما بر حجم آب دریاچه مشخص می‌شود. تأثیر هم زمان این عوامل در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: تأثیر افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی و کاهش ورودی آن به دریاچه بر حجم آب دریاچه



شکل ۱۶: تأثیر احداث سدها، افزایش دما و کاهش بارندگی به طور هم‌زمان بر حجم آب دریاچه

نتایج و بحث

بر اساس تحلیل سناریوها، درصد تأثیر عوامل مختلف بر خشک شدن دریاچه ارومیه، در افق زمانی مورد بررسی (از سال آبی ۵۰ – ۱۳۴۹ تا سال آبی ۸۳-۱۳۸۲) به ترتیب تأثیرگذاری عبارتند از: کاهش ورودی آب‌های سطحی به دریاچه با ۶۳/۸۵ درصد، سدسازی با ۱۲/۷۷ درصد، افزایش دما و کاهش بارندگی با ۵/۳۸ درصد، افزایش جمعیت و مصارف شرب و صنعت با ۰/۵۳ درصد و کاهش ورودی آب‌های زیرزمینی به دریاچه با ۰/۲۹ درصد. اگر چه به دلیل محدودیت‌هائی در مدل‌سازی می‌بایست به آمار و ارقام با احتیاط نگریست اما آنچه می‌توان اندکی با اطمینان در مورد آن سخن گفت نقش کاهش آب‌های ورودی و پروژه‌های سد سازی در کاهش مساحت دریاچه ارومیه می‌باشد. البته کاهش ورودی آب‌های سطحی و سدسازی عمدتاً به دلایل برداشت‌ها برای مصارف کشاورزی بوده است.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات زاهدی و قویدل، ۱۳۸۶، سلیمی (۱۳۹۰)، توفیقی و همکاران، (۱۳۸۵)، حسن زاده و همکاران (۱۳۹۰)، جامعه مهندسان مشاور ایران (۱۳۹۰)، رجبی و سراوانی (۱۳۹۴)، چوباری و همکاران (۲۰۱۶) و شادکام و همکاران (۲۰۱۶) نیز هم خوانی دارد. الگوی خشک‌شدن دریاچه ارومیه مشابه الگوهای بسیاری از دریاچه‌های در حال زوال دیگر می‌باشد. دریاچه چاد که چهارمین دریاچه آفریقا و ششمین دریاچه جهان است، توسط دو رودخانه چاری و لانگون تغذیه می‌گردد، به دلیل افزایش برداشت آب از سدها، گسترش کشاورزی، انحراف آب رودخانه‌ها جهت مصارف کشاورزی و بروز خشکسالی‌های مداوم، سطح دریاچه کاهش یافته است. دریاچه ایبنور در کشور چین در اثر توسعه فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی و انحراف آب رودخانه‌های تغذیه کننده آن از دهه ۱۹۵۰ به بعد با خطر خشک شدن مواجه گردید (حسن زاده، ۱۳۸۹). دریاچه آرال چهارمین دریاچه جهان بعد از دریاچه‌های خزر، سوپریور و ویکتوریا است. از سال ۱۹۸۸ افزایش کشت پنبه و برنج، مصرف بی‌رویه منابع آب تغذیه کننده این دریاچه، احداث کانال قره‌قوم در ترکمنستان و مسدودکردن دهانه خلیج قره بغاز، منجر به کاهش ۷۵٪ آب دریاچه آرال و تبدیل شدن آن به دو بخش شمالی به نام «مالوی موری»، (دریاچه کوچک) و بخش جنوبی به نام

«بولشوی موری»، (دریاچه بزرگ) گردید که در نهایت بخش شمالی آن به مساحت ۳۳۰۰۰ کیلومتر مربع خشک شد (شهریاری، ۱۳۸۰؛ ملکی، ۱۳۷۸).

بر اساس تجارب سایر دریاچه‌های در معرض خشک شدن و نیز بر اساس نتایج تحقیق حاضر راه‌کارهایی چون افزایش حق‌آبه دریاچه از منابع سطحی، کنترل احداث سدهای جدید بر روی رودخانه‌هایی که منبع اصلی تغذیه دریاچه می-باشند، افزایش میزان بارش از طریق بارور کردن ابرها، انتقال آب از حوضه‌های آبریزی مانند خزر و ارس، کاهش صدور جواز حفر چاه‌ها و کنترل چاه‌های غیر مجاز، کنترل آب مصرفی در زمینه‌های شرب و صنعت و کشاورزی، تسویه و برگرداندن فاضلاب‌های خانگی و صنعت به چرخه طبیعی و آموزش فرهنگ مصرف بهینه آب. تأمین حق آبه دریاچه ارومیه با آزادسازی آب سدها یا انتقال آب از رودخانه‌هائی چون ارس و زاب اگر چه می‌تواند ورودی دریاچه را تأمین کند اما به نظر می‌رسد این گونه سیاست‌ها مشکل را از حوضه دریاچه ارومیه به نقاط دیگر انتقال خواهد داد. خصوصاً اینکه رودخانه‌های مرزی مشکلات بین‌المللی خاص خود را دارند. احتمالاً قبل از ترمیم آب‌های زیرزمینی، تأمین آب دریاچه ارومیه از طریق پروژه‌های انتقال آب موجب تشدید جریان آب‌های زیرزمینی از دریاچه به سمت چاه‌ها شده، در نتیجه چاه‌ها مملو از آب شور خواهد شد. بنابراین نه تنها تأمین آب دریاچه بلکه نحوه تأمین آب به مطالعه‌ای مجزا و دقیق نیاز دارد. کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه به الگوی استفاده از آبخوان‌ها و کانال‌های آب عادت کرده است. وابستگی کشاورزی به چنین روش آبیاری، اجرای سیاست‌هائی همچون محدود کردن بهره‌برداری از چاه‌های آب و آب‌های سطحی را دشوار می‌نماید. احتمالاً ایجاد محدودیت در بهره‌برداری از چنین منابعی برای کشاورزان آنها را به سمت به کارگیری آب شرب خانگی در کشاورزی هدایت نماید. همان‌طوری که چوباری و همکاران (۲۰۱۶) و شادکام و همکاران (۲۰۱۶) بیان کرده‌اند، به نظر می‌رسد بیش از آنکه محدودیت‌های بهره برداری از منابع آب بتواند کارساز باشد تغییر الگوی کشاورزی از محصولات آب دوست به محصولاتی که نیاز کمی به آب دارند مناسب‌تر باشد. البته این سیاستی نیست که یک شبه بتوان آن را ایجاد کرد. با توجه به توضیحات فوق و نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوها، می‌توان با احتیاط راه حل‌های زیر را جهت تثبیت وضعیت دریاچه ارومیه و احیاناً احیاء آن پیشنهاد داد:

۱- با توجّه به اینکه کاهش حجم آب‌های سطحی به دریاچه (سناریو ۲) بیشترین تأثیر را در کاهش حجم آب دریاچه داشته است (۶۳/۸۵ درصد)، بنابراین منطقی است که پیشنهادها بر کنترل رواناب‌ها متمرکز گردد. برای کنترل رواناب‌ها، فعال‌سازی اقدامات نظارتی و گشت‌های کنترل همچنین ایجاد مکانیزم‌های حمایتی از طرف نهادهای قانون‌گذار و نهادهای نظارتی چون قوه قضائیه مفید خواهد بود. بخش اعظمی از برداشت از رواناب‌ها برای مصارف کشاورزی می‌باشد. تغییر الگوی خودکفایی در محصولات کشاورزی به الگوی کشت بر اساس مزیت نسبی نیز می‌تواند مفید واقع شود. برای این منظور پیشنهاد می‌گردد سیستم حسابداری آب راه‌اندازی گردد. بر اساس سیستم حسابداری آب، میزان مصرف آب (آب مجازی) در محصولات (کشاورزی و صنعتی) محاسبه شده، الگوی رشد کشاورزی و صنعتی منطقه بر مبنای آن طرح‌ریزی می‌شود. همچنین در برخی موارد معیشت جایگزین می‌تواند راهکار مناسبی برای جایگزینی مشاغل غیر کشاورزی به جای مشاغل کشاورزی گردد.

۲- بر اساس تحلیل سناریوها ایجاد سدها دومین عامل مؤثر در خشک‌شدن دریاچه ارومیه (۱۲/۷۷ درصد) می‌باشد. بنابراین کنترل پروژه‌های سدسازی می‌تواند به عنوان راهکار مناسب در کنترل وضعیت دریاچه ارومیه باشد. به نظر می‌رسد احداث سدها بر اساس نیاز به آب کشاورزی، آب صنعتی و تأمین انرژی می‌باشد. به عبارت دیگر، سدها خود معلول عوامل دیگری هستند. با کنترل مصارف آب و انرژی به نظر می‌رسد نیاز به احداث سدها کاهش خواهد یافت. به برخی از روش‌های کنترل مصارف آب، در بند ۱ پیشنهادها اشاره شد. از دیگر روش‌ها می‌توان به به‌کارگیری مفاهیم اکولوژی صنعتی در توسعه منطقه اشاره کرد. اکولوژی صنعتی راهکارهایی را برای همزیستی صنعت و کشاورزی با محیط زیست ارائه می‌کند. به عنوان مثال، طراحی شهرک‌های صنعتی و کشاورزی می‌تواند بر مبنای مفهوم همزیستی صنعتی[1] شکل گیرد. به کارگیری تکنیک‌ها و مفاهیم اکولوژی صنعتی در برنامه‌ریزی‌های توسعه می‌تواند هم‌زمان موجب افزایش رشد صنعت و کشاورزی از یک طرف و کاهش تخریب ظرفیت قابل تحمّل[2] منطقه از طرف دیگر گردد. این موضوع، نیاز به پروژه‌های سد سازی و آب‌رسانی را به حداقل می‌رساند.

۳- بر اساس سناریوی سوم، کاهش نزولات جوی و افزایش دما، ۵/۳۸ درصد بر خشک شدن دریاچه ارومیه تأثیر داشته است اما به دلیل اینکه این متغیرها چندان قابل دست‌کاری نیستند، بنابراین راهکار مشخص و معینی در این خصوص نمی‌توان ارائه کرد. بارور کردن ابرها اگرچه می‌تواند راهکاری برای افزایش نزولات جوی باشد، اما بر اساس تکنولوژی‌های مربوط به بارورسازی ابرها، این راهکار چندان مثمر ثمر نخواهد بود.

اگرچه به نظر می‌رسد برداشت از آب‌های زیرزمینی تأثیر چندانی بر کاهش سطح آب دریاچه ارومیه نداشته است، این موضوع موجب تخریب سفره‌های آب زیرزمینی شده و احتمالاً عوارض جانبی دیگری به غیر از خشک شدن دریاچه ارومیه را در بر خواهد داشت. به عنوان مثال، فرونشست دشت‌ها و تخلیه ذخایر آبی زیرزمینی مواردی از این عوارض جانبی می‌تواند باشد. روش‌های سخت‌گیرانه در صدور مجوزهای احداث چاه و نظارت بر احداث چاه‌های غیر مجاز و نیز کنترل ویلا سازی‌ها در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌تواند راهکارهایی برای حفظ منابع آبی حوضه دریاچه باشد.

نتیجه‌گیری

اگر چه دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران، دومین دریاچه شور جهان و بیستمین دریاچه بزرگ جهان می‌باشد، روند رو به زوال آن در سه دهه گذشته مشکلات متعدد اقتصادی - اجتماعی را موجب شده است. پیش‌بینی می‌شود، دامنه این مشکلات در آینده حتی حوزه‌هائی همچون سیاست و فرهنگ را نیز در بر گیرد. بنابراین، مطالعه علل زوال و یافتن راهکارهای احیای آن ضروری به نظر می‌رسید. با توجّه به اهمیّت موضوع، مقاله حاضر، تلاشی جهت شناسایی علل مهم خشک شدن این دریاچه می‌باشد. بر اساس مطالعه پیشینه تحقیق و نمونه‌های مشابه از

1- industrial symbiosis
2- Carrying Capacity

دریاچه‌های خشک شده، به نظر می‌رسید که موضوع خشک شدن دریاچه ارومیه موضوعی چند وجهی و پیچیده می‌باشد. به این معنی که متغیرهای متعدد در تعامل با هم پدیده خشک‌شدن دریاچه ارومیه را سبب شده‌اند. علی‌رغم پیچیده بودن موضوع، یکی از دلایل خشک شدن دریاچه، نگاه خطی و ساده انگارانه به موضوعات مرتبط با دریاچه ارومیه همچون کشاورزی و صنعت بوده است. به عبارت دیگر، مسئله دریاچه ارومیه، نتیجه راه حل‌های ساده انگارانه در حوزه‌های کشاورزی و صنعت می‌باشد. با این پیش فرض برای مدل‌سازی علل خشک شدن دریاچه، می‌بایست رویکرد مناسبی که بتواند پیچیدگی‌های مسئله را توضیح دهد، به کار گرفته شود. بنابراین، در مقاله حاضر متدولوژی پویائی شناسی سیستم به کار رفت. هدف اصلی از مدل‌سازی به روش پویایی‌شناسی سیستم، کشف ساختار مسئله و دستیابی به بینش عمیق‌تر نسبت به آن می‌باشد. برای این کار، ساختاری که موجب خشک شدن دریاچه ارومیه شده است، با استفاده از نمودار زیرسیستم، نمودار علی حلقوی و نقشه جریان انباشت، شناسایی گردید. این ساختار با استفاده از نرم افزار ونسیم شبیه‌سازی شده، پس از اطمینان از اعتبار مدل، عوامل مؤثر در خشک شدن دریاچه ارومیه، تحت عنوان سناریوهای پنج‌گانه مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت راه کارهایی پیشنهاد شد.

منابع

آتااف، تورکایا، (۱۳۷۸)، دریای خزر: مشکلات و مسائل زیست محیطی، فصلنامه مطالعات آسیای مرکزی و قفقاز، سال هشتم، دوره سوم، شماره ۲۵، صفحات ۱۲۳ – ۱۱۵.

استرمن، جان د. (۱۳۸۸)، پویایی شناسی کسب و کار، ترجمه‌ی کوروش برارپور، پریسا موسوی اهرنجاتی، بنفشه بهزاد، مرضیه امامی، لاله رضایی عدل، حسن فغانی، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها.

بهشتی آل‌آقا، علی، رئیسی، فائز، گلچین، احمد، ۱۳۹۰، اثرات آشفتگی ناشی از تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی بر برخی شاخص‌های بیولوژیک کیفیت خاک در اکوسیستم‌های جنگلی شمال ایران، نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، جلد ۳، شماره ۴، صفحات ۴۵۳-۴۳۹.

توفیقی، محمدعلی، زین الدینی، مصطفی ,گلشنی، علی اصغر، (۱۳۸۵)، شبیه سازی دو بعدی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای تعیین الگوی جریان، دوره ۳، شماره ۴، صص ۳۷-۴۷

جامعه‌ی مهندسان مشاور ایران، (۱۳۹۰)، ارزشیابی پایداری فرآیند توسعه و پی‌آمدهای آن در دریاچه‌ی ارومیه.

جلیلی، شیدا، مرید، سعید، بناکار، احمد، نامدارقنبری، رضا، (۱۳۹۰)، ارزیابی تأثیر شاخص‌های اقلینی NAO و SOI بر تغییرات تراز دریاچه‌ی ارومیه، کاربرد روش‌های آنالیز طیفی سری‌های زمانی، نشریه‌ی آب و خاک، جلد ۲۵، شماره‌ی ۱، صفحات ۱۴۵-۱۴۰.

حسن‌زاده، المیرا، ضرغامی، مهدی، حسن‌زاده، یوسف، نورانی، وحید، (۱۳۸۹)، تعیین سهم تأثیر ساخت سازه‌های هیدرولیکی بر کاهش تراز آب دریاچه ارومیه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

دفتر مدیریت به هم پیوسته حوضه آبریز دریاچه ارومیه (وزارت نیرو)، (۱۳۹۲)، وضعیت و چالشهای آب زیرزمینی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارائه راهکارها. ارائه شده در کارگروه تخصصی مدیریت آبهای سطحی و زیرزمینی دریاچه ارومیه.

دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران، گروه مطالعات آبهای زیرزمینی (دمپا)، (۱۳۹۳)، بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور تا پایان سال آبی ۹۱-۹۲.

رجبی هشجین، مهدی، سراوانی، سروش، (۱۳۹۴)، ضرورت احیای دریاچه ارومیه، علل خشکی و تهدیدات، گزارش ستاد احیای دریاچه ارومیه.

رسولی، علی‌اکبر، عباسیان، شیرزاد، جهانبخش، سعید، (۱۳۸۷)، پایش نوسان‌های سطح آب دریاچه‌ی ارومیه با پردازش تصاویر چند سنجنده‌ای و چند زمانه‌ای، فصل‌نامه‌ی مدرس علوم انسانی، دوره‌ی ۱۲، شماره‌ی ۲، صفحات ۷۱-۵۳.

زاهدی، مجید، قویدل رحیمی، یوسف، (۱۳۸۶)، تعیین آستانه خشکسالی و محاسبه میزان بارش قابل اعتماد ایستگاه های حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پژوهش های جغرافیائی، دوره ۳۹، شماره ۵۹، صص ۲۱-۳۴

سامانی، محمد ولی، (۱۳۸۹)، بررسی وضعیت بحرانی آب دریاچه ارومیه، گزارش مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی، کد موضوعی ۲۵۰.

سازمان حفاظت محیط زیست با همکاری سازمان‌های دولتی، تشکل های زیست محیطی و جوامع محلی (EPA)، (۱۳۸۹)، برنامه مدیریت جامع دریاچه ارومیه، خرداد ماه.

سلیمی ترکمانی، حجت، (۱۳۹۰)، بررسی مشکل زیست‌محیطی دریاچه‌ی ارومیه از منظر حقوق بین‌الملل محیط‌زیست، فصل‌نامه راهبرد، سال ۲۰، شماره‌ی ۵۸، صفحات ۲۰۲-۱۷۷.

شفیعی‌فر، مهدی، ولی‌زاده، علیرضا، (۱۳۸۷)، مدل‌سازی تر و خشک‌شدن مرز در مدل دوبعدی جریان آب کم‌عمق، تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره‌ی ۱، صفحات ۵۸ – ۵۰.

شهریاری، مهدی، (۱۳۸۰)، فاجعه‌ی زیست محیطی دریاچه‌ی آرال، مطالعات آسیای مرکزی و قفقاز، شماره‌ی ۳۳، صفحات ۱۶۶-۱۵۳.

صلاحی، برومند، گودرزی، مسعود، حسینی، سید اسعد، ۱۳۹۴، پیش بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۸، شماره ۴، صص ۴۲۵-۴۳۸.

علیزاده، امین (۱۳۷۴)، اصول هیدرولوژی کاربردی، دانشگاه امام رضا (ع).

علوی‌پناه، سید کاظم، خدائی، کمال، جعفربیگلو، منصور، (۱۳۸۴)، مطالعه کارایی داده‌های ماهواره‌ای در بررسی کیفیت آب در دو سوی میان‌گذر دریاچه ارومیه، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، صفحات ۶۹ – ۵۷.

کردوانی، پرویز، سرور، رحیم، صوفی، اکبر، (۱۳۹۵)، علل کاهش سطح آب دریاچه ارومیه، فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا، دوره جدید، سال چهاردهم، شماره ۵۰، صص ۹۳-۱۱۰

کمالی، میثم و یونس زاده جلیلی، سهیلا، (۱۳۹۵)، بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهوارهای، مرکز تحقیقات سنجش ازدور(RSRC) دانشگاه صنعتی شریف

کمیته اجتماعی- فرهنگی ستاد احیای دریاچه ارومیه، (۱۳۹۴)، دریاچه ارومیه علل خشکی و تهدیدات احتمالی (۱)، شهریور ماه، (http://ulrp.sharif.ir/fa)

گلابیان، حسین، (۱۳۸۸)، ارومیانا طرحی برای تأمین کسری آب ورودی برای احیاء و تثبیت اکوسامانه‌ی دریاچه‌ی ارومیه، ستاد احیای دریاچه ارومیه.

گلیان، سعید، ابریشم‌چی، احمد، تجریشی، مسعود، (۱۳۸۶)، تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه‌ی آبریز با روش پویایی سیستم، آب و فاضلاب، شماره‌ی ۶۳، صفحات ۸۰-۷۰.

محمدرضاپورطبری، محمود، (۱۳۹۰)، بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد انتقال آب بین حوضه‌ای: حدوده‌ی مطالعاتی پیرانشهر، آب و فاضلاب، شماره‌ی ۴، صفحات ۱۱۳ – ۱۰۳.

ملکی، قاسم، (۱۳۷۸)، دریاچه آرال: بحران محیط زیستی، فصلنامه مطالعات آسیای مرکزی و قفقاز، سال هشتم، دوره سوم، شماره ۲۶، صفحات ۶۶ – ۵۳.

وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، (۱۳۹۱)، بررسی مسائل، چالش‌ها و فرصت‌های حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه گزارش نهایی.

وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، (۱۳۸۹)، بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور.

مرکز آمار ایران، سرشماری های عمومی نفوس و مسکن ۱۳۳۵ الی ۱۳۹۰

Hassanzadeh, Elmira. Zarghami, Mahdi. Hassanzadeh, Yousef. 2012, "determining the main factors in declining the urmia lake level by using system dynamics modeling ", water resource manage, 26: 129-145.
Riedel, Frank. Kossler, Annette. Tarasov, Pvel. Wonnemann, Bernd. 2011, "A study Holocene foraminifera from the aral sea and west Siberian lakes and its implication for migration pathways", quaternary international, volume229issues 1-2, pages 105-111.
Alizadeh Choobari, O., Ahmadi Givi, F., Mirzaei, N. and Owlad, E. (2016), Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. Int. J. Climatol., 36: 4276-4286. doi:10.1002/joc.4630.
Fazel, Nasim, Berndtsson, Ronny, Bertacchi, Uvo Cintia, Madani, Kaveh, Kløve, Bjørn, 2017, Regionalization of precipitation characteristics in Iran’s Lake Urmia basin, Theoretical and Applied Climatology, Volume 132, Issue 1–2, pp 363–373.
Shadkama, Somayeh Ludwig, Fulco, van Oel, Pieter Kirmit, Çağla, Kabat, Pavel, 2016, Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake, Journal of Great Lakes Research, Volume 42, Issue 5, p. 942-952.
Boroffka, Nikolaus. Oberhänsli, Hedi. Sorrel, Philippe. Demory, Francois. Reinhardt, Christian. Wünnemann, Bernd. Alimov, Kamildzhan. Baratov, Sergey. Rakhimov, Kamildzhan. Saparov, Nasbirgen. Shirinov, Timur. Krivonogov, Sergey K., Röhl, Ursula. 2006, "Archaeology and climate: settlement and lake-level changes at the Aral Sea ", geo archaeology, vol. 21, pages 721-734.
Micklin, Philip p.1989 " Desiccation of the Aral Sea: a water management disaster in the Soviet Union ", science, vol.241 no.4870 pp. 1170-1176.

Research Article

Modeling the Causes of Drying of Lake Uremia Using System Dynamics

Alireza Bafandeh Zendeh*[1], Leila Haji Hatamlou[2], Nasser Danaye Nemat Abad[3]

Received: 30-07-2018 Revised: 28-11-2018 Accepted: 11-05-2019

Abstract

Although the Urmia Lake is the largest domestic lake in Iran, the second largest saline lake in the world, and the world's 20th largest lake, and is weather-balanced for the region's climate, it has been declining in recent decades. There are several reasons to become dry this lake. In this paper, due to the complexity of the problem, system dynamics is used as a suitable methodology for modeling the reasons for drying Urmia Lake. According to Sterman's methodology, the boundary of the problem was first studied. Key variables and their historical behavior were studied at this stage. Then, the dynamic hypothesis of the problem was formulated by using the subsystem diagram, circular causal graphs, and accumulation flow map. After simulating and testing the model, some of the possible ways were evaluated that lake can be recovery. Based on the results of this study, it seems that two main factors in decrease lake water are reducing the input of surface waters to the lake and damping. Therefore, supplying the Lake right of water and limiting the construction of dams can be two ways to stop the process of drying Urmia Lake. However, the dynamics within the problem, they can apply any solution with many complications and side effects.

Keywords: Urmia Lake, System Dynamics, Iranian Environment, Iran Wetlands, Water Crisis.

[1]*- Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran Email: bafandeh@iaut.ac.ir
[2]- Department of Industrial engineering, Alghadir (Non-Governmental and Private Higher Education Institution), Tabriz, Iran
[3]- Institute of Development and Planning, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Tabriz, Iran

References

References (in Persian)

Alavi Panah, S. K., Khodaei, K., Jaafar beigloo, M., 2006, Study of the Efficiency of Satellite Data in Water Quality Review on the Interconnecting Lakes of Urmia ", Geographical Research, No. 53, pp. 69 - 57. [In Persian].
Alizadeh, A., 1996, Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University. [In Persian].
Alizadeh□Choobari, O., Ahmadi□Givi, F., Mirzaei, N. and Owlad, E. (2016), Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. Int. J. Climatol., 36: 4276-4286. doi:10.1002/joc.4630. [In Persian].
Ata'of, T., 2000, Caspian Sea: Problems and environmental issues, Quarterly Journal of Central Asian and Caucasian Studies, year 8, Volume 3, No. 25, pp. 123-115. [In Persian].
Beheshti Aal Agha, A., Raisi, F., Golchin, A., 2011, The effects of the disturbance caused by the conversion of forest land to agriculture on some biological soil quality indicators in forest ecosystems in northern Iran, Journal of Agricultural Ecology, Vol. 3, No. 4, pp. 453-439. [In Persian].
Boroffka, Nikolaus. Oberhänsli, Hedi. Sorrel, Philippe. Demory, Francois. Reinhardt, Christian. Wünnemann, Bernd. Alimov, Kamildzhan. Baratov, Sergey. Rakhimov, Kamildzhan. Saparov, Nasbirgen. Shirinov, Timur. Krivonogov, Sergey K., Röhl, Ursula. 2006, "Archaeology and climate: settlement and lake-level changes at the Aral Sea ", geoarchaeology, vol. 21, pages 721-734. [In Persian].
) EPA) Environmental Protection Agency in cooperation with government agencies, environmental organizations and local communities, 2010, Aguste, comprehensive management plan of Lake Urmia. [In Persian].
Golabian, H., 2010, Urumia plans to supply deficit water for recovery and ecosystem stabilization of Lake Urmia. [In Persian].
Golian, S., Abrisham chi, A., Tajrishi, M., 2007, Analysis of the policy of exploitation of water resources in the catchment area by the system dynamics method, Water and Wastewater, No. 63, pp. 80-70. [In Persian].
Hasanzadeh, E., 2010, Determination of the contribution of the construction of hydraulic structures on reducing the water level in Lake Urmia, Tabriz University. [In Persian].
Hassanzadeh, E. Zarghami, M. Hassanzadeh, Y. 2012, "determining the main factors in declining the Urmia lake level by using system dynamics modeling ", water resource manages, 26: 129-145. [In Persian].
)ICES) Iran Consulting Engineers Society (ICES), 2011, Sustainability Evaluation of Development Process and Its Consequences in Lake Urmia. [In Persian].
Iran Water Resources Management Foundation, Groundwater Studies Group (IWRMFGSG), 2014, Study of the status of groundwater resources of the country until the end of the irrigation year 2012-2013. [In Persian].
) ISCPH) Iranian Statistics Center, Population and Housing Census 1335 to 1390, Available at August 2017. [In Persian].
Jalili, Sh., Marid, S., Banakar, M., Namdar Ghanbari, R., 2011, Evaluation of the Effect of the NAO and SOI Grounds on Urmia Lake Lakes Change, Application of Spectral Analysis Methods for Time Series, Volume 25, Issue 1, Pages 145-140. [In Persian].
Kardovani, P., Sarvar, R., Soofi, A., 2017, Causes of Lake Urmia Water Loss, Journal of Geography, New Period, Fourteenth, No. 50, pp. 93-110. [In Persian].
Kamali, M., Younes Zadeh, S., 2017, Investigation of land use changes in the Uromiyeh watershed basin using satellite images, Research Center for Indoor Research (RSRC) of Sharif University of Technology. [In Persian].
)Ministry of Energy) Managing Directorate of Urmia Lake Basin, (2013), Status and Challenges of Underground Water in Lake Urmia Basin and Providing Solutions, Presented in the Urmia Lake Surface and Underground Water Management Task Force. [In Persian].
Maleki, Gh., 1998, Lake Aral: Environmental Crisis, Quarterly Journal of Central and Caucasus Studies, Eighth Year, Volume 3, Number 26, pp. 66-53. [In Persian].
Ministry of Energy, Water and Waste Water Planning Office, 2013, Reviewing the Issues, Challenges, and Opportunities of Lake Urmia catchment area. Final report. [In Persian].
Ministry of Energy, Water and Waste Water Planning Office, 2010, Updating the comprehensive water plan of the country. [In Persian].
Micklin, Philip p.1989 " Desiccation of the Aral Sea: a water management disaster in the Soviet Union ", science, vol.241 no.4870 pp. 1170-1176. [In Persian].
Mohamadreza Pourtabari, 2013, Combined Utilization of Surface Water and Subsoil Water Resources with the Water Transfer Interconnection Approach: A Primary Study of the Piranshahr, Water, and Wastewater, No. 4, pp. 113-103. [In Persian].
Fazel, Nasim, Berndtsson, Ronny, Bertacchi, Uvo Cintia, Madani, Kaveh, Kløve, Bjørn, 2017, Regionalization of precipitation characteristics in Iran's Lake Urmia basin, Theoretical and Applied Climatology, Volume 132, Issue 1–2, pp 363–373. [In Persian].
Rajabi, H., Saravani, S., 2015, Urmia Lake Recovery, Drought and Threats, Report of the Orumieh Recovery Headquarters. [In Persian].
Riedel, Frank. Kossler, Annette. Tarasov, Pvel. Wonnemann, Bernd. 2011, "A study Holocene foraminifera from the Aral sea and west Siberian lakes and its implication for migration pathways", quaternary international, volume229issues 1-2, pages 105-111. [In Persian].

Salahi, B., Goudarzi, M., Hosseini, S. (2016). Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. Watershed Engineering and Management, 8(4), 425-438. doi: 10.22092/ijwmse.2016.107179. [In Persian].
Shadkama, Somayeh Ludwig, Fulco, van Oel, Pieter Kirmit, Çağla, Kabat, Pavel, 2016, Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake, Journal of Great Lakes Research, Volume 42, Issue 5, p. 942-952. [In Persian].
Salimi, H., 2011, Investigation of Urmia Lake Environmental Environment Issues in the View of International Environmental Law ", Strategic Quarterly, Year 20, Issue 58, pp. 202-177, (In Persian.(
Shahriari, M., (2001), "Environmental Disaster in the Aral Lakes, Central Asia, and Caucasus Studies", vol. 33, pp. 166-153, [In Persian].
Samani, M. V., 2010, Critical Situation Analysis of Lake Urmia Water, Report of the Research Center of the Islamic Consultative Assembly, Thematic Code 250, [In Persian].
Shafiei far, M., Valizadeh, A., 2008, Modeling and drying the boundary in the two-dimensional model of low water flow, Iranian Water Resources Research, Year 4, Issue 1, pp. 58-50. [In Persian].
Sterman, J. D., 2000, Business Dynamics, Samt publication [In Persian].
)OLRH) The socio-cultural committee of the Orumieh Lake Recovery Headquarters (2016), Urmia Lake, causes of drought and possible threats (1), (http://ulrp.sharif.ir/fa), [In Persian].
Tofighi, M. A., Zein Al Dini, M., Golshani, A. A., 2007, Two Dimensional Hydrodynamic Simulation of Lake Urmia to Determine Flow Pattern, Marine engineering, Volume 3, Issue 4, Pages 37-47, [In Persian].
Zahedi, M., Ghavidel, Y., 2007, Determination of drought threshold and calculation of reliable precipitation in lake basin stations of Urmia lake, Geographic Research, Vol. 39, No. 59, Pages 21-34. [In Persian].

References (in English)

Hassanzadeh, Elmira. Zarghami, Mahdi. Hassanzadeh, Yousef. 2012, "determining the main factors in declining the Urmia lake level by using system dynamics modeling ", water resource manages, 26: 129-145.

Riedel, Frank. Kossler, Annette. Tarasov, Pvel. Wonnemann, Bernd. 2011, "A study Holocene foraminifera from the Aral sea and west Siberian lakes and its implication for migration pathways", quaternary international, volume229issues 1-2, pages 105-111.

Alizadeh□Choobari, O., Ahmadi□Givi, F., Mirzaei, N. and Owlad, E. (2016), Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. Int. J. Climatol., 36: 4276-4286. doi:10.1002/joc.4630.

Fazel, Nasim, Berndtsson, Ronny, Bertacchi, Uvo Cintia, Madani, Kaveh, Kløve, Bjørn, 2017, Regionalization of precipitation characteristics in Iran’s Lake Urmia basin, Theoretical and Applied Climatology, Volume 132, Issue 1–2, pp 363–373.

Shadkama, Somayeh Ludwig, Fulco, van Oel, Pieter Kirmit, Çağla, Kabat, Pavel, 2016, Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake, Journal of Great Lakes Research, Volume 42, Issue 5, p. 942-952.

Boroffka, Nikolaus. Oberhänsli, Hedi. Sorrel, Philippe. Demory, Francois. Reinhardt, Christian. Wünnemann, Bernd. Alimov, Kamildzhan. Baratov, Sergey. Rakhimov, Kamildzhan. Saparov, Nasbirgen. Shirinov, Timur. Krivonogov, Sergey K., Röhl, Ursula. 2006, "Archaeology and climate: settlement and lake-level changes at the Aral Sea ", geoarchaeology, vol. 21, pages 721-734.

Micklin, Philip p.1989 " Desiccation of the Aral Sea: a water management disaster in the Soviet Union ", science, vol.241 no.4870 pp. 1170-1176.