



## Development of A Phosphorous Management Model For A Reservoir Using System Dynamic Simulation Approach

M. Taheriyoun<sup>1\*</sup>, M. Karamouz<sup>2</sup> and A. Baghvand<sup>3</sup>

### Abstract

Eutrophication is one of the main environmental problems in dam reservoirs which affect the availability of water with suitable quality. Effective management and control of such phenomenon in a reservoir may support by implementation of low-complexity simulation models employing the most effective water quality parameters and processes. System dynamics (SD) is one of object oriented simulation tools that is able to simulate the eutrophication process in a reservoir according to the systemic approach and with emphasis on the causal relationships and feedbacks. In this paper, a system dynamic simulation model for phosphorous concentration of the Satarkhan reservoir in Eastern Azerbaijan Province, North-western Iran, has been developed. In this model, the phosphorous has been considered as the main factor of eutrophication. Also the interaction between the phosphorous in the reservoir and the bed sediment has been considered with monthly variable coefficients of phosphorous burial in sediments. Sensitivity analysis were made on the coefficients and calibration and validation of the model have then been achieved based on a 47 month period of data. Results showed an acceptable reliability in simulation of phosphorus concentration despite the simple assumptions used. Fractions of the phosphorous in the input, output, sediments, and the reservoir showed the significance of sediments in phosphorus concentration equilibrium. Analysis of scenarios regarding the reduction and increase of input load to the reservoir also showed that the impact of phosphorous input load reduction is at a smaller extent effective which should be considered in nutrient load management in the watershed.

**Keywords:** Eutrophication, Phosphorous concentration, System dynamics, Satarkhan reservoir.

Received: December 12, 2010

Accepted: July 26, 2011

## تدوین مدل مدیریتی فسفر در مخزن با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم

مسعود طاهریون<sup>۱\*</sup>، محمد کارآموز<sup>۲</sup> و اکبر باغوند<sup>۳</sup>

### چکیده

تغذیه‌گرایی در مخازن سدها یکی از عمده‌ترین مشکلات زیست‌محیطی اثرات احداث سدها و تامین آب با کیفیت مطلوب می‌باشد. مدیریت و کنترل موثر این پدیده در مخازن مستلزم به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی با کمترین سطح پیچیدگی و با تکیه بر موثرترین پارامترهای کیفی و فرآیندهای موثر است. پویایی سیستم یکی از ابزارهای شبیه‌سازی شیء‌گراست که با دیدگاه تحلیل سیستمی و تاکید بر روابط علت و معلولی و بازخورها به صورت پویا قادر به شبیه‌سازی این فرآیند در مخزن می‌باشد. در این مقاله با استفاده از این روش و با در نظر گرفتن پارامتر فسفر به عنوان عامل اصلی تغذیه‌گرایی، مدل شبیه‌سازی غلظت فسفر در مخزن سد ستارخان واقع بر رودخانه اهرچای در استان آذربایجان شرقی تدوین گردیده است. در این مدل اندرکشی فسفر مخزن با رسوبات کف به صورت ضرایب متغیر ماهانه به همراه فرآیند دفن فسفر در رسوبات در نظر گرفته شده است. پس از آنالیز حساسیت روی ضرایب مذکور، واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر اساس داده‌های موجود در یک دوره ۴۷ ماهه انجام گردیده و نتایج حاکی از اطمینان قابل قبول مدل در شبیه‌سازی فسفر مخزن علی‌رغم سادگی فرضیات مورد استفاده بوده است. بررسی نسبت سهم فسفر در ورودی، خروجی، رسوبات و مخزن نشان‌دهنده اهمیت و سهم بالای رسوبات در مدیریت غلظت فسفر در مخزن می‌باشد. همچنین تحلیل سناریوهای کاهش و افزایش بار ورودی به مخزن نشان داد تغییر بار ورودی در غلظت فسفر در مخزن با نسبت کمتری تاثیر دارد که در مدیریت کاهش بار مواد مغذی حوزه باید در نظر گرفته شود.

**کلمات کلیدی:** تغذیه‌گرایی، غلظت فسفر، پویایی سیستم، سد ستارخان.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۱ آذر ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۴ مرداد ۱۳۹۰

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Tarbiat Moalem University;

Tehran, Iran, Email: taherion@tmu.ac.ir

2- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran; Tehran, Iran,

Email: karamouz@ut.ac.ir

3- Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran; Tehran,

Iran, Email: baghvand@ut.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- استادیار دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

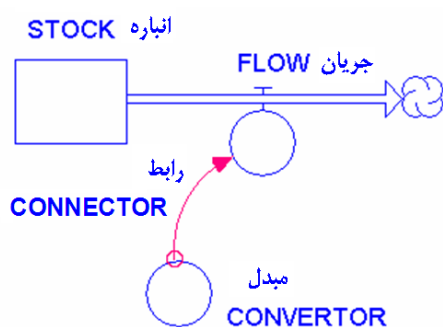
\*- نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

با توجه به کمبود آب در کشور و رشد جمعیت و لزوم اجرای طرحهای توسعه منابع آب امروزه سدها با هدف تامین آب برای مصارف جوامع شهری، صنعتی و کشاورزی اهمیت بالایی دارند. لیکن بروز تغذیه‌گرایی در اثر ورود مواد مغذی از حوضه آبریز به مخزن موجب کاهش کیفیت آب مخازن سدها می‌گردد. تغذیه‌گرایی در مخازن از مهمترین پدیده‌های تاثیرگذار در کیفیت آب است که در اثر ورود مواد مغذی به خصوص فسفر منجر به افزایش بیش از حد جلبکها در آب می‌شود و علاوه بر مشکلات کیفیت آب برای مصرف کننده، حیات سایر آبزیان را تهدید می‌نماید.

در این راستا مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت منابع آب یکی از موثرترین ابزارها در بررسی راهکارهای کاهش اثرات تغذیه‌گرایی و بهبود کیفیت آب می‌باشد. اجرای برنامه مدیریتی حداکثر بار آلودگی روزانه (TMDL) بدون استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی که ارتباط علت و معلولی بین منابع آلاینده و محیط آبی را نشان دهد، امکان پذیر نیست. انتخاب صحیح مدل کیفی یکی از موثرترین عوامل در موفقیت‌آمیز بودن برنامه TMDL می‌باشد. این کار با توجه به اهداف مدیریتی، مشخصات سیستم آبی و سطح داده‌های موجود انجام می‌گردد. استفاده از مدل‌های پیچیده بدون توجه به سطح داده‌ها و اطلاعات موجود نه تنها انتظار برنامه‌های مدیریتی را از مدل‌سازی کیفی تامین نمی‌نماید، بلکه به دلیل افزایش عدم قطعیت مدل در اثر ورود پارامترهای متعدد، خروجی قابل اعتمادی را ارائه نخواهد داد. (Depinto et al., 2004).

اساس کار مدل‌سازی با پویایی سیستم با استفاده از ۴ جزء اصلی شامل انباره<sup>۱</sup>، جریان<sup>۲</sup>، مبدل<sup>۳</sup>، رابطها<sup>۴</sup> انجام می‌گردد. مخزن جزئی از سیستم است که در طول زمان محتوا و ذخیره آن افزایش یا کاهش دارد. جریان جزئی است که محتوای مخزن را در طول دوره زمانی تعیین می‌کند (به صورت ورودی یا خروجی)، مبدل سرعت انجام فرآیندها و جریان ورودی و خروجی در سیستم را نشان می‌دهد و رابطها رابطه علت و معلولی اجزاء را نشان می‌دهد. نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیر خطی) که با روش Euler یا Runge-Kutta حل می‌شوند ساخته می‌شود. (Ford, 1999) در حال حاضر نرم‌افزارهای مختلفی جهت شبیه‌سازی به روش پویایی سیستم موجود است که در این مقاله از نرم‌افزار STELLA که کاربرد زیادی در مطالعات مختلف مدل‌سازی به روش پویایی سیستم داشته استفاده شده است. در شکل ۱ اجزای اصلی یک مدل ساده پویایی سیستم در محیط STELLA به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱- اجزای اصلی یک مدل پویایی سیستم در نرم افزار STELLA

مدل‌های شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن تاکنون بر اساس مدل‌های مفهومی و با استفاده از روش پویایی سیستم در بخشهایی از مطالعات کیفیت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

عیسی‌زاده و همکاران (۱۳۸۴) مدل‌های مختلف شبیه‌سازی فسفر در مخزن سد لتیان را مورد استفاده قرار دادند و بر اساس داده‌های مشاهداتی سه ساله با تناوب ماهانه مدل‌های مذکور را واسنجی نمودند. با مقایسه ضرایب همبستگی و خطای باقیمانده نشان دادند مدل Snodgrass-O'Melia که مخزن را در حالت لایه‌بندی تابستان به صورت دو قسمتی در نظر می‌گیرد، بیشترین نزدیکی را با مقادیر مشاهده شده نشان می‌دهد. در این تحقیق عدم صحت‌سنجی نتایج به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی از اعتبار نتایج حاصل از مقایسه مذکور می‌کاهد. علاوه بر این که در مدل Snodgrass-O'Melia رهاسازی فسفر از رسوبات در نظر گرفته نمی‌شود.

پویایی سیستم یکی از ابزارهایی است که با تاکید بر روابط علت و معلولی و سیستم بازخور<sup>۲</sup> به تحلیل روابط بین آنها پرداخته و قادر به ساختن یک مدل شبیه‌سازی از رفتار سیستم باشد. (Ford, 1999) در این روش، شبیه‌سازی مبتنی بر بازخورها و به صورت شیء‌گراست که تاکید بر دخالت کاربر در توسعه مدل و جلب اطمینان وی در فرآیند مدل‌سازی با توجه به محدودیت‌های منابع و میزان رشد است. شناخت پویایی‌های سیستم از لحاظ درک پیچیدگی‌های سیستم و تجزیه و تحلیل رفتار اجزای آن اهمیت زیادی دارد. در پویایی‌های سیستم مفهوم گذر زمان در شبیه‌سازی حاکم است و شبیه‌سازی به صورت گام به گام زمانی انجام می‌شود. نقاط قوت این روش شامل افزایش سرعت تدوین مدل، افزایش اعتماد به مدل به دلیل مشارکت کاربر، امکان توسعه گروهی مدل، ارتباط موثر با نتایج و توانایی انجام تحلیل حساسیت و سهولت در ایجاد تغییر در مدل می‌باشد. (Ford, 1999)

سمایی و همکاران (۱۳۸۳) پویایی‌های روابط بین فیتوپلانکتون و زوپلانکتون و مواد مغذی را در مخزن Long Lake توسط نرم‌افزار Vensim شبیه‌سازی نموده‌اند. روابط بین اجزای این مدل بر اساس روابط سینتیک رشد فیتوپلانکتون و زوپلانکتون با توجه به مقادیر مواد مغذی، دما و سایر مشخصات نظیر حجم و سطح مخزن در مدل تنظیم گردیده و بر اساس گام‌های زمانی روزانه شبیه‌سازی مقادیر فیتوپلانکتون و زوپلانکتون را انجام می‌دهد. در این تحقیق علیرغم نتایج قابل قبول مدل توسعه داده شده برای دریاچه Long Lake، به دلیل کمبود داده‌های مورد نیاز، به کارگیری آن برای اغلب مخازن داخل کشور با مشکل مواجه است.

(2004) Ruley and Rusch مدل پویایی سیستم را برای یک دریاچه کم عمق در ایالت لویزیانا با در نظر گرفتن اثر رهاسازی فسفر از رسوبات توسعه داده‌اند. در این تحقیق مدل تدوین شده برای بازه داده‌های مشاهداتی یکساله واسنجی گردیده لیکن به صحت‌سنجی نتایج مدل اشاره‌ای نشده است. از مدل واسنجی شده در ارزیابی سناریوهای مختلف کاهش بار فسفر در مخزن استفاده گردیده و بهترین راهکار مدیریتی را کنترل ترکیب بار فسفر حوزه و رسوبات مخزن ارزیابی نموده است.

(1998) Vezjak et al. جهت مطالعه پدیده تغذیه‌گرایی مدل پویایی سیستم برای چهار پارامتر نیتروژن، فسفر، زوپلانکتون و فیتوپلانکتون را در مخزن توسعه داده‌اند. در این مدل تاکید بر ارزیابی تاثیر مواد مغذی بر تغییرات فصلی پلانکتونها و چرخه زنجیره غذایی در اکوسیستم آبی بوده که مقایسه میزان تاثیر نیتروژن و فسفر نشان دهنده محدوده‌کنندگی عامل فسفر در تغذیه‌گرایی مخزن مورد مطالعه است. در این تحقیق نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل تدوین شده و تحلیل سناریوهای تغییر بار ورودی ارائه نشده است.

در برخی مطالعات نیز مدل‌سازی تغذیه‌گرایی با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری آماده انجام گردیده است. افشار سعادتپور (۱۳۸۸) از مدل دوبعدی ce-qual-w2 برای شبیه‌سازی کیفی مخزن سد کرخه استفاده نمود و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، اهمیت بار فسفر در کنترل روند تغذیه‌گرایی مخزن را نتیجه‌گیری نموده است.

سارنگ و همکاران (۱۳۸۰) مدل یک بعدی HEC5-Q را برای مدل‌سازی مخزن سد بوکان به کار بردند و بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده مدل را واسنجی و صحت‌سنجی نمودند. ارحامی و همکاران (۱۳۸۱) کار مشابهی را برای سد لتیان انجام داده‌اند. به طور کلی استفاده از مدل‌های آماده در صورت وجود داده‌ها و واسنجی و

صحت‌سنجی مناسب می‌تواند ابزار مفیدی در کنترل و مدیریت تغذیه‌گرایی مخازن سد باشد، لیکن برتری مدل‌های پویایی سیستم بر مدل‌های مذکور آن است که در شرایط محدودیت داده‌های موجود، کاربر می‌تواند با مشارکت در ساخت اجزای مدل بر اساس سطح پیچیدگی مورد نظر درک بهتری از فرآیند مدل‌سازی داشته باشد. این نکته در میزان اعتبار مدل برای پیش‌بینی‌ها و اطمینان نتایج مدل اهمیت زیادی دارد. مطالعات انجام شده حاکی از قابلیت‌های قابل توجه مدل‌های پویایی سیستم در مدیریت کیفی منابع آب با در نظر گرفتن سادگی و حداقل پیچیدگی ممکن در مدل‌سازی می‌باشد. در این مقاله سعی گردیده تا کارایی روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن از طریق ارائه یک مدل ساده شبیه‌سازی غلظت فسفر در مخزن سد ستارخان واقع در استان آذربایجان شرقی با استفاده از نرم افزار Stella نشان داده شود. مدل تدوین شده برای تحلیل سناریوهای بار ورودی به مخزن و سهم‌بندی بار فسفر در قسمت‌های مختلف سیستم مخزن استفاده شده است.

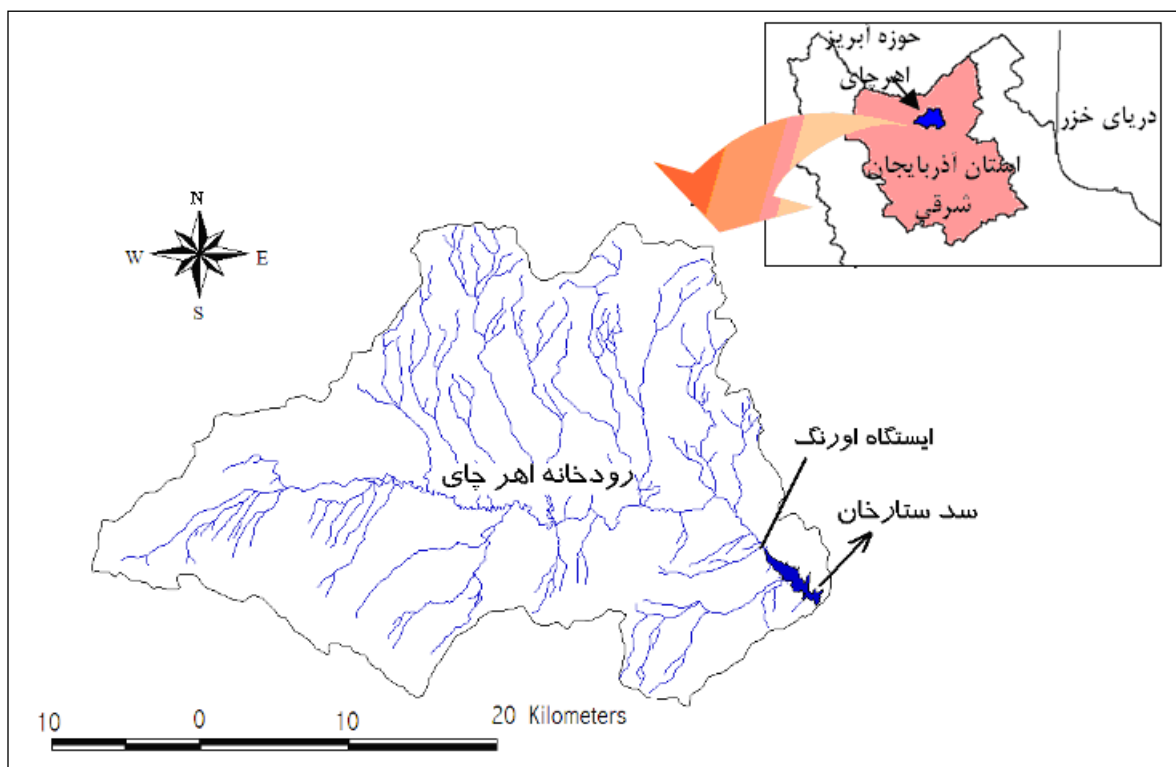
## ۲- مواد و روشها

### ۱-۱- مطالعه موردی

سد ستارخان در ۱۹ کیلومتری غرب شهرستان اهر در استان آذربایجان شرقی با موقعیت جغرافیایی ۲۸° ۳۸' عرض شمالی و ۵۳° ۴۶' طول شرقی و بر روی رودخانه اهرچای واقع است. در شکل ۲ موقعیت حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه و سد ستارخان نشان داده شده است.

این سد از سال ۱۳۷۷ با هدف تامین آب شهری، صنعتی و کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. سایر مشخصات هندسی و هیدرولیکی این مخزن در جدول ۱ نشان داده شده است ([www.irandams.com](http://www.irandams.com)).

در حال حاضر عدم کنترل مواد آلاینده در سطح حوضه آبریز که عمده‌ترین آنها شامل پساب کشاورزی، شهر و روستاها و فضولات دامی می‌باشد، موجب بروز تغذیه‌گرایی در مخزن گردیده و کیفیت آب مخزن را به شدت کاهش داده است. این مساله مشکلاتی را در تامین حداقل کیفیت لازم برای مصارف مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی ایجاد نموده است. این مشکلات شامل گرفتگی مجاری آبیاری تحت فشار، گرفتگی فیلترهای تصفیه‌خانه آب شهر اهر و طعم و بوی نامناسب آب جهت مصارف شرب بوده است.



شکل ۲- موقعیت سد ستارخان و حوزه آبریز رودخانه اهر چای

جدول ۱- مشخصات مخزن سد ستارخان

۱۴۵۱	تراز نرمال (متر بالاتر از سطح دریا)	۱۳۷۷	سال شروع بهره برداری
۷/۲	سطح دریاچه در تراز عادی آب (km <sup>2</sup> )	۱۹- اهر	فاصله از شهر (km)
۸	طول دریاچه در تراز عادی آب (km)	اهرچای	نام حوزه آبریز
۵۹	ارتفاع کل تاج سد تا کف (متر)	۹۳۰	مساحت حوزه آبریز (km <sup>2</sup> )
۵۱	عمق حداکثر مخزن سد (متر)	۹۱	متوسط دبی ورودی به مخزن MCM/y
۳۵	عمق متوسط دوره بهره برداری (متر)*	۱۳۱	حجم کل (MCM)
۱۱	متوسط زمان ماند (ماه)*	۱۲۱/۷۵	حجم مفید (MCM)

\*براساس اطلاعات بهره برداری سالهای ۷۸-۸۶

برای بازه‌ی اطلاعات موجود آورده شده است. مقادیر حداکثر نشان داده شده حاکی از آن است که در برخی ماهها پارامترهایی نظیر آمونیاک، فسفات و کلیفرم از استاندارد تخطی داشته‌اند. همچنین بررسی نسبت نیترژن به فسفر در مخزن نشان دهنده آن است که این نسبت همواره بالاتر از ۱۰ بوده و در نتیجه فسفر به عنوان عامل محدودکننده تغذیه‌گرایی در مخزن شناخته می‌شود.

اندازه‌گیری دما در عمق در سال ۱۳۸۳ توسط مهندسین مشاور رویان نیز انجام شده که تغییرات دمایی مخزن نشان دهنده وجود لایه‌بندی حرارتی در فصل تابستان می‌باشد به طوریکه دمای رولایه در این

#### ۲-۱-۱- داده‌های نمونه برداری

جهت تامین داده‌های مورد نیاز این تحقیق از اطلاعات برنامه پیش کیفی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی برای دوره مهرماه ۸۲ تا شهریور ۸۶ (۴۷ ماه) استفاده گردید. داده‌های اندازه‌گیری شده در این برنامه شامل پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، آمونیاک، نیترات، فسفات و BOD، COD، DO و کلیفرم‌ها می‌باشد. نمونه‌برداری‌ها با تواتر ماهانه و در نزدیکی محور سد و در عمق یک متری زیر سطح آب انجام شده است. آنالیز کلیه نمونه‌ها در آزمایشگاه و با دستگاه اسپکتوفوتومتری مدل DR-2500 HACH انجام گردیده است. در جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج این اندازه‌گیری

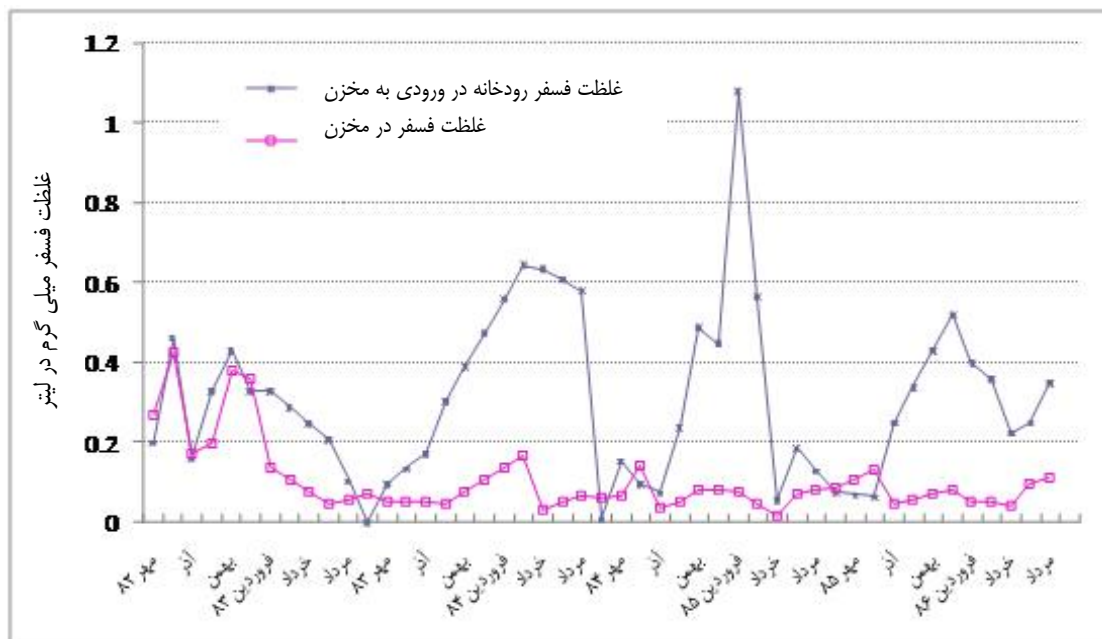
فصل به طور متوسط ۲۱ و در زیرلایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در فصول اختلاط ( پاییز و زمستان) دمای کل مخزن برابر ۵ تا ۱۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده است. (مهندسین مشاور رویان، ۱۳۸۵)

در شکل ۳ نتایج سری زمانی غلظت فسفر در رودخانه در محل ورود به مخزن و در داخل مخزن نشان داده شده است. مطابق شکل غلظت در رودخانه دارای نوسانات زیادی بوده که در برخی ماهها به خصوص ماههای بهمن تا خرداد به دلایل اختلاط مخزن در زمستان و ذوب برف در بهار غلظت فسفر افزایش ناگهانی را نشان می‌دهد. لیکن نوسانات در مخزن بسیار کمتر بوده است که این پدیده به دلیل اثر حجم ذخیره مخزن در رقیق سازی آلاینده‌ها می‌باشد. البته غلظت فسفر در ماههای اولیه مهرماه ۸۲ نسبتا بیشتر از ماههای دیگر بوده که دلیل آن مرگ و میر جلبک در اوایل پاییز ۸۲ همزمان با افت ناگهانی دما و نهایتا انتشار محتوای فسفر موجود در لاشه آنها رخ داده است.

**۲-۲- مدل پویایی سیستم شبیه‌سازی غلظت فسفر**  
مهمترین و اولین گام در مدل‌سازی تعیین سطح پیچیدگی مدل با توجه به هدف مساله، سطح داده‌های موجود، فرآیندهای موثر و فرضیات منطقی اولیه می‌باشد. (Chapra (2003) توصیه می‌کند که مدل‌سازی کیفی آب در قالب یک رویکرد تطبیقی به صورت شروع کار با مدل‌های ساده در مراحل اولیه و تکمیل آن با افزایش سطح پیچیدگی مدل با توجه به گردآوری و دسترسی به داده‌های جدید انجام شود. همچنین یک مدل کیفی مناسب باید دارای ۶ خصوصیت مهم باشد: ۱- سادگی مدل در توصیف سیستم، ۲- شروع آسان مدل با داده‌های موجود و قابلیت تکمیل همراه با افزایش داده‌های در دسترس، ۳- دینامیک بودن مدل جهت لحاظ نمودن ماهیت هیدرولوژیک داده‌ها، ۴- قابلیت در مدل‌سازی پدیده‌های خطی و غیر خطی، ۵- ایجاد سازوکار بازخورد در کنترل فرآیندهای غیر حسی، ۶- بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریتی برای بهبود در فرآیند تصمیم‌گیری که در روش مدل‌سازی پویایی سیستم، کلیه خصوصیات فوق وجود دارد و در نتیجه این رویکرد

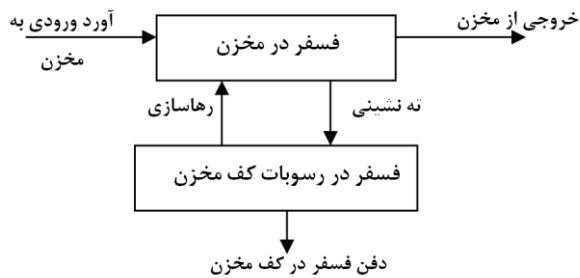
جدول ۲- خلاصه نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب (۸۲-۸۶)

پارامترها	EC μS/cm	pH	دما °C	کدورت (NTU)	فسفات mg/L	نیترات mg/L	آمونیاک mg/L	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	میکروبی MPN/100ml	
											FECAL	TOTAL
متوسط	515	8.3	12.9	31.4	0.12	1.4	0.1	8	2.7	14.9	34.4	68.3
حداکثر	765	8.9	24	73	0.7	5.8	0.805	11	7.8	38	1600	2000
حداقل	410	7.5	2	0.6	0.02	0	0	5	0.04	2	0	0



شکل ۳- تغییرات غلظت فسفر در رودخانه و مخزن

هستند. بر اساس توضیحات فوق در شکل ۴ شماتیک کلی مدل تدوین شده برای مخزن سد نمایش داده شده است. سه فرآیند اصلی در نظر گرفته شده در مدل مذکور شامل ته‌نشینی، رهاسازی و دفن می‌باشد. (Chapra, 1997) فرآیند دفن در رسوبات عملاً به جهت لحاظ کردن بخشی از فسفر در رسوبات می‌باشد که دیگر تحت تاثیر فرایند رهاسازی فرار نگرفته و به مخزن بر نمی‌گردد.



شکل ۴- شماتیک کلی مدل پویای سیستم غلظت فسفر در مخزن سد

پارامتر اصلی شبیه‌سازی با توجه به معادلات تعادل جرمی براساس بار جرمی (جرم فسفر در واحد زمان) تنظیم گردیده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر نقل و انتقالات فسفر با توجه به اجزای شکل ۴ مطابق روابط (۱) و (۲) می‌باشد.

(۱)

$$V_r \frac{dP_r}{dt} = P_{in} Q_{in} - P_r Q_{out} - k_{set} \cdot A_r \cdot P_r + k_{rel} \cdot A_s \cdot P_s \quad (2)$$

$$V_s \frac{dP_s}{dt} = k_{set} \cdot A_r \cdot P_r - k_{rel} \cdot A_s \cdot P_s - k_b \cdot A_s \cdot P_s$$

که در آن پارامترها و واحدهای مربوطه با توجه به انتخاب گام زمانی ماهانه برای شبیه‌سازی به شرح زیر است:

$$Q_{in}, Q_{out} = \text{دبی ورودی و خروجی از مخزن (MCM/month)}$$

$$P_{in} = \text{غلظت فسفر جریان ورودی به مخزن } (\mu\text{g/L})$$

$$P_r = \text{غلظت فسفر در مخزن } (\mu\text{g/L})$$

$$P_s = \text{غلظت فسفر در رسوبات } (\mu\text{g/L})$$

$$V_r = \text{حجم مخزن (MCM)}$$

$$V_s = \text{حجم رسوبات (MCM)}$$

$$k_{set} = \text{نرخ ته‌نشینی فسفر از مخزن به رسوبات (m/month)}$$

$$k_{rel} = \text{نرخ رهاسازی فسفر از رسوبات به مخزن (m/month)}$$

$$A_r = \text{سطح مخزن در ناحیه ته‌نشینی (km}^2\text{)}$$

$$A_s = \text{سطح رسوبات در ناحیه رهاسازی (km}^2\text{)}$$

$$k_b = \text{نرخ دفن فسفر در رسوبات کف مخزن (m/month)}$$

در مدل‌سازی فسفر در مخزن قابلیت بالایی دارد. (Elshorbagy and Ormsbe, 2006)

هدف مدل‌سازی تعیین یک رابطه موثر بین بار ورودی فسفر به عنوان عامل محدودکننده تغذیه‌گرایی مخزن و غلظت آن در مخزن می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌های نمونه‌برداری شده مربوط به سطح مخزن بوده و داده‌های عمقی جز در چند ماه محدود در مخزن سد ستارخان برای دوره‌های شبیه‌سازی موجود نبوده است، علیرغم وجود لایه‌بندی حرارتی، فرض مدل‌سازی بر وجود شرایط اختلاط کامل در مخزن بوده است. نهایتاً در مدل تدوین شده نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر مخزن براساس داده‌های موجود واسنجی و صحت‌سنجی می‌گردد.

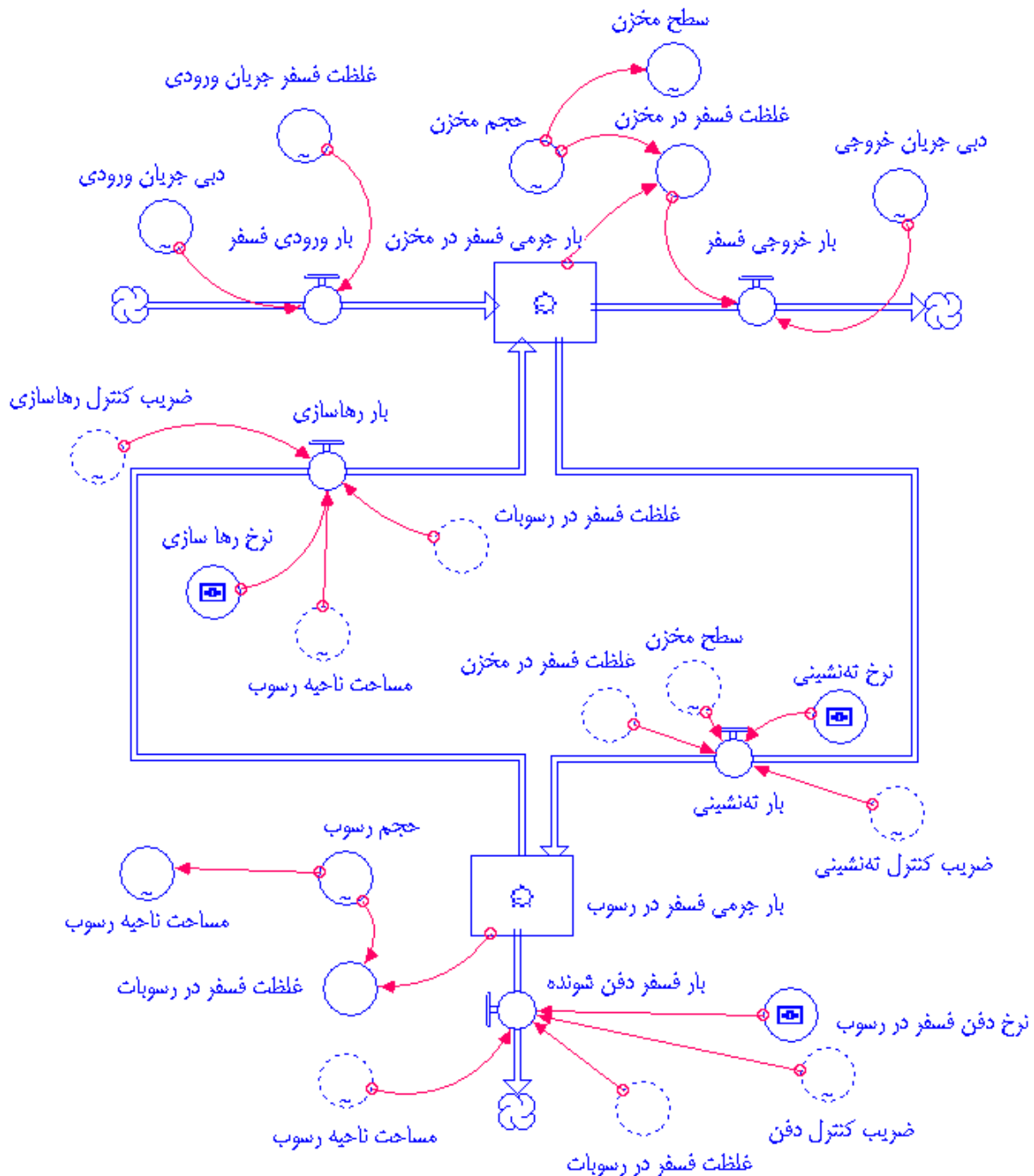
فرآیندهای تاثیرگذار در تعادل غلظت فسفر در مخزن شامل فرآیندهای ته‌نشینی و رهاسازی از رسوبات به مخزن می‌باشد. سازوکارهای تاثیرگذار در ته‌نشینی فسفر در مخزن عبارتند از: (Wetzel, 2001)

- ته‌نشینی فسفر همراه با رسوبات ورودی به مخزن
  - رسوبزایی یا جذب فسفر با ترکیبات غیرآلی نظیر آهن و منگنز
  - جذب توسط ذرات رس و ته‌نشینی فسفر به وسیله مواد آلی
  - ته‌نشینی در اثر فرآیندهای جذب بیولوژیک توسط جلبکها و ماکروفتیها
- عوامل موثر در رهاسازی فسفر از رسوبات کف نیز شامل موارد زیر می‌باشند: (Wetzel, 2001)
- فرآیندهای پخش و جابجایی تحت اثر به هم‌زدگی رسوبات توسط آبزیان و بتوزها
  - فرآیندهای پخش و جابجایی تحت اثر جریانهای سیال در لایه زیرین که تحت اثرات القایی باد یا اختلاط عمقی در شرایط واژگونی لایه‌بندی حرارتی مخزن و یا مومنتوم جریان ورودی می‌باشند.
  - رهاسازی ناشی از فرآیندهای اکسیداسیون و احیا در سطح مشترک آب- رسوب، در این حالت به دلیل ایجاد شرایط بی‌هوازی در لایه پایینی علاوه بر احیا سولفات و نترات، فسفات از طریق تجزیه مواد آلی به حالت محلول درآمده و به محیط آبی برمی‌گردد.
  - تبدیل مواد آلی به معدنی، جذب و فرآیندهای مربوط به موجودات زنده در ستون آب
  - جذب و ته‌نشینی و تبدیل به مواد معدنی در رسوبات
- در هر مخزن بسته به شرایط اقلیمی، هیدرولیکی و اکولوژیکی آن، یک یا چند مورد از سازوکارهای فوق در فرآیندهای مذکور حاکم

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۵ مدل تدوین شده در محیط نرم‌افزار STELLA نشان داده شده است. مطابق شکل، مخزن و رسوب به عنوان انباره و جریانهای ورودی و خروجی مرتبط با هر یک از انباره‌ها به صورت خط جریان در نظر گرفته شده است. ضرایب ته‌نشینی و رهاسازی و دفن که ضرایب اصلی در واسنجی مدل به شمار می‌روند به صورت مبدل در مدل موجود می‌باشند.

دوره شبیه‌سازی با توجه به داده‌های موجود از برنامه پایش کیفی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی از مهرماه ۸۲ تا شهریور ۸۶ (۴۷ ماه) در نظر گرفته شده است. داده‌های بهره‌برداری مخزن در مقیاس ماهانه شامل دبی جریان خروجی و حجم مخزن در بازه زمانی این تحقیق از سایت سدهای ایران وزارت نیرو ([www.Irandams.com](http://www.Irandams.com)) اخذ شده است.



شکل ۵- مدل پویایی تغییرات فسفر در مخزن سد

### ۳-۱- تحلیل حساسیت مدل

جهت تحلیل رفتار مدل و تعیین میزان و نحوه تاثیر پارامترها در نتایج مدل، تحلیل حساسیت مدل انجام گردیده است. در این راستا در هر اجرای مدل تاثیر نوسانات هر پارامتر بدون تغییر دیگر پارامترها بررسی می‌شود. برای هر پارامتر تغییرات خروجی در نقاط مختلف محاسبه شده و متوسط این تغییرات به عنوان فاکتور حساسیت مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور تعیین موثرترین پارامترهای مدل ضریب حساسیت نسبی بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود. (Shirmohammadi et al., 2006)

$$F_{sa} = \frac{\partial O}{\partial P} \times \frac{P}{O} \quad (3)$$

که در آن  $O$  خروجی مدل و  $P$  پارامتر ورودی تحت بررسی می‌باشد. طبق رابطه ۳ ضریب حساسیت  $F_{sa}$  بی‌بعد بوده و قابل مقایسه برای همه پارامترها می‌باشد. تحلیل حساسیت علاوه بر نشان دادن عدم قطعیت مدل، موجب تسهیل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل می‌گردد.

در جدول ۳ نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داده شده‌اند. مقادیر ضریب حساسیت نشان‌دهنده آن است که ضرایب ته‌نشینی و رهاسازی بیشترین تاثیر را بر روی غلظت فسفر در مخزن دارند. علامت منفی ضریب حساسیت به معنای اثر معکوس تغییرات ضریب بر خروجی مدل است که اثر نرخ ته‌نشینی و دفن به این صورت می‌باشد.

لازم به ذکر است حدود مقادیر ضرایب ته‌نشینی و رهاسازی در هر مخزن متناسب با نوع مکانیزم حاکم بر فرآیند که در بخش قبلی توضیح داده شد، می‌باشد. به عنوان مثال وجود شرایط اختلاط مخزن موجب ایجاد دینامیک بیشتر در رهاسازی و ته‌نشینی می‌گردد. همچنین در شرایط بی‌هوازی کف که فرآیند رهاسازی به

دلیل عمل احیا شدیدتر می‌شود. در مطالعات گذشته محدوده این ضرایب در شرایط آزمایشگاهی و میدانی تعیین گردیده است. Thomann and Mueller (1978) محدوده ضریب ته‌نشینی را بین  $0.4 - 1/7$  متر در ماه ذکر می‌کند در حالیکه در مطالعات دیگر این محدوده کمتر از  $0.1$  و بیشتر از  $15$  نیز مشاهده شده است (Chapra, 1997) به طور کلی نرخ رهاسازی مواد مغذی از رسوب به شدت وابسته به محل بوده و با کالیبراسیون مواد مغذی تعیین می‌شود. (ترابیان و هاشمی، ۱۳۸۱) بنابراین در جدول ۳ دامنه تغییرات پارامترها با توجه به سعی و خطای اولیه انجام شده و نزدیکی متوسط مقادیر خروجی مدل و داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

### ۳-۲- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

یکی از مهمترین مراحل در فرآیند مدل‌سازی کیفی آب، واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی می‌باشد. در صورت عدم انطباق مناسب مدل مفهومی با رفتار داده‌ها، واسنجی مدل نمی‌تواند نتایج رضایت بخشی داشته باشد. بنابراین درک عمیق از رفتار سیستم و مطالعه دقیق تغییرات داده‌های مشاهداتی قبل از واسنجی می‌تواند به نتایج مطلوب‌تری در واسنجی و صحت‌سنجی مدل منجر شود. به این منظور با بررسی تغییرات ماهانه فسفر در مخزن و مقدار آن در ورودی و خروجی در طول ماههای مشاهداتی مشخص گردید پدیده‌های رهاسازی و ته‌نشینی که بیشترین تاثیر بر غلظت فسفر در مخزن را دارند، در ماههای مختلف سال تغییرات قابل توجهی دارند. به عبارت دیگر روند افزایشی بار جرمی فسفر در مخزن نشان‌دهنده حاکم بودن پدیده رهاسازی در آن ماه و کاهش بار فسفر در مخزن نشان‌دهنده حاکم بودن پدیده ته‌نشینی در مخزن می‌باشد. بنابراین در مدل پویایی سیستم تدوین شده (شکل ۵) از دو مبدل به عنوان کنترل ضرایب ته‌نشینی و رهاسازی استفاده گردید که برای ضرایب متغیر ۱۲ ماهه در مدل به کار می‌رود.

جدول ۳- ضریب حساسیت متوسط غلظت فسفر در مخزن نسبت به پارامترهای مدل

ردیف	پارامتر	علامت اختصاری	واحد	دامنه تغییرات	$S_r$
۱	بار اولیه فسفر مخزن	$P_{res}$	تن	5-50	0.173
۲	بار اولیه فسفر در رسوبات	$P_{sed}$	تن	50-200	0.146
۳	نرخ ته‌نشینی	$K_{set}$	متر در ماه	1-15	-0.486
۴	نرخ رهاسازی	$K_{rel}$	متر در ماه	0.1-2	0.407
۵	نرخ دفن در رسوبات	$K_b$	متر در ماه	0.1-2	-0.354



این ضرایب پس از واسنجی مدل مشخص می‌شود و وضعیت حاکم بودن فرآیند ته‌نشینی یا رهاسازی و شدت آنها را در هر ماه سال در مخزن مشخص می‌نمایند. با استفاده از این راهکار وضعیت تطابق داده‌های مشاهداتی و محاسباتی به صورت قابل توجهی بهبود یافت و نتایج مدل را به مقدار زیادی تقویت نمود.

با توجه به بازه داده‌های مشاهداتی موجود، از داده‌های مهر ۸۲ تا مرداد ۸۵ (۳۵ ماه) برای واسنجی و از شهریور ۸۵ تا مرداد ۸۶ (۱۲ ماه) برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. معیارهای مورد استفاده، برای سنجش میزان مطابقت داده‌های مشاهداتی ( $C_o$ ) و محاسباتی ( $C_m$ )، مقدار مجموع مربعات خطا ( $S_r$ )، خطای استاندارد  $S_e$  داده‌ها (روابط ۳ و ۴) و معیار Nash - Sutcliffe (رابطه ۵) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. (Nash and Sutcliffe, 1970)

$$MSE = S_r = \sum (C_m - C_o)^2 \quad (۳)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{S_r}{n-1}} \quad (۴)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum (C_m - C_o)^2}{\sum (C_o - C_{o,avg})^2} \quad (۵)$$

در روابط فوق  $S_r$  مجموع مربعات خطاها و  $S_e$  مقدار خطای استاندارد داده‌ها و  $E_{ns}$  ضریب Nash - Sutcliffe و  $C_{o,avg}$  مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی است. برای یک مدل مدیریتی خطای استاندارد کمتر از ۰/۲ قابل قبول می‌باشد. (Ruley and Rusch, 2004) همچنین  $E_{ns}$  ضریب Nash - Sutcliffe مقداری از ۱ کمتر بوده و هر چه به عدد یک نزدیک باشد، مطابقت داده‌های محاسباتی و مشاهداتی بیشتر است.

در شکل ۶ تغییرات غلظت فسفر در مخزن به تفکیک دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده‌اند. مطابق جدول ۴ مقادیر نزدیک به عدد یک برای ضریب Nash - Sutcliffe  $E_{ns}$  و ضریب همبستگی داده‌ها ( $r^2$ ) و همچنین مقدار کم خطای استاندارد برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان‌دهنده تطابق بالای خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. این مساله حاکی از اطمینان بالای مدل تدوین شده به عنوان ابزار مدیریتی برای پیش‌بینی و بررسی اقدامات مدیریتی در کاهش و بهبود اثرات تغذیه‌گرایی مخزن می‌باشد. مطابق شکل ۶ اثر بار اولیه فسفر در مخزن پس از چند ماه کاهش یافته و نوسانات مخزن در ماه‌های بعدی شرایط عادی را دارند.

در جدول ۵ ضرایب نهایی پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل و در جدول ۶ ضرایب متغیر ۱۲ ماهه برای ته‌نشینی و رهاسازی و دفن در مخزن نشان داده شده است. این مقادیر پس از سعی و خطای زیاد و بررسی نحوه تغییرات مقادیر مشاهداتی در ماه‌های مختلف با توجه به رفتار مدل به دست آمده است. جهت اطمینان از نتایج به دست آمده با تغییر دوره‌های صحت‌سنجی و واسنجی مقادیر ضرایب Nash - Sutcliffe، همبستگی و خطای استاندارد مجدداً محاسبه گردید و نتایج آن با مقادیر جدول ۴ تفاوت قابل توجهی را نشان نداد.

ضرایب به دست آمده در جدول ۶ نشان‌دهنده آن است که در ماه‌های تابستان فرآیند رهاسازی در افزایش غلظت فسفر مخزن نقش ویژه‌ای را ایفا می‌نماید. در ماه‌های بهمن و اسفند فعالیت فرآیندهای ته‌نشینی و رهاسازی و دفن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. فرآیند دفن فسفر در رسوبات نیز در ماه‌های بهار حاکم است.

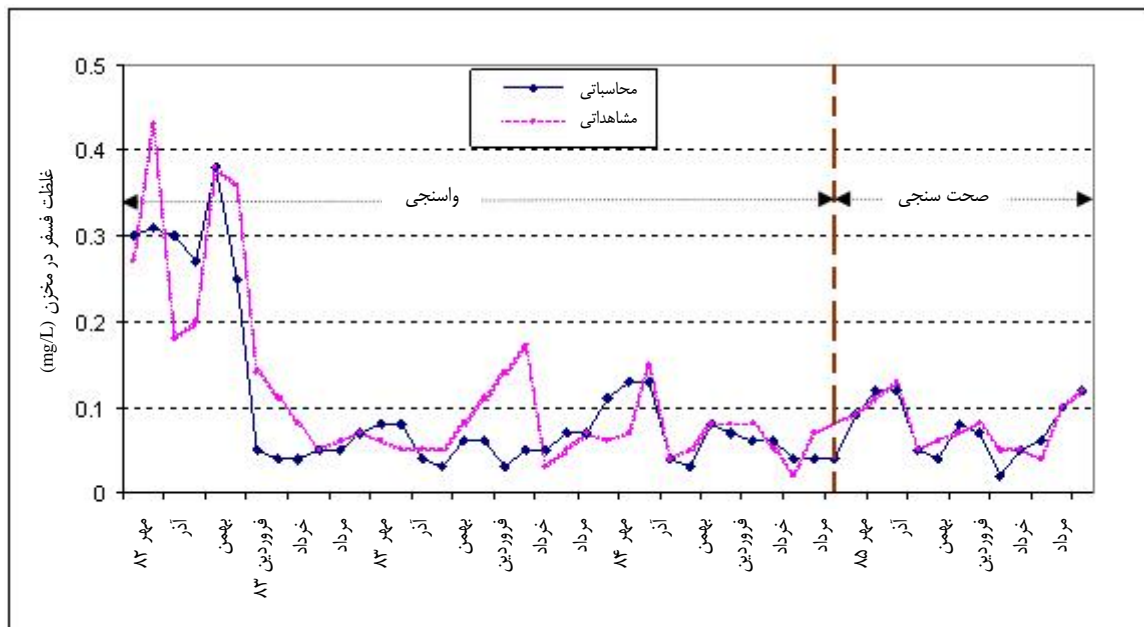
حاکم بودن فرآیند رهاسازی در تابستان با توجه به بروز لایه بندی در این فصل و ایجاد شرایط بی‌هوازی در لایه نزدیک به کف که موجب تشدید فرآیند احیا و رهاسازی فسفر از رسوبات می‌گردد، قابل توجیه است. در فصل زمستان نیز به دلیل ایجاد شرایط اختلاط و واژگونی، تبادلات بین لایه‌های بالایی و زیرین مخزن بیشتر بوده و مخزن حالت دینامیک بیشتری در رهاسازی و ته‌نشینی مواد از خود نشان می‌دهد. به همین دلیل اثر این فرآیند از طریق افزایش ضرایب مربوطه تشدید گردیده است.

### ۳-۳- تحلیل نسبت بار جرمی اجزاء مختلف ورودی و خروجی فسفر

تحلیل سهم هر یک از اجزاء مدل که به عنوان چشمه و چاه در بخش‌های مختلف مدل پویایی سیستم به کار رفته است در برنامه‌های بهبود و اصلاح کیفیت آب مخزن بسیار اهمیت دارد. چرا که میزان تاثیرگذاری هر یک از راهکارها با توجه به سهم آنها در کاهش غلظت فسفر در مخزن مشخص می‌گردد. اجزا موثر در تعادل غلظت فسفر در مخزن مطابق مدل تدوین شده شامل بار فسفر در مخزن و رسوبات، بار فسفر در ورودی و خروجی و مقدار فسفر ته‌نشین شده و یا رهاسازی شده به همراه دفن در رسوبات می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر بار متوسط سالانه فسفر در بخش‌های مختلف براساس داده‌های ۴۷ ماهه خروجی مدل ارائه شده و نسبت سهم هر یک از آنها نسبت به مجموع کل بار فسفر مورد محاسبه قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین سهم بار فسفر مربوط به رسوبات (۴۲٪) است و کمترین مقدار فسفر در خروجی از مخزن

قابل ملاحظه‌ای نسبت به فرآیند رهاسازی (۶٪) به ترتیب بیشترین اهمیت را در تعادل غلظت فسفر در مخزن دارند.

ملاحظه می‌شود. همچنین از لحاظ میزان اهمیت نسبی بین فرآیندهای ته‌نشینی، رهاسازی و دفن، مقایسه اعداد جدول ۵ نشان می‌دهد که فرآیندهای دفن (۱۴٪) و ته‌نشینی (۱۳٪) با اختلاف



شکل ۶- نتایج غلظت‌های مشاهداتی و محاسباتی شبیه‌سازی شده فسفر مخزن

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی و خطای استاندارد داده‌های محاسباتی

$r^2$	$MSE(S_r)$	$S_e$	$E_{ns}$	تعداد داده‌ها	
0.85	0.104	0.054	0.7	35	واستجی
0.86	0.0034	0.017	0.67	12	صحت‌سنجی

جدول ۵- پارامترهای وااستجی شده در مدل شبیه‌سازی فسفر در مخزن

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	بار اولیه فسفر مخزن	تن	۲۷
۲	بار اولیه فسفر در رسوبات	تن	۱۳۰
۳	نرخ ته‌نشینی	متر در ماه	۱۲/۴
۴	نرخ رهاسازی	متر در ماه	۰/۳۸
۵	نرخ دفن در رسوبات	متر در ماه	۰/۸

جدول ۶- ضرایب متغیر زمانی ته‌نشینی، رهاسازی و دفن ۱۲ ماهه

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ته‌نشینی	۱	۱	۰	۱	۴	۳	۱	۰	۰	۰	۰	۰
رها سازی	۱	۱	۰/۴	۱	۴	۴	۰	۰	۰	۳	۰	۰
دفن	۱	۱	۰	۰	۶	۶	۱	۱	۱	۰	۰	۰

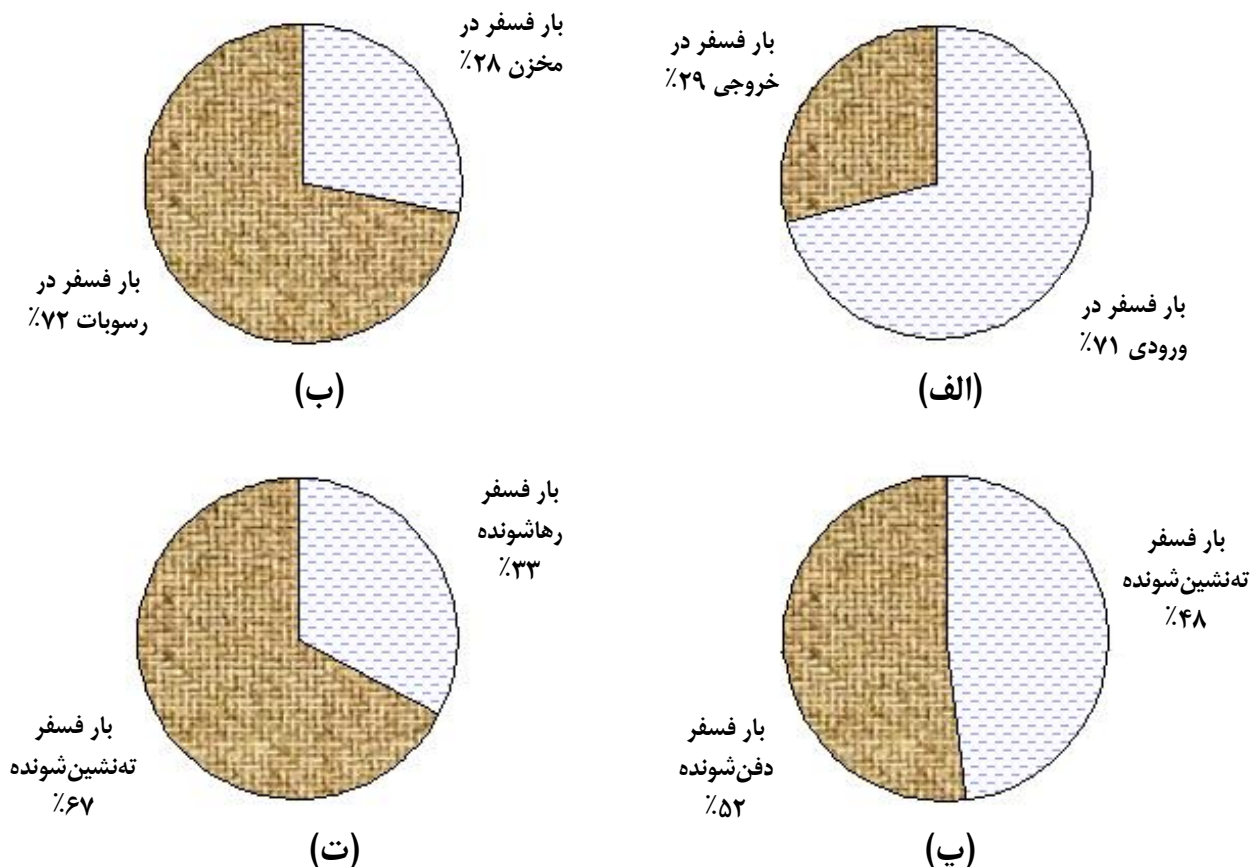
جدول ۷- متوسط بار فسفر سالانه در بخش‌های مدل و سهم هر یک

بار فسفر	مقدار متوسط (تن در سال)	درصد سهم
مخزن	55.9	16%
رسوبات	143.4	42%
ورودی	21.2	6%
خروجی	8.8	3%
دفن شونده	47.2	14%
رها شونده	21.2	6%
ته نشین شونده	43.4	13%
مجموع	340.9	100%

جوان بودن عمر مخزن سد (در حدود ۱۱ سال)، ظرفیت آن را برای انباشت و ته‌نشینی رسوبات حاوی فسفر نشان می‌دهد. این مساله در برخی سدهای با سن بالا به صورت معکوس می‌باشد و به دلیل اشباع ظرفیت ته‌نشینی مخزن سد فسفر خروجی از ورودی بیشتر است. مطابق شکل ۷-ب میزان بار فسفر در رسوبات ۷۱٪ در مقابل ۲۹ درصد برای مخزن سد است که این مساله اهمیت توجه به رسوبات را در مدیریت تغذیه‌گرایی مخزن بیش از پیش نشان می‌دهد. در شکل ۷-پ مقادیر فسفر ته‌نشین شونده و دفن شونده تقریباً مساوی بوده و اهمیت آنها در کاهش بار فسفر مخزن تقریباً یکسان می‌باشد و شکل ۷-ت بار ته‌نشینی فسفر را دو برابر رهاسازی نشان می‌دهد.

به توجه به موارد فوق در مجموع می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که مدیریت بار رسوبات در مخزن و همچنین کنترل رسوبات ورودی به مخزن از حوضه آبریز در کنترل و بهبود کیفیت آب مخزن در اولویت اول قرار دارد.

در شکل ۷ نیز این نسبت‌ها دو به دو به صورت نمودارهای دایره‌ای نشان داده شده است. در شکل ۷-الف بار فسفر ورودی به مخزن بیش از دو برابر مقدار خروجی از مخزن است. این مساله با توجه به



### ۳-۴- بررسی اثر سناریوهای مختلف بار ورودی به مخزن

بررسی سناریوهای مدیریتی یکی از نقاط قوت مدل تدوین شده بوده و به عنوان ابزاری جهت سیاستگذاری در مدیریت کیفیت آب مخزن استفاده می‌شود. بر این اساس با توجه به نوسانات بار ورودی به مخزن ۲ سناریوی افزایش بار ورودی شامل ۱/۵ و ۲ برابر بار اولیه و ۲ سناریوی کاهش به میزان ۰/۵ و ۰/۳ بار اولیه در مدل وارد شده و اثر آن بر متوسط غلظت فسفر در مخزن بررسی گردیده است. مطابق جدول ۸ با افزایش ۱/۵ و ۲ برابر بار ورودی به ترتیب ۲۴ و ۳۸ درصد غلظت متوسط مخزن افزایش می‌یابد و با کاهش بار ورودی به مقدار ۰/۵ و ۰/۳ مقدار اولیه، مقادیر غلظت به ترتیب ۳۱ و ۴۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

همانگونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، اثر تغییر بار ورودی به مخزن با درصد کمتری بر روی غلظت تاثیر دارد که بیانگر این واقعیت است که جهت بهبود شرایط تغذیه‌گرایی مخزن به ازای کاهش مقدار معینی از غلظت فسفر در مخزن، میزان کاهش بار ورودی بیشتر بوده و طبعاً هزینه‌های بیشتری جهت کاهش این بار از طریق مدیریت حوزه آبریز، احداث تصفیه‌خانه‌های پیشرفته، اصلاح الگوی کشت و دامپروری در سطح حوزه لازم خواهد بود.

نتایج این سناریوها برای غلظت فسفر در ماههای مختلف در نمودارهای شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل در ماههای اولیه به دلیل حاکم بودن اثر شرایط اولیه بار مخزن، سناریوی تغییر بار ورودی اثر کمتری در تغییر غلظتها را نشان می‌دهد. بیشترین اثر تغییر بار ورودی در ماههای پاییز (مهر تا آذر) که همزمان مخزن در شرایط بار پیک قرار دارد مشخص شده است. به طور کلی می‌توان این طور نتیجه‌گیری نمود که کاهش و افزایش بار ورودی به غیر از ماههای اولیه، تقریباً اثر یکنواختی بر غلظت مخزن برای ماههای مختلف دارد.

نکته قابل توجه در رابطه با نتایج به دست آمده آن است که پاسخ کاهش غلظت فسفر در مخزن به کاهش بار ورودی سریع بوده، لیکن عمل احیا مخزن مغذی ممکن است سالها به طول بیانجامد. این اثر تاخیری اقدامات احیا به دلیل زمان ماند مخزن (۱۰ ماه) و تاخیری که در شبکه زنجیره غذایی بین مواد مغذی، فیتوپلانکتون و زوپلانکتون در مخزن وجود دارد، رخ می‌دهد. به عنوان نمونه در مخزن دریچه Constance در آلمان کاهش تولید فیتوپلانکتون پس از کاهش غلظت فسفر دریچه با یک تاخیر ۱۰-۱۵ سال انجام گردید که این زمان با توجه به زمان ماند ۴ سال منطقی می‌باشد.

(Klapper H., 2003) در عین حال جلبکها غالبا قادر به تامین اثر کمبود فسفر از منابع داخلی نظیر رسوبات و نیز فسفر موجود در لاشه جلبکهای مرده می‌باشد.

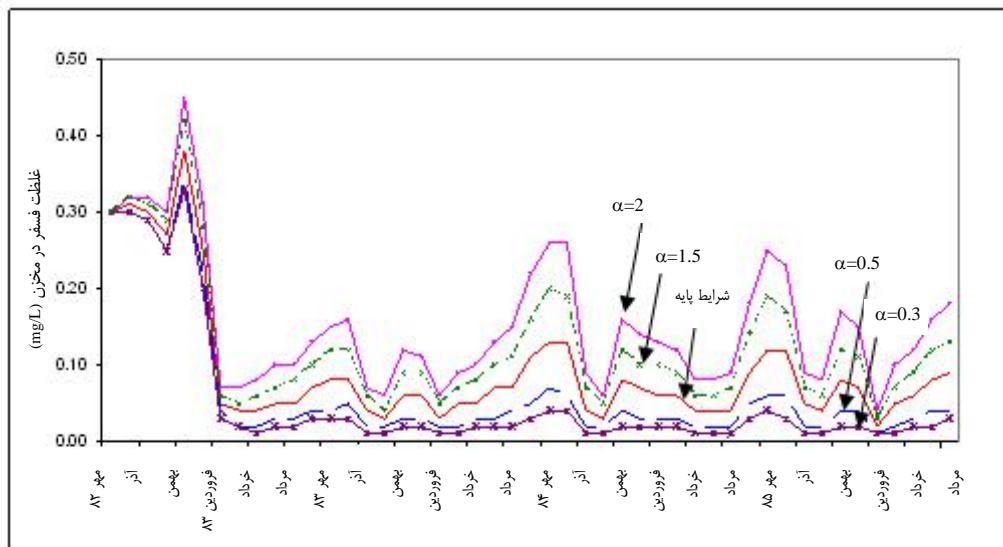
جدول ۸- اثر تغییرات بار فسفر ورودی به مخزن

سناریو	ضریب بار ورودی به مخزن ( $\alpha$ )	متوسط غلظت فسفر در مخزن (mg/L)	متوسط تغییر در غلظت فسفر مخزن
۱	(شرایط موجود) ۱	۰/۰۹۴	%۰
۲	۱/۵	۰/۱۲	%۲۴
۳	۲	۰/۱۵۲	%۳۸
۴	۰/۵	۰/۰۶۵	-%۳۱
۵	۰/۳	۰/۰۵۳	-%۴۴

### ۴- نتیجه‌گیری

روش پویایی سیستم، روشی در شبیه‌سازی سیستمی پدیده‌ها می‌باشد که با تکیه بر سادگی و ایجاد امکان درگیر کردن تصمیم‌گیران در فرآیند مدل‌سازی جهت مقایسه سناریوهای مختلف ابزار مفیدی در مدیریت کیفی منابع آب به شمار می‌رود. در این مقاله با تکیه بر دیدگاه سیستمی، مدل پویایی سیستم با استفاده از نرم افزار Stella برای شبیه‌سازی غلظت فسفر در مخزن سد ستارخان واقع در آذربایجان شرقی تدوین گردیده است. در این مدل به دلیل نبود داده‌های نمونه‌برداری عمقی، مخزن به صورت اختلاط کامل فرض شده و فرآیندهای ته‌نشینی و رهاسازی بین فسفر مخزن و رسوبات به همراه دفن فسفر در رسوبات به عنوان فرآیندهای اصلی در تعیین غلظت تعادل فسفر در مخزن در نظر گرفته شده است.

جهت انجام واسنجی و صحت‌سنجی داده‌ها با استفاده از ضرایب متغیر ماهانه برای ته‌نشینی، رهاسازی و دفن، ضرایب Nash - Sutcliff و خطای استاندارد و همبستگی مقادیر قابل قبولی را نشان دادند که بر اطمینان بالای نتایج خروجی علی‌رغم سادگی مدل و در نظر نگرفتن اثر لایه‌بندی حرارتی در شبیه‌سازی فسفر دلالت دارد. بررسی نسبت سهم اجزای موثر در غلظت فسفر مخزن نشان‌دهنده اهمیت بالای بخش رسوبات در تعادل غلظت فسفر در مخزن می‌باشد. مقایسه نسبی فرآیندهای موثر در مدل نشان داد فرآیندهای ته‌نشینی و دفن نسبت به فرآیند رهاسازی سهم بالاتری در تعیین مقادیر غلظت فسفر را دارند.



شکل ۸- اثر سناریوهای تغییر بار ورودی بر غلظت فسفر مخزن

### ۶- مراجع

ارحامی، م.، تجریشی، م.، ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۱)، مطالعات شبیه‌سازی تغییرات کیفی آب مخزن سد لتیان، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۴۴

افشار، ع.، سعادت‌پور، م. (۱۳۸۸)، تغذیه‌گرایی مخازن سدها: مدل‌سازی دوبعدی مخزن کرخه، فصلنامه آب و فاضلاب اصفهان، شماره ۷۱

ترابیان، ع. و هاشمی، س.ح. (۱۳۸۱)، «مدل‌سازی کیفی آب‌های سطحی، ضرایب، ثوابت، سینتیکها و فرمول‌ها»، انتشارات دانشگاه تهران، (ترجمه).

سارنگ، ا.، تجریشی، م. و ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۰)، شبیه‌سازی کیفی مخزن سد بوکان، فصلنامه آب و فاضلاب اصفهان، شماره ۳۷

سمایی، م.ر.، افشار، ع.، غروی، م. (۱۳۸۳)، مدل‌سازی فیتوپلانکتون ژئوپلانکتون در مخازن با روش پویایی سیستم، فصلنامه آب و فاضلاب، شماره ۵۲

عیسی‌زاده س.، تجریشی، م.، ابریشم‌چی، ا. و احمدی، م. (۱۳۸۴)، کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی فسفر در مخزن سد لتیان، فصلنامه آب و فاضلاب، شماره ۵۴

مهندسین مشاور رویان، (۱۳۸۵)، مطالعات ارزیابی کیفیت آب سد ستارخان، شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل

Chapra, S. (1997), Surface Water Quality Modeling, Mc-Graw Hill Int.

همچنین نتیجه بررسی اثر سناریوهای مختلف تغییر بار فسفر ورودی به مخزن نیز حاکی از آن است که مخزن سد به دلیل اثر حجم ذخیره آن، به نسبت کمتری در کاهش یا افزایش غلظت فسفر مخزن تأثیر می‌پذیرد. در مجموع مدل تدوین شده با توجه به نتایج به دست آمده قابلیت پیش‌بینی و بررسی شرایط اضطراری و نیز اثر سیاست‌گذاری‌ها در حوضه آبریز که منجر به تغییر بار فسفر ورودی به مخزن می‌شود را دارد و به عنوان ابزار توانمندی در مدیریت کیفی حوضه آبریز و مخزن سد ستارخان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

### ۵- قدردانی و تشکر

این مقاله در قالب بخشی از طرح "مطالعات بهنگام‌سازی منابع و مصارف آب و مدیریت خشکسالی در حوزه آبریز اهرچای" در دانشگاه تهران انجام گردیده است. در این راستا از همکاری مدیران و کارشناسان ارشد شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از آقای مهندس حامد توکلی‌فر جهت کمک در انجام بخشی از عملیات مدل‌سازی تشکر می‌گردد.

### پی‌نوشت‌ها

- 1-Total Maximum Daily Load
- 2-Feedback
- 3-Stock
- 4-Flow
- 5-Convertor
- 6-Connectors

- Ruley, J.E., Rusch, K.A., (2004), Development of a simplified phosphorus management model for a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake, *Ecological Engineering* Vol.22, pp. 77–98
- Shirmohammadi, A., Chaubey, I., Harmel, R., Bosch, D., Muñoz-Carpena, R., Dharmasri, D., Sexton, A., Arabi, M., Wolfe, M., Frankenberger, J., Graff, C., Sohrabi, t., (2006). Uncertainty In TMDL Models. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* Vol. 49(4): pp.1033–1049
- Thomann R V.,Mueller J.A., (1987), *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row, New York
- Vežjak M., Savsek T., Stuhler E.A., (1998), System dynamics of eutrophication processes in lakes, *European Journal of Operational Research* 109, pp. 442-451
- Wetzel Robert G, (2001), *Limnology of Lake and River Ecosystem*, Academic Press
- Chapra, S.C., (2003). Engineering water quality models and TMDLs. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129, 247e256
- Depinto J., Freedman P., Dilks D., Larson W., (2004), Models Quantify The Total Maximum Daily Load Process, *Journal of Environmental Engineering, ASCE* ,Vol. 130, No. 6
- Elshorbagy A., Ormsbee L, (2006), Object-oriented modeling approach to surface water quality management, *Environmental Modelling & Software* 21, pp.689-698,
- Ford, (1999), A., Modeling the environment. An introduction to system dynamics modeling of environmental systems. Island press, Washington, DC.
- Klapper H., (2003), Technologies for lake restoration, *Journal of Limnol.*, 62(Suppl. 1): pp.73-90, 2003
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 , pp. 282–290.