

تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم

سعید گلیان^۱ احمد ابریشم‌چی^۲ مسعود تاجریشی^۳

(دریافت ۸۴/۱۱/۱۱ پذیرش ۸۶/۵/۱۳)

چکیده

در یک حوضه آبریز سیستم‌های مختلف طبیعی و انسانی وجود دارد که در اندرکنش با یکدیگرند. در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه آبریز، اندرکنش اجزای درونی هر سیستم و نیز اندرکنش سیستم‌های مختلف با یکدیگر باید در نظر گرفته شود. برای مثال، توسعه بهره‌برداری از منابع آب در بالادست حوضه بر کمیت و کیفیت آب قابل دسترس برای تقاضاها و کاربریهای پایین دست حوضه تأثیر منفی می‌گذارد. در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه آبریز، برای اینکه منافع کلیه کاربران و کاربریهای آب در نظر گرفته شود، سیاست‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری منابع آب باید تحلیل شده و مناسب‌ترین سیاست که منافع همه کاربریها و اهداف توسعه را ارضاء کند، انتخاب شود. در این تحقیق، سیاست‌های توسعه و بهره‌برداری منابع آب در سطح حوضه آبریز رودخانه آجی - چای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شرق دریاچه و اثرات آن بر تراز آب دریاچه ارومیه بررسی می‌شود. برای این منظور، حوضه رودخانه آجی - چای را به سه ناحیه تقسیم کرده و با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم که یک روش شبیه‌سازی شیء‌گرا و بر پایه بازخورد می‌باشد، مدل دینامیکی منطقه توسعه داده شد. برای بررسی سناریوهای موجود، ده سری زمانی بیست ساله برای رواناب هر زیر حوضه با استفاده از مدل ARMA(1,1) تولید شده و تراز آب دریاچه مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: پویایی سیستم، توسعه منابع آب، مدل‌سازی، سیاست‌های بهره‌برداری، حوضه رودخانه.

A System Dynamics- Based Analysis of Operation Policies for Water Resources at River Basin Scale

Saeed Golian¹ Ahmad Abrishamchi² Massoud Tajrishy³

(Received Jan. 31, 2006 Accepted Aug. 4, 2007)

Abstract

There are many natural and human subsystems in a watershed with their special interrelationships. These interrelationships must be duly considered for the integrated and comprehensive management of the water resources in a water basin. One example of such interrelationships includes upstream water development and utilization projects which adversely affect downstream water quality and quantity. Within the framework of an integrated water resources management, various water resources development and operation policies must be analyzed to select the most convenient one securing the benefits of all the stakeholders in the watershed. In this study, various operation policies in the Urmiah Lake Basin and the Aji Chai River Basin on the east of the lake are analyzed to determine their impacts on the water level in the lake. For this purpose, the Aji Chai Basin is subdivided into three sub-basins and the System Dynamics, which is a feedback-based object-oriented simulation approach, is used to develop the dynamic model of the region. To investigate the present scenarios, the ARMA (1, 1) model is used to generate 10 different time series for each sub-basin and the lake water level is accordingly determined for each case.

Keywords: System Dynamics, Water Resources Development, Modeling, Operation Policies River Basin.

1. Grad. Student of Water Resources Engineering, Sharif University of Technology, s.golian@aut.ac.ir

2. Prof., Dept. of Civil Engineering, Sharif University of Technology

3. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Sharif University of Technology

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، s.golian@aut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

با در نظر گرفتن این امر که کشور ایران از جمله مناطق خشک و نیمه خشک در جهان محسوب می‌شود و با توجه به نیاز روزافزون به آب به عنوان حیاتی‌ترین عنصر زندگی و محدودیت منابع آب قابل استحصال، اهمیت ابزارهای مدیریتی برای تخصیص بهتر آب بیش از پیش آشکار می‌شود. در یک حوضه آبریز، سیستم‌های مختلف طبیعی و انسانی وجود دارد که در اندرکنش با یکدیگرند. در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه آبریز، اندرکنش اجزای درونی هر سیستم و نیز اندرکنش سیستم‌ها باید در نظر گرفته شود. تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف برای شرایط آبی متفاوت (مانند خشکسالی‌ها، ترسالی‌ها و ...) و دیدگاههای مدیریتی متفاوت از ضروریات مدیریت یکپارچه منابع آب به منظور اخذ تصمیم‌گیری می‌باشد. مدل‌های موسوم به مدل‌های مهندسی با به کارگیری تکنیک‌های ریاضی از قبیل روشهای شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و یا ترکیبی از هر دو روش ما را قادر به تحلیل مسائل موجود می‌نمایند.

مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد سیاست‌های آبی موجود و یا پیشنهاد یک سیاست جدید و نیز سیاست‌های بهره‌برداری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف این مدل‌ها، بهبود طرحها و سیاست‌های بهره‌برداری است. در این مدل‌ها اگر کاربر آشنایی کافی با سیستم داشته باشد، می‌تواند راه حل مناسب را با جست و جو به دست آورد. مدل‌های بهینه‌سازی اساساً همان مدل‌های شبیه‌سازی هستند که دارای ساختار سیستماتیک تولید و ارزیابی سناریوهای متفاوت می‌باشند تا در نهایت بهترین جواب ممکن را به دست آورند [۱].

امروزه هدف روشهای شبیه‌سازی تنها شرح سیستم‌های پیچیده بر اساس واقعیت نیست، بلکه دخالت کاربر در توسعه مدل و جلب اطمینان وی در فرآیند مدل‌سازی از جمله الزامات روشهای شبیه‌سازی است. از اینرو در سالهای اخیر استفاده از مدل‌های پویایی سیستم‌های گرا^۱ مورد توجه قرار گرفته است و نرم‌افزارهای انعطاف پذیری با قابلیت ارتباط آسان یا کاربر و مدیریت داده، تولید شده‌اند. روش تحلیل پویایی سیستم^۲ که یک روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد^۳ و اتفاقات شیء گراست، از جمله این روشهاست [۲ و ۳]. بیشترین هنر مدل‌سازی به این روش کشف و درک فرآیندهای بسازخوردی است. فرآیندهایی که در آن ساختارهای ذخیره و جریان، تأخیرهای زمانی و رفتارهای غیر خطی، تعیین‌کننده پویایی سیستم می‌باشد [۴].

¹ Object Oriented

² System Dynamics Analysis

³ Feedback

این روش ابتدا توسط فارستر^۴ در سال ۱۹۶۱ به منظور درک بهتر مسائل استراتژیک در سیستم‌های پویای پیچیده ابداع گردید. پالمر^۵ و همکاران در سالهای ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ فعالیت‌های زیادی را در حوضه رودخانه با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیستم انجام دادند. پالمر و کیز^۶ در سال ۱۹۹۳ روش مزبور را در شبیه‌سازی مطالعات خشکسالی به کار گرفتند [۵]. فلچر^۷ در سال ۱۹۹۸ این روش را برای تحلیل تصمیم در مدیریت کم آبی استفاده نمود [۶]. سیمونویچ^۸ در سال ۱۹۹۷ و سیمونویچ و فهمی^۹ در سال ۱۹۹۹ از روش تحلیل پویایی سیستم برای ارزیابی دراز مدت منابع آبی و تحلیل سیاست‌های اعمالی در حوضه رودخانه نیل در مصر بهره جستند [۷].

۲- مفاهیم اساسی در تحلیل پویایی سیستم

روش تحلیل پویایی سیستم به عنوان روشی که بر اساس تفکر سیستماتیک^{۱۱} بنا نهاده شده است، روشی برای مطالعه و بهبود یادگیری در ارتباط با سیستم‌های پیچیده است. اساس این روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد و اتفاقات شیء گراست. در روش تحلیل پویایی سیستم، از چهار ابزار ذخیره^{۱۱}، جریان^{۱۲}، رابطه‌ها^{۱۳} و تبدیل‌کننده‌ها^{۱۴} استفاده شده و به وسیله آنها ذهنیت مدل‌ساز را به نمودارهای علت و معلولی^{۱۵} و در نهایت به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل می‌نمایند. برای یک مدل‌سازی موفق هیچ‌گونه دستورالعملی وجود ندارد، لکن تعریف مشخص و شفاف مسئله ما را در توسعه کارآمد مدل، یاری می‌کند. هر شخصی سبک و روش متفاوتی دارد. با این حال مدل‌سازان موفق از یک فرآیند منظم که شامل مراحل زیر می‌باشد پیروی می‌کنند:

- ۱- تعریف مسئله: شامل تعریف موضوع، انتخاب متغیرها و مفاهیم کلیدی و افق زمانی و تعریف دینامیکی مسئله می‌باشد.
- برای تعیین متغیرها و مفاهیم کلیدی بهتر است ابتدا همه متغیرهایی که ممکن است مهم به نظر آیند را نوشته و سپس آنها را از نظر اهمیت درجه بندی کنیم.
- برای تعیین افق زمانی باید دانست که چقدر باید به عقب برگردیم تا ریشه‌های مسئله را در مدل ببینیم.

⁴ Forrester
⁵ Palmer
⁶ Keyes
⁷ Fletcher
⁸ Simonovic
⁹ Fahmy
¹⁰ System Thinking
¹¹ Stock
¹² Flow
¹³ Connectors
¹⁴ Converters
¹⁵ Causal Loop

• تعریف دینامیکی مسئله (اسلوبهای مرجع^۱): رفتار تاریخی مفاهیم و متغیرهای کلیدی چگونه بوده است و رفتار آنها در آینده چه روندی را دنبال می‌کند.

۲- فرموله کردن فرضهای دینامیکی

• تعریف فرضهای اولیه:

• فرموله کردن فرضهای دینامیکی^۲؛

• رسم روندنمای^۳ مسئله بر اساس فرضهای اولیه؛

• متغیرهای کلیدی و سایر اطلاعات موجود؛

فرضیات دینامیکی می‌توانند به صورت حلقه‌های علت و معلولی^۴ یا نمودار ذخیره و جریان^۵ بیان شوند. مثل همه فرضیات، فرضیات دینامیکی نیز همیشه درست نمی‌باشند و اصلاح آنها از بخشهای مهم توسعه مدل‌های خوب می‌باشد.

۳- فرموله کردن مدل شبیه‌سازی

• تعیین ساختار و قوانین تصمیم‌گیری؛

• تخمین پارامترها و روابط رفتاری؛

• شرایط اولیه.

۴- اعتبارسنجی مدل

• مقایسه رفتار مدل با حالت‌های مینا؛

• اطمینان از رفتار مناسب و مطمئن سیستم در حالت‌های حدی؛

• حساسیت سیستم (بررسی رفتار مدل هنگامی که به پارامترها،

شرایط اولیه و مرزهای سیستم عدم قطعیت می‌دهیم).

۵- سیاست‌های بهره‌برداری و ارزیابی

• تعیین سناریوهای مختلف؛

• طراحی سیاست‌ها: قوانین تصمیم‌گیری جدید، استراتژی‌ها و ساختارهایی که باید آزمایش شوند.

• آنالیز حساسیت^۶ و بررسی اندرکنش سیاست‌های مختلف [۳].

۳- توصیف منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه از منطقه کوهستانی وسیعی تشکیل شده که دریاچه ارومیه و دشت‌های مجاور آن را احاطه کرده است. مساحت این حوضه ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است که حدود ۶۵ درصد آن مناطق کوهستانی، ۲۴ درصد آن دشت‌ها و ۱۱ درصد آن را دریاچه پوشانده است. ۵۱ درصد از این حوضه در آذربایجان غربی،

۳۹ درصد در آذربایجان شرقی و ۱۰ درصد در استان کردستان واقع شده است.

در حوضه دریاچه ارومیه تعداد ۳۲ رودخانه بزرگ و کوچک وجود دارد که جداگانه یا پس از اتصال به یکدیگر به دریاچه می‌ریزند. از مجموع ۲۱ رودخانه‌ای که به دریاچه می‌ریزند، ۱۴ رودخانه دائمی و ۷ رودخانه فصلی می‌باشند [۸].

از نظر اقلیمی، این حوضه مشخصات دشت‌های نیمه مرتفع عرضهای میانی با آب و هوای عمومی زمستانهای سرد و تابستانهای نسبتاً معتدل را داراست. میانگین سالانه بارندگی از ۳۰۰ تا ۷۳۳ میلی‌متر متغیر است. توزیع فصلی بارش در یک دوره آماری دراز مدت، ۳۹/۴ درصد در فصل بهار، ۳۰/۱ درصد در زمستان، ۲۶/۴ درصد در پاییز و ۴/۱ درصد در فصل تابستان می‌باشد [۹].

تراز متوسط سالانه سطح آب دریاچه در گذشته ۱۲۷۶ متر از سطح دریا می‌باشد که حداکثر آن ۱۲۷۷/۹۱ متر و حداقل ۱۲۷۵/۲۵ متر ثبت شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل خشکسالی و پروژه‌های توسعه منابع آب، سطح آب ۲/۶۶ متر پایین آمده است. وسعت دریاچه به طور متوسط ۵۷۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد و عمق متوسط آن ۵/۴ متر است.

تبخیر زیاد از سطح دریاچه و همچنین ورود مقادیر زیاد نمک به وسیله جریانهای ورودی به دریاچه، شرایط فوق‌شور^۷ را در دریاچه به وجود آورده است. رشد زیاد جلبکها شرایط مناسبی را برای تولید نوعی میگوی بومی که در آبهای شور زیست می‌کند به نام *آرتمیا اورمیانا*^۸ فراهم کرده است. همچنین دریاچه و محیط زیست اطراف آن زیستگاه گونه‌های متعددی از پرندگان می‌باشد. به علت شوری بیش از حد آب دریاچه در سالهای اخیر، زاد و ولد *آرتمیا اورمیانا* با کاهش قابل توجهی مواجه شده است و خطر انقراض این "بی‌مهره" وجود دارد. به طور کلی شرایط زیست‌محیطی منطقه به دلیل ساخت و سازهای زیربنایی، سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب و آلودگی با خطرات جدی مواجه می‌باشد. تاکنون در عمل برای بهره‌برداری از منابع آب این حوضه آبریز مدلی تهیه نگردیده و بنابراین تأثیر این بهره‌برداری‌ها روی تراز و حجم آب دریاچه بررسی نشده است. در این تحقیق، رودخانه آجی‌چای به عنوان یکی از اصلی‌ترین و پر آب‌ترین رودخانه‌های موجود در این حوضه مورد بررسی قرار می‌گیرد و با مدل‌سازی اثرات سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از منابع آب در این حوضه، تراز و حجم آب دریاچه بررسی می‌شود. برای این

^۷ Hypersaline Condition

^۸ *Artemia urmiana*

^۱ Reference Mode

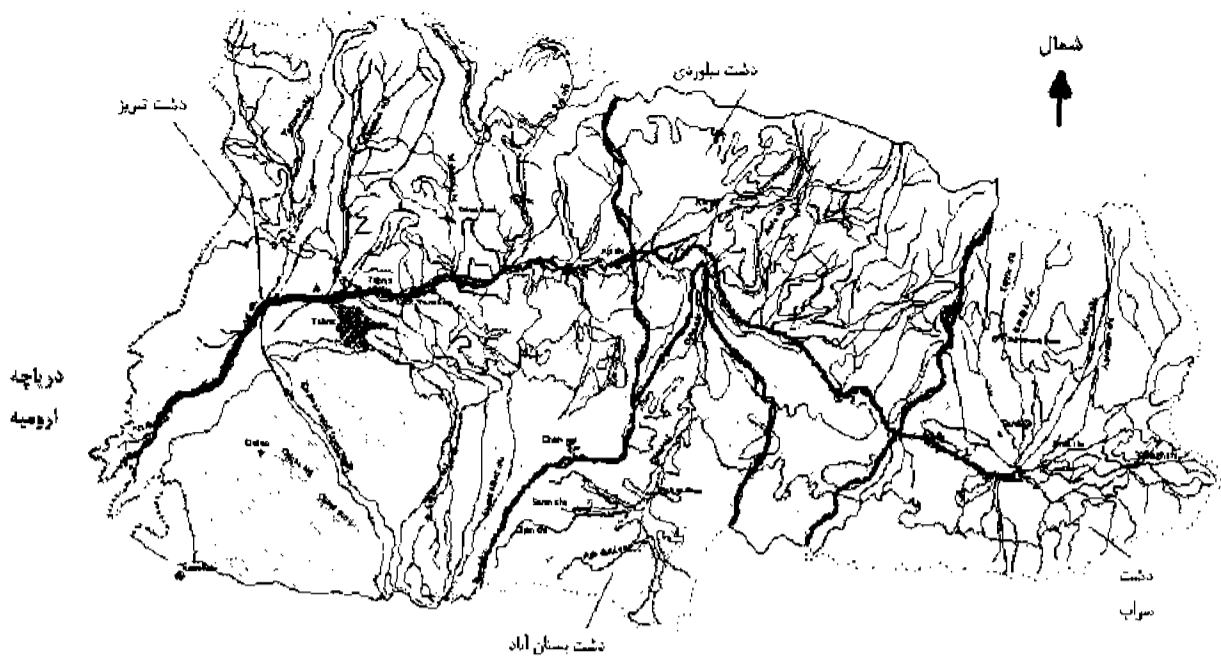
^۲ نحوه‌ی که اندرکنش درونی ساختارهای سیستم را در برگیرد

^۳ Flowchart

^۴ Causal Loop Diagrams (CLDs)

^۵ Stock-Flow Diagrams (SFDs)

^۶ Sensitivity Analysis



شکل ۱- حوضه رودخانه آجی چای

زیر حوضه (هکتار)، ضریب توزیع مصرف آب کشاورزی در ماههای مختلف سال برای آبهای سطحی و زیرزمینی، مجموع جبری رواناب سطحی حاصل از بارندگی و سایر مصارف محاسبه نشده (میلیون متر مکعب در ماه)، از این متغیرها در نمودار علت و معلولی و طرح ذخیره و جریان استفاده می‌شوند.

۳-۴- نمودارهای علت و معلولی

با توجه توصیف ناحیه مورد مطالعه، روش پویایی سیستم و متغیرهای کلیدی تشخیص داده شده، نمودار علت و معلولی دریاچه به صورت شکل ۲ به دست می‌آید. حلقه علت و معلولی مربوط به مخزن سد نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. قاعده بهره‌برداری از مخزن، قاعده SOP می‌باشد.

۴-۴- تبدیل حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای ذخیره و جریان

برای اجرای یک مدل شبیه‌سازی به وسیله نرم افزارهای مدل سازی کامپیوتری مانند ون سیم^۱ و استلا^۲ باید حلقه‌های علت و معلولی (CLDs) را به نمودارهای ذخیره و جریان (SFDS) تبدیل نماییم. نمودار ذخیره و جریان مدل در شکل ۴ نمایش داده شده است.

منظور، حوضه رودخانه آجی چای به سه ناحیه تقسیم گردید:
۱- دشت سراب ۲- دشت بستان آباد و بیلوردی ۳- دشت تبریز.
در شکل ۱ حوضه رودخانه آجی چای و سه ناحیه ذکر شده، دیده می‌شود.

۴- شبیه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب حوضه آبریز

۱-۴- تعریف دقیق صورت مسئله

هدف این تحقیق بررسی اثرات سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب سطحی در حوضه آبریز رودخانه آجی چای بر تراز آب دریاچه ارومیه می‌باشد.

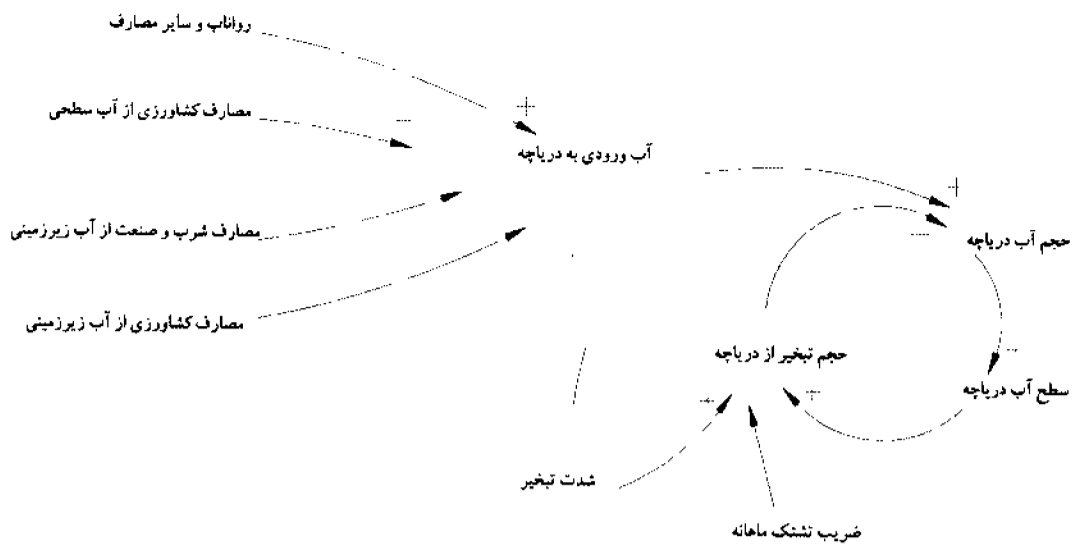
۲-۴- متغیرهای کلیدی

متغیرهای کلیدی موردنیاز در ساخت مدل عبارت‌اند از:

دبی رودخانه آجی چای در محل خروجی از هر کدام از نواحی (میلیون متر مکعب در ماه)، میزان مصرف آب سطحی برای نیازهای کشاورزی و میزان مصرف آبهای زیرزمینی برای نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت (میلیون متر مکعب در ماه) و ضرایب بازگشت آب به رودخانه برای هر کدام، شدت تبخیر از سطح دریاچه ارومیه (میلی متر در ماه)، شدت بارندگی روی دریاچه (میلی متر در ماه)، نیاز متوسط آبی در هر هکتار از زمینهای کشاورزی (متر مکعب در هکتار)، سطح زیر کشت کشاورزی در هر

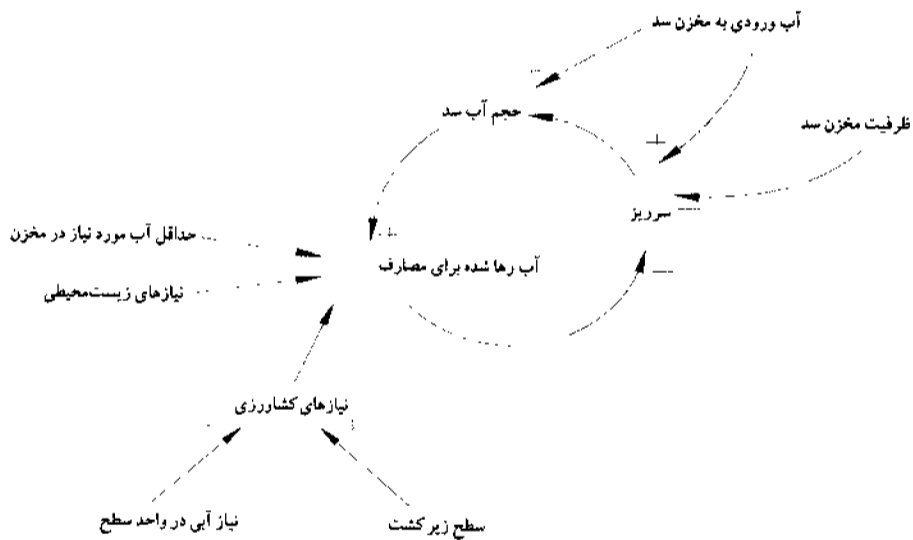
¹ Vensim

² Stella

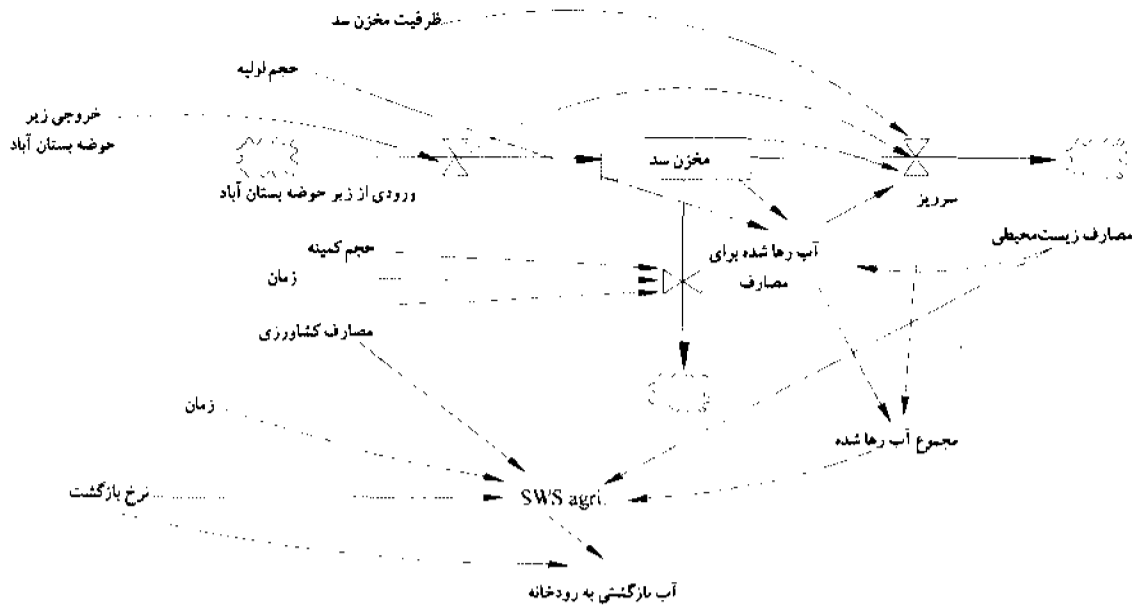


شکل ۲- حلقه علت و معلولی دریاچه

- روابط و معادلات لازم در نرم افزار ون سیم نوشته شده است.
- ۵- مدل سازی
چهار بخش اصلی از ساختار نهایی مدل ساخته شده در محیط نرم افزار ون سیم، به قرار زیر است:
- ۱- تعیین بیلان آبی و سری زمانی دبی خروجی از هر زیرحوضه؛
 - ۲- تعیین آب سطحی مصرفی برای نیازهای کشاورزی؛
 - ۳- تعیین سری زمانی (هیدروگراف) دبی خروجی از سد در دست احداث و نیاز؛
 - ۴- تعیین تراز و حجم آب موجود در دریاچه ارومیه.



شکل ۳- حلقه علت و معلولی مخزن سد



شکل ۴- قسمتی از مدل توسعه داده شده در ون سیم

لازم، رابطه بین تراز آب و مساحت سطح دریاچه به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$A = 2823.15 (H - 1270)^{0.331297} \quad H < 1276.16 \quad (2)$$

$$A = 1179.24 (H - 1270)^{0.7577} \quad H \geq 1276.16 \quad (3)$$

که A ، مساحت دریاچه برحسب کیلومتر مربع و H ، تراز آب دریاچه برحسب متر می باشد.

حجم آب دریاچه در تراز $1273/85$ متر (V_0) از طریق غیرمستقیم و بر پایه غلظت املاح موجود در آب دریاچه در دو تاریخ کاملاً متفاوت، محاسبه شده است. حجم مربوط به این تراز (V_0) برابر $20/3$ میلیارد مترمکعب به دست آمده است. حجم آب در چند تراز دیگر را نیز به دست آورده و براساس آنها، رابطه ۴ برای حجم آب دریاچه (V) در تراز H به دست می آید

$$V - V_0 = 253183 - 401.994 H + 0.159547 H^2 \quad (4)$$

که V ، حجم آب دریاچه برحسب میلیارد مترمکعب و H ، تراز آب دریاچه برحسب متر می باشد [۱۰].

پس از وارد کردن روابط میان پارامترها در مدل، به واسطی و اعتبار سنجی مدل می پردازیم. ابتدا واسنجی مدل انجام می شود. در این مرحله با توجه به سری زمانی دبی رودخانه های ورودی به دریاچه، سری زمانی بارندگی روی دریاچه و سری زمانی شدت تبخیر ماهانه که به عنوان داده های ورودی به مدل داده می شود. تراز آب دریاچه به دست آمده از مدل را با تراز آب اندازه گیری شده در

آب خروجی از هر زیرحوضه را با در نظر گرفتن بیلان آب به دست می آوریم. برای مثال برای زیر حوضه سراب داریم:

$$\text{River1(sarab)} = \text{runoff(sarab)} * (\text{Time}) - \text{AG-SW(sarab)} * \text{RF_SW} + \text{AG-SW(sarab)} * \text{RF_DI} * \text{DI1} + \text{AG-GW1} * (\text{Time}) * \text{RF_GW} \quad (1)$$

که در آن

River1(sarab) ، دبی خروجی از زیرحوضه سراب
 runoff(sarab) ، جمع جبری رواناب سطحی و سایر مصارف به حساب نیامده
 AG-SW(sarab) ، آب سطحی مورد نیاز برای مصارف کشاورزی

RF_SW ، ضریب بازگشت آب سطحی از مصارف کشاورزی
 AG-GW1 ، آب زیرزمینی مورد نیاز برای مصارف کشاورزی
 RF_GW ، ضریب برگشت آب زیرزمینی از مصارف کشاورزی
 DI ، آب زیرزمینی مورد نیاز برای مصارف شرب یا صنعت و
 RF_DI ، ضریب بازگشت آب زیرزمینی از مصارف شرب و صنعت است.

برای به دست آوردن تغییرات حجم و مساحت دریاچه برحسب ارتفاع آب، نقشه های هیدروگرافی کل دریاچه مورد نیاز است. با استفاده از تصاویر ماهواره ای برداشت شده از سطح دریاچه و نقشه های توپوگرافی تهیه شده از عکسهای هوایی و انجام محاسبات

گذشته مقایسه می‌کنیم. به منظور مقایسه بین اعداد به دست آمده از مدل و مشاهده شده، از برخی معیارهای آماری نظیر ضریب ارتباط^۱، جذر میانگین مربعات خطا^۲ و میانگین درصد خطا^۳ استفاده می‌گردد. نتایج ارزیابی آماری تراز آب دریاچه بعد از واسنجی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- نتایج ارزیابی آماری تراز آب دریاچه

R ²	RMSE	APE
۰/۹۴۶	۰/۰۴۶	۰/۰۰۳

۶- طراحی و ارزیابی سناریوها

پس از آنکه ساختار و رفتار مدل توسط آزمونهایی مانند آزمون صحت ساختار مدل و آزمون شرایط حدی تأیید شد، به بررسی سناریوهای متفاوت مطرح شده برای حوضه آبی چای می‌پردازیم.

۶-۱- سناریوهای مطرح در حوضه آبریز

از بین سناریوهای مختلفی که برای استفاده از منابع آب موجود پیشنهاد می‌شود می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد:

سیاست ۱- احداث سد شهید مدنی (ونیار)

مهم‌ترین سد در دست احداث در زیر حوضه آبی چای، سد ونیار در ۷ کیلومتری شهر تبریز می‌باشد. کار احداث سد از سال ۱۳۷۴

¹ Coefficient of Determination (R²)

² Root Mean Square Error (RMSE)

³ Average Percent Error (APE)

آغاز شد و در سال ۱۳۸۷ به بهره‌برداری خواهد رسید. حجم مخزن سد ۵۵۰ میلیون متر مکعب و حجم مفید آن ۴۶۶ میلیون متر مکعب می‌باشد. با احداث این سد، ۲۵۰۰۰ هکتار به اراضی کشاورزی منطقه اضافه خواهد شد. جدول ۲ شامل نیازهای آبی مختلفی است که با احداث سد در آینده تأمین خواهد شد.

سیاست ۲- کاهش نیاز آبی در هر هکتار

بررسی‌های انجام شده توسط مهندسین مشاور قدس نیرو که در زیرحوضه تبریز انجام گردید، نشان داد که می‌توان با بهبود راندمان آبیاری، نیاز آبی در هر هکتار را تا ۸۰۰۰ متر مکعب در هر هکتار کاهش داد. همچنین طبق برنامه‌ریزی‌ها و پیش‌بینی‌های انجام شده در حوضه آبی چای و با توجه به نیازهای آینده زیرحوضه تبریز، طرحی برای توسعه سطح زیر کشت در زیرحوضه سراب پیش‌بینی نشده است. با اعمال تکنیک‌های بهبود راندمان آبیاری می‌توان نیاز آبی در زیر حوضه‌های سراب و بستان آباد-بیلوردی را نیز تا ۸۰۰۰ متر مکعب در هکتار کاهش داد.

سیاست ۳- ترکیب سیاست‌های ۱ و ۲

در این حالت اجرای همزمان سیاست‌های ۱، ۲، یعنی بهره‌برداری از سد به همراه کاهش نیاز آبی در هر هکتار در نظر گرفته می‌شود.

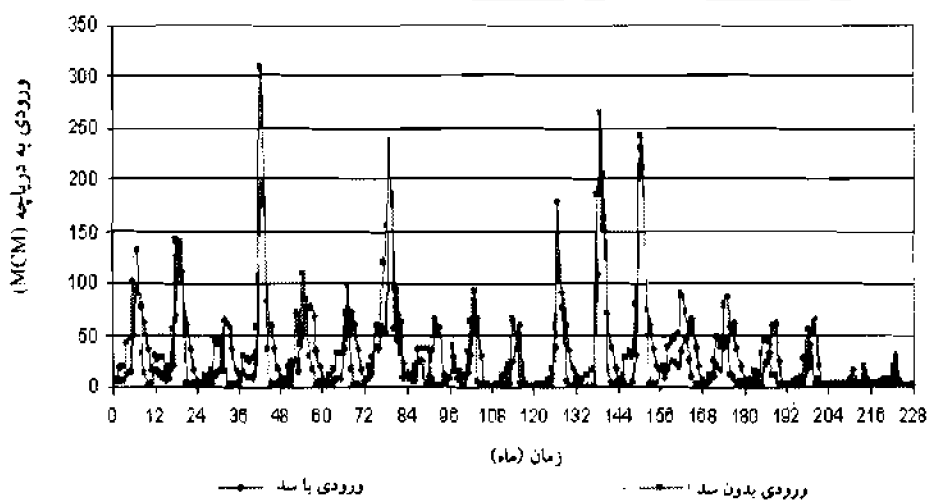
۶-۲- آزمون سیاست‌ها

۶-۲-۱- آزمون سیاست ۱

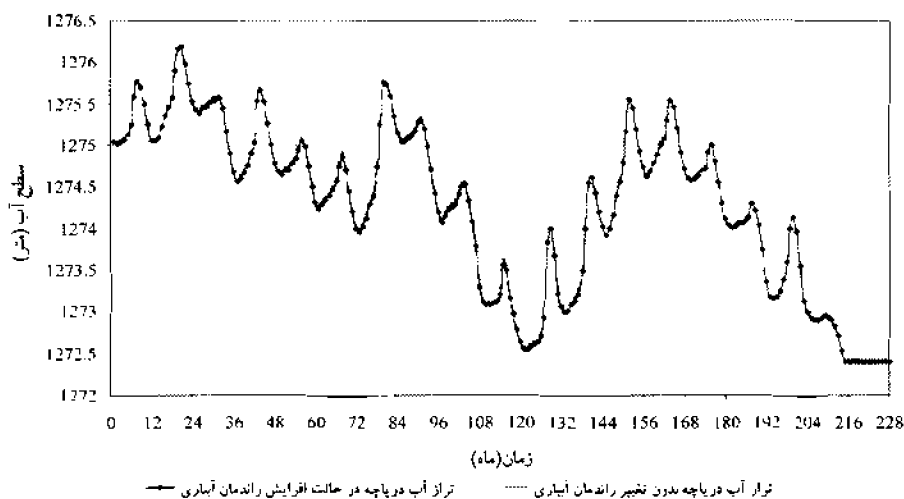
نتایج اجرای این سیاست در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که دبی ورودی به دریاچه در این حالت کمتر از حالتی است که هیچ سدی احداث نشده است. همچنین دبی

جدول ۲- نیازهای آبی تأمین شده توسط سد ونیار

ماه	نیازهای کشاورزی (MCM)		آبی پروری (MCM)
	دشت تبریز	شهید سرداری	
فروردین	۹/۰۴	۷/۱۱	۷/۲۳
اردیبهشت	۳۸/۷۲	۱۴/۵۳	۱/۸۹
خرداد	۶۳/۱۶	۱۹/۶۹	۱/۸۹
تیر	۵۴/۴۷	۱۶/۹۵	۱/۸۹
مرداد	۳۰/۹۱	۱۲/۳۶	۱/۸۳
شهریور	۱۵/۲۷	۴/۳۹	۱/۸۳
مهر	۴/۱۳	۱/۸۲	۱/۸۳
آبان	۰/۰۰	۳/۱۱	۰/۰۰
آذر	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
دی	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بهمن	۰/۰۰	۰/۰۰	۶/۷۷
اسفند	۰/۰۰	۰/۱۰	۷/۲۳
جمع کل	۲۱۴/۷۰	۸۰/۰۶	۳۲/۳۹



شکل ۵- تأثیر سیاست ۱ بر حجم آب ورودی به دریاچه



شکل ۶- تأثیر سیاست ۱ بر تراز آب دریاچه

بهره برداری از سد می باشد.

۲-۲-۶- آزمون سیاست ۲

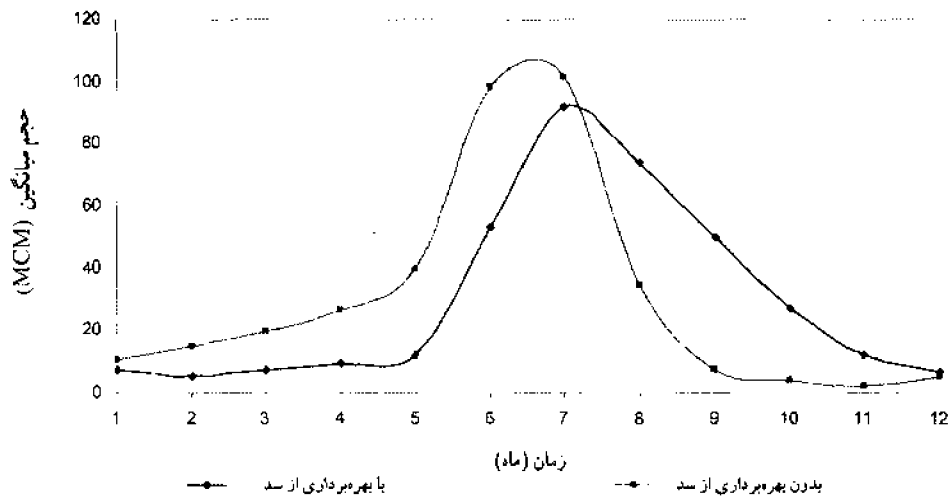
با توجه به شکل ۸ می توان نتیجه گرفت که با اجرای سیاست ۲، حجم آب ورودی به دریاچه در ماههای مختلف افزایش خواهد یافت که این افزایش به دلیل کاهش مصرف می باشد. البته همان طور که ملاحظه می شود تغییرات تراز آب دریاچه ناچیز و به طور میانگین ۳ سانتی متر است. علت این است که علی رغم کاهش مصرف و افزایش ورودی به دریاچه، همزمان سطح آب نیز زیاد می شود و تبخیر بیشتری از سطح دریاچه صورت می گیرد. از طرفی میزان برداشت از آب زیرزمینی نیز کم می گردد و بنابر این آب برگشتی به رودخانه نیز کم می شود. با توجه به شکل ۸ اختلاف تراز حداکثر و حداقل در فاصله سالهای اجرای مدل، $3/6$ متر است. به

پیک ورودی به دریاچه در اثر سیاست ۱ کمتر از دبی پیک طبیعی (بدون احداث سد) می باشد. با توجه به شکل ۶، تراز آب دریاچه بر اثر اجرای سیاست ۱ کاهش چشمگیری نخواهد داشت.

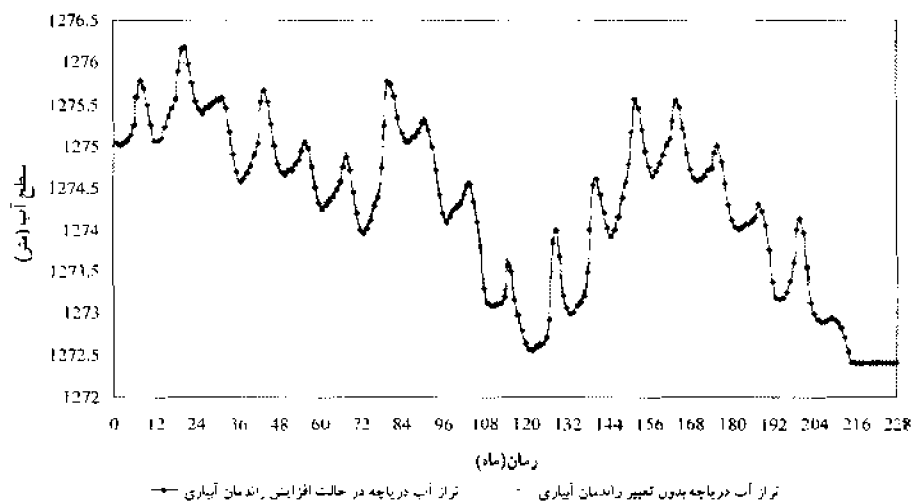
میانگین حجم ماهانه آب ورودی به دریاچه در ماههای مختلف محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است. با رسم این مقادیر (شکل ۷) ملاحظه می شود که حجم ورودی به دریاچه از ابتدای مهر تا ابتدای اردیبهشت، در حالت بهره برداری از سد کمتر از حجم ورودی قبل از بهره برداری از سد می باشد ولی از ابتدای اردیبهشت تا ابتدای مهر یعنی ماههای گرم و خشک سال، حجم ورودی به دریاچه پس از بهره برداری از سد بیشتر از دبی حالت قبل از ساخت سد می باشد. در ستون آخر جدول ۳ مقادیر اختلاف بین دبی ها آورده شده است که علامت منفی نشان دهنده بیشتر بودن دبی ورودی در حالت

جدول ۳- میانگین حجم ورودی به دریاچه در ماههای مختلف (MCM)

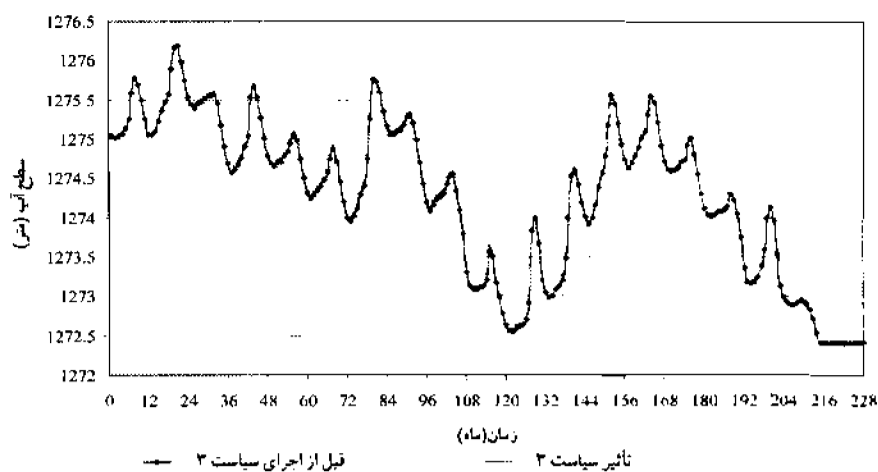
ماه	با بهره برداری از سد	بدون بهره برداری از سد	اختلاف
مهر	۷/۲۸	۱۰/۵۳	۳/۲۶
آبان	۵/۴۸	۱۴/۷۸	۹/۳۰
آذر	۷/۴۱	۱۹/۵۲	۱۲/۱۱
دی	۹/۷۷	۲۶/۳۷	۱۶/۶۰
بهمن	۱۲/۲۷	۳۹/۷۰	۲۷/۴۴
اسفند	۵۳/۳۳	۹۸/۲۰	۴۴/۸۷
فروردین	۹۱/۸۹	۱۰۱/۵۵	۹/۶۶
اردیبهشت	۷۳/۹۰	۳۴/۴۶	-۳۹/۴۴
خرداد	۴۹/۹۵	۷/۴۷	-۴۲/۴۸
تیر	۲۷/۰۲	۴/۱۵	-۲۲/۸۸
مرداد	۱۲/۲۰	۲/۱۷	-۱۰/۰۳
شهریور	۶/۷۴	۵/۱۲	-۱/۶۲



شکل ۷- میانگین حجم ورودی به دریاچه در ماههای مختلف سال



شکل ۸- تأثیر سیاست ۲ بر تراز آب دریاچه



شکل ۹- اثر همزمان سیاست‌های ۱ و ۲ بر تراز آب دریاچه

جدول ۴- تحلیل آماری نتایج به دست آمده از سری های زمانی مختلف

سری زمانی	تراز بیشینه	تراز کمینه	تراز میانگین
۱	۱۲۷۶/۱۱	۱۲۷۲/۵۲	۱۲۷۴/۳۵
۲	۱۲۷۶/۲۱	۱۲۷۲/۵۱	۱۲۷۴/۳۹
۳	۱۲۷۶/۰۸	۱۲۷۲/۵۱	۱۲۷۴/۲۵
۴	۱۲۷۶/۱۵	۱۲۷۲/۴۸	۱۲۷۴/۳۲
۵	۱۲۷۶/۱۶	۱۲۷۲/۶۷	۱۲۷۴/۴۴
۶	۱۲۷۶/۰۹	۱۲۷۲/۵۴	۱۲۷۴/۲۹
۷	۱۲۷۶/۰۹	۱۲۷۲/۵۴	۱۲۷۴/۳۲
۸	۱۲۷۵/۱۵	۱۲۷۲/۶۰	۱۲۷۴/۴۱
۹	۱۲۷۶/۱۹	۱۲۷۲/۵۳	۱۲۷۴/۳۴
۱۰	۱۲۷۶/۱۹	۱۲۷۲/۵۷	۱۲۷۴/۳۹
میانگین	۱۲۷۶/۱۴	۱۲۷۲/۵۴۷	۱۲۷۴/۳۵
انحراف معیار	۰/۰۴۷	۰/۰۵۵	۰/۰۵۸

تولید شده. مدل برای حالت پس از بهره‌برداری از سد، اجرا شد و تراز آب دریاچه برای هر سری زمانی در ماههای مختلف به دست آمد. در جدول ۴ تراز بیشینه، تراز کمینه و تراز میانگین هر سری زمانی آمده است. با فرض توزیع نرمال، با احتمال ۹۰ درصد تراز بیشینه بین ۱۲۷۶/۰۶ و ۱۲۷۶/۲۲ متر، تراز کمینه بین ۱۲۷۲/۴۶ و ۱۲۷۲/۶۴ متر و تراز میانگین بین ۱۲۷۴/۲۵ و ۱۲۷۴/۴۵ متر خواهد بود.

۳-۲-۶- آزمون سیاست ۳

اثر سیاست ۳ در شکل ۹ دیده می‌شود. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با اجرای همزمان دو سیاست فوق، تراز آب دریاچه در بیشتر ماهها تغییری نکرده و یا در جهت افزایشی است.

عبارت دیگر اثر خشکسالی بر تراز آب دریاچه بسیار زیاد بوده و با سیاست‌های بهره‌برداری نمی‌توان این اثر را تعدیل کرد. در مرحله بعد برای رواناب هر یک از زیر حوضه‌های رودخانه آجی‌چای، ۱۰ سری زمانی استوکستیک ۲۰ ساله با مدل $ARMA(1,1)$ با استفاده از نرم افزار SAMS تولید شد. مدل‌های AR^1 از دهه ۶۰ میلادی به طور گسترده در هیدرولوژی و منابع آب استفاده می‌شوند. در این مدل‌ها مقدار یک متغیر در زمان حال به مقدار همان متغیر در زمان گذشته بستگی دارد. با اضافه کردن قسمت MA^2 به مدل‌های AR ، مدل به دست آمده قادر خواهد بود با تعداد پارامترهای کمتری سری زمانی داده‌ها را شبیه‌سازی کند. با استفاده از این سری های زمانی

¹ Autoregressive
² Moving Average

و اعتبار سنجی مدل می‌باشد و برای این منظور باید اطلاعات کامل و دقیقی از میزان مصارف آب در گذشته موجود باشد.

جریان ورودی به دریاچه از طریق سایر رودخانه‌ها دارای رژیم هیدرولوژیکی طبیعی نمی‌باشد و فرض اینکه سری زمانی دبی ورودی به دریاچه از سایر رودخانه‌ها در آینده عیناً تکرار می‌شود، فرض درستی نمی‌باشد. بنابراین اگر چندین سری زمانی برای آورد رودخانه‌های زیر حوضه‌های مختلف تولید شده و مدل با آنها اجرا شود نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

علاوه بر مورد مذکور، تغییر اقلیم نیز ممکن است بر سیکل و رژیم هیدرولوژیکی حوضه از جمله تراز دریاچه تأثیر بگذارد.

اگرچه تراز آب دریاچه در اثر سیاست‌های بهره برداری ذکر شده تغییرات زیادی نمی‌کند، ولی پارامتر شوری آب دریاچه افزایش می‌یابد. بنابراین توسعه مدل به جهت در نظر گرفتن و مدل کردن پارامترهای کیفی از جمله شوری آب دریاچه ضروری است.

با اجرای همزمان سیاست‌های ۱ و ۲، تغییرات حجم آب دریاچه در مجموع ناچیز خواهد بود و یا این تغییرات در جهت افزایش حجم آب دریاچه می‌باشد. بنابراین احداث سد به شرط آنکه با کاهش همزمان نیازهای آب کشاورزی همراه باشد، مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

باید در نظر داشت که در این تحقیق فقط حوضه رودخانه آجی‌چای مورد بررسی قرار گرفته است. ساخت سد، کاهش نیاز آبی و یا سایر سیاست‌های احتمالی دیگر در صورتی که در سایر زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه اجرا گردد، ممکن است بر تراز و حجم آب دریاچه چشمگیر خواهد بود.

توجه به موارد زیر می‌تواند به بهبود مدل تهیه شده کمک نماید: تصحیح و جمع آوری اطلاعات: اطلاعات موجود برای مصارفی از قبیل کشاورزی، شرب و صنعت بسیار ناچیز هستند و از دقت مناسبی نیز برخوردار نمی‌باشند. لازمه فرآیند مدل‌سازی، واسنجی

۸- مراجع

- 1- Bhatti, M. A. (1995). "System analysis techniques in water resource management." *Proc., WRM '95*, Isfahan University of Technology.
- 2- Simonovic, P. S., and Ahmad, S. (2002). "System dynamics modeling of reservoir operation for flood management." *J. Computing in Civil Engineering*, 14(3), 190-198.
- 3- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics*, McGraw-Hill, Book Co., Boston.
- 4- Passel, D. H., Tidwell, C. V., Conrar, S. H., and Thomas, R. P. (2003). *Cooperative water resources modeling in the middle Rio Grande River*, Sand Report, United States Department of Energy.
- 5- Palmer, R. N., Keyes, A. M., and 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.
- 6- Fletcher, E. (1998). "The use of system dynamics as a decision water support tool for the management of scarce resources." *First International Conference on New Information Technology for Decision Making in Civil Engineering*, Montreal, Canada.
- 7- Simonovic, S. P., Fahmy, H., and Elshoragy, A. (1997). "The use of object oriented modeling for water resources planning in Egypt." *J. Water Resources Management*, 11, 242-261.

۸- مهندسین مشاور جاماب. (۹). *مطالعات جامع حوضه دریاچه ارومیه*.

۹- مهندسان مشاور آب نیرو. (۱۳۷۱). *گزارش مطالعات هواشناسی دریاچه ارومیه*. ۱-۹.

۱۰- مهندسان مشاور آب نیرو. (۱۳۷۱). *گزارش مطالعات بیلان دریاچه ارومیه و تغییرات تراز آب در عمر مفید بزرگراه*. ۷-۱۱.