

مدلسازی اوتریفیکاسیون در مخازن با رویکرد پویایی سیستم

محمد رضا سمائی^۱، عباس افشار^۲، محمدامین احمدی برگانی^۳، رضا اسدی^۴

۱- دانشگاه علوم پزشکی شیراز، دانشکده بهداشت و تغذیه، گروه مهندسی بهداشت محیط mrsamaei@yahoo.com

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه مهندسی بهداشت محیط

۳- دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی آب و محیط زیست

۴- شرکت آب و فاضلاب روستایی استان فارس

چکیده

با افزایش اوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) دریاچه‌ها و مخازن در سراسر جهان، نیاز به مدلسازی پیش‌بینانه کیفیت آب افزایش بسیاری یافته است. فسفر و ازت حاصل از فعالیتهای شهری و کشاورزی امروزه به عنوان عوامل اصلی تغذیه‌گرایی، شناخته می‌شوند. پویایی سیستم روشی برای حل مسائل با کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای است. هدف معمول پژوهش با این روش، درک چگونگی و چرایی پویایی مسائل و جستجوی سیاستهای مدیریتی برای بهبود این وضعیت می‌باشد. در این مقاله چند متغیر مهم تغذیه‌گرایی مانند فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون، نیترات، آمونیاک، فسفر و کربن با روش پویایی سیستم و با استفاده از نرم‌افزار ونسیم مدلسازی شده است. مدل ساخته شده دارای ۱۶ متغیر حالت می‌باشد. این مدل قابلیت‌های گوناگونی از جمله شبیه‌سازی متغیرهای کیفی آب در رولایه (اپیلیمنیون) و زیرلایه (هیپولیمنیون) را دارد. داده‌های مورد نیاز مدل شامل حجم اولیه مخزن، مقادیر جریانهای ورودی و خروجی از مخزن، مقادیر اولیه آمونیاک، نیترات، فسفات، کربن محلول، کربن ذره‌ای، جلبک، زئوپلانکتون گیاهخوار و زئوپلانکتون گوشتخوار و دما در مخزن و مقادیر این پارامترها در جریانهای ورودی در کل زمان شبیه‌سازی می‌باشد. برای بررسی مدل از داده‌های مخزن لانگ‌لیک آمریکا استفاده شده است. از داده‌های سال ۱۹۹۱ جهت مدلسازی و از داده‌های سال ۲۰۰۰ جهت صحت‌سنجی یا تأیید مدل استفاده شده است. پس از صحت‌سنجی مشخص شد که مدل تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. عامل محدودکننده رشد جلبکی نیز فسفر شناخته شد. از این مدل می‌توان برای موارد مشابه در کشور استفاده کرد، چون علاوه بر سادگی و کمی داده‌های ورودی، برآوردی کلی از وضعیت مخزن ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تغذیه‌گرایی، پویایی سیستم، موادمغذی، مدلسازی، لانگ‌لیک

Eutrophication modeling in reservoirs with System Dynamics approach

Samaei, M.R.^{1,2}, (M.Sc.), Afshar, A.³, (Prof.), Ahmadi Bargani, A.⁴

1- Shiraz university of medical science, Faculty of Health, Department Of Environmental Health Engineering

2- Tarbiat Modares university, Faculty of Medical Science, Department Of Environmental Health Engineering

3- Iran University of Science and Technology, Civil engineering college, Department of Water and Environmental Engineering

4- Fars Rural Water and Wastewater Co., Iran

Abstract

The need for predictive water quality modeling has arisen largely as a result of increased eutrophication of lakes and reservoirs throughout the world. A variety of formulations have been developed to represent the effect of temperature, light, and nutrient on phytoplankton growth. Phosphorus and nitrogen due to agricultural and municipal activities has been identified as major agent of eutrophication. Eutrophication of lakes is a complex process. Therefore computer models are very important tools to describe this process. System dynamics is a method of solving problems by computer simulation. The typical purpose of a system dynamics study is to understand how and why the dynamics of concern are generated and to search for managerial policies to improve the situation. In this paper several important variant on eutrophication such as phytoplankton, zooplankton, phosphate, nitrate, ammonia and carbon were simulated with System Dynamics approach and VenSim model. The final model is consisting of 16 stocks. This eutrophication model has a variety of capabilities such as simulation of water quality constituent in epilimnion and hypolimnion. Input data are initial volume of reservoir, inflow and outflow, ammonia, nitrate, phosphate, dissolved and particulate carbon, carnivorous and herbivorous zooplankton and temperature in reservoir and in influent. In this paper we have used Long Lake Reservoir data for modeling (1991 for modeling and 2000 for validation). After validation, we found that model had a good corresponding with field data.

Keywords: Eutrophication, System Dynamics, Nutrients, Modeling, Long Lake

مقدمه

مخازن سامانه‌های اکولوژیکی پیچیده و پویایی هستند که با فعالیتهای بشری در تعامل هستند [۱]. اگر چه مواد مغذی برای گیاهان و جانوران حیاتی هستند، اما غلظت زیاد آنها می‌تواند کیفیت آب و خاک را کاهش دهد. دو ماده مغذی فسفر و نیتروژن می‌توانند موجب اوتریفیکاسیون در برکه‌ها و دریاچه‌ها شوند [۲]. اوتریفیکاسیون یا تغذیه‌گرایی پدیده‌ای است که در پیکره‌های آبی دریافت‌کننده‌ی میزان زیادی مواد مغذی مشاهده می‌شود. این پدیده و به دنبال آن افزایش غلظت فیتوپلانکتونها می‌تواند کیفیت آب را تحت تاثیر قرار دهد [۳]. مشخصه این پدیده شکوفایی جلبکهای سبز یا سبزی و تغییرات شدید اکسیژن محلول می‌باشد و معمولاً محیط آب را برای زندگی ماهیها و زئوپلانکتونها تحمل‌ناپذیر می‌کند. دانشمندان بر این باورند که اوتریفیکاسیون می‌تواند ترکیب گونه‌های یک زیستگاه را دگرگون کند [۴].

امروزه تغذیه‌گرایی آبهای شیرین مشکل سراسر اروپا می‌باشد [۵]. طبق تعریف: تغذیه‌گرایی یک عبارت علمی برای نشان دادن بیش‌باروری^۱ آبهای سطحی است که می‌تواند موجب شکوفایی بیش از حد جلبکی شود. تاکنون پژوهشهای زیادی در مورد تغذیه‌گرایی صورت گرفته است. در ایران پژوهشی در مورد تغذیه‌گرایی مخزن سد درودزن در استان فارس انجام شده است [۶]. در پژوهشی دیگر تغذیه‌گرایی مخزن کرخه توسط دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت و شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران بررسی و مدلسازی شده است [۷].

در سایر کشورها نیز پژوهشهای زیادی در مورد تغذیه‌گرایی انجام شده است. از این تحقیقات می‌توان به کار زینک در سال ۲۰۰۴ [۸] روی دریاچه‌ی اتاواپاسکات^۲ و پژوهش آقای اینکالا [۹] در مورد خلیج فنلاند اشاره کرد. در یک مورد نیز از پویایی سیستم در مدلسازی تغذیه‌گرایی استفاده شده است. کاری که وزجک و همکاران در ترکیه انجام داده‌اند، نمونه خوبی از کاربرد پویایی سیستم در تغذیه‌گرایی را نشان می‌دهد. در خروجی این مدل، غلظت فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و نیتروژن مشاهده می‌شود [۵]. در پژوهش دیگری که در چین انجام شده نیز از پویایی سیستم، مدل ErhaiSD، برای برنامه‌ریزی و مقابله با پدیده اوتریفیکاسیون استفاده شده است [۱۰]. تغذیه‌گرایی مخازن یک فرایند پیچیده است. به خاطر همین پیچیدگی‌هاست که مدل‌های رایانه‌ای ابزار بسیار مهمی در تشریح این فرایند به‌شمار می‌روند [۷].

پویایی سیستم روش تحلیل موقعیتهایی است که با زمان تغییر می‌کنند. پویایی سیستم در میانه دهه ۱۹۵۰ توسط پرفسور فورستر^۳ در دانشگاه صنعتی ماساچوست (MIT) ایجاد شد [۱۱]. کار با روش پویایی سیستم دو فایده مهم دارد. نخست اینکه به آسانی می‌توان ارتباط بین اجزای گوناگون سیستم را به صورت روابط علت و معلولی درآورد. فایده دیگر این روش آن است که این امکان توسط آن بوجود می‌آید که پارامترها یا ساختارها- که برای بهبود رفتار نیاز به تغییر دارند- را به آسانی کنترل و مدیریت نمود [۱۲]. در این مقاله، زبان برنامه‌نویسی ونسیم، که ابزار پویایی سیستم را جهت مدلسازی در اختیار ما قرار می‌دهد، مورد استفاده قرار گرفته است.

شکوفایی جلبکی مضر که یکی از پیامدهای اوتریفیکاسیون است در آبهای سطحی سراسر جهان به کرات مشاهده می‌شود [۴]. از آنجا که تمام فرایندهای سیستم‌های آبی به خوبی شناخته نشده است، پس مهمترین آنها را در نظر

¹ over fertilization

² Atawapaskat

³ Jay W. Forrester

گرفته و از بقیه صرفنظر می‌شود. در صورتی که تعداد پارامترهای مدل پایین نگه داشته شود، کالیراسیون سریعتر و آسانتر خواهد بود [۱۳]. باید توجه داشت که شناخت فرایندهای طبیعی و مهندسی تصفیه مستلزم آشنایی با واکنشهای شیمیایی و بیولوژیکی موجود در این فرایندها است [۱۴].

در سالهای اخیر غلظت بالای جلبک در چند دریاچه‌ی ایران گزارش شده است [۶]. این زیست‌توده جلبکی زیاد یک تهدید جدی زیست‌محیطی در مورد مخازن ایران مطرح می‌کند. این مطلب و کمبود آب در ایران نشان می‌دهد که موضوع تغذیه‌گرایی و مدل‌سازی آن اهمیت زیادی دارد و باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

در پویایی سیستم از چهار مولفه جهت ساخت مدل و نشان دادن روابط علت و معلولی استفاده می‌شود. این مولفه‌ها عبارتند از: ۱- انبارش‌ها^۴ یا متغیرهای حالت^۵ ۲- جریانها^۶ ۳- پیکانها یا اتصالات ۴- مبدلها یا فرایندها [۱۲]. انبارش به مفهومی دلالت دارد که بتوان در آن چیزی انباشته، و یا ذخیره کرد، و سپس آن را به بخش دیگری از سیستم انتقال داد. جریان، به عملیات جاری می‌گویند که محتوای مخزن سیستم را، در طول دوره زمانی، تعیین می‌کند. یک فلش یا پیکان نشان‌دهنده اتصال است که دو عنصر را در نمودار به هم وصل می‌کند و نشان‌دهنده جهت ارتباط است. مبدل، متغیری است که آهنگ کارکرد فرایند سیستم را تعیین می‌کند. مبدل می‌تواند نقشهای گوناگونی در سیستم ایفا کند. مهمترین نقش مبدل، تعیین آهنگ، یا سرعت فرایند سیستم است. سرعت تغییر محتوای هر انبارش، بر پایه این آهنگ است. اساس روش پویایی سیستم بر پایه‌ی فرضیه فرایندهای بازخورد می‌باشد. یک سیستم بازخورد متاثر از رفتار گذشته خود می‌باشد. این سیستم یک ساختار حلقه بسته دارد که نتایج را از فعالیتهای گذشته گرفته و در فرایندهای آینده استفاده می‌نماید [۱۵].

تحلیل حساسیت یکی از بخشهای مهم در فرایند توسعه مدل است. هدف از آزمایشهای تحلیل حساسیت این است که متغیرهای موجود در سیستم را در دو دسته بسیار مهم و کم‌اثر تقسیم کنیم [۷]. هدف اصلی این مقاله، ساخت یک مدل مناسب تغذیه‌گرایی بوده است که داده‌های ورودی کمی داشته و علاوه بر ساده بودن بتواند وضعیت کلی یک مخزن را نیز بیان کند.

در یک سیستم بسته، موازنه جرم جلبک را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۶]:

$$\frac{da}{dt} = K_g a$$

که در این رابطه a ، غلظت جلبک و K_g ، نرخ رشد جلبکی است. در صورتی که در شرایط اولیه $t=0$ و $a_0=0$ باشد، رابطه بالا به صورت زیر در می‌آید [۱۷]:

$$a = a_0 e^{K_g t}$$

بدین ترتیب تنها در مدت زمان ۱۰۰ روز مقدار گیاهان به حد بسیار زیادی می‌رسد. در طبیعت هرگز این حالت پیش نمی‌آید. بلکه عوامل محدودکننده‌ای مانند غلظت مواد مغذی و مرگ و شکار می‌تواند مقدار آنها را محدود کند، بنابراین در حالت واقع‌بینانه‌تر این رابطه به صورت زیر در می‌آید [۱۶]:

$$\frac{da}{dt} = K_g(T, N, I)a - K_d a$$

⁴ Stocks

⁵ State variables

⁶ Flows

که در این رابطه: $K_g(T, N, I)$ ؛ نرخ رشد به صورت تابعی از دما، موادمغذی و نور است:

$$K_g(T, N, I) = K_{g,T} \phi_N \phi_L$$

در این رابطه $K_{g,T}$ ؛ نرخ رشد بیشینه است که در شرایط نور بهینه برای موادمغذی و در یک دمای خاص روی می‌دهد. ϕ_N و ϕ_L فاکتورهای میرایی^۷ برای نور و موادمغذی محدودکننده است.

در این مقاله از رابطه‌ی میکیلیس-منتن^۸ جهت نشان دادن محدودکنندگی موادمغذی استفاده شده است [۱۶].

$$\phi_N = \frac{N}{K_{SN} + N}$$

که در این رابطه N ، غلظت ماده مغذی و K_{SN} ثابت نیم‌اشباع ماده مغذی است. اما باید توجه کرد که تنها یک ماده مغذی محدودکننده نیست و ممکن است چند ماده محدودکننده باشند، بنابراین اثر آنها را نیز در مدل باید دید. چندین رویکرد در این مورد وجود دارد. در این مقاله از رویکردی استفاده شده که در آن اثر محدودکنندگی دو ماده مغذی موثرتر، یعنی فسفر و ازت، در هم ضرب می‌شود [۱۷]، یعنی:

$$\phi_N = \phi_p \phi_n$$

تأثیرگذاری دما با رابطه معروف وانتهوف-آرنیوس بر نرخ رشد و مرگ و میر اثر می‌گذارد. در نهایت مدل کامل رشد فیتوپلانکتون را می‌توان به صورت زیر توسعه داد [۱۶]:

$$K_g = K_{g,20} 1.066^{T-20} \left[\frac{2.718f}{k_e H} (e^{-a_1} - e^{-a_0}) \right] \min \left(\frac{n}{k_{sn} + n}, \frac{p}{k_{pm} + p} \right)$$

که در این رابطه: n_t ؛ ازت غیرآلی کل ($n_a + n_i$) و T ؛ دما، است.

به دلیل آنکه فسفر نقش اصلی را در فرایند تغذیه‌گرایی و رشد فیتوپلانکتونها دارد و بر بسیاری از پارامترها تأثیر دارد، در این مقاله توجه ویژه‌ای به آن معطوف شده است. البته طبق برخی پژوهشها عامل اصلی تغذیه‌گرایی در بعضی دریاچه‌ها ازت است، اما ازت اغلب در دریاها و مناطق ساحلی عامل محدودکننده است [۳].

فسفر واکنشگر محلول یا SRP از هیدرولیز کربن آلی محلول و تنفس زنجیره‌ی غذایی حاصل می‌شود و با جذب گیاهی کاهش می‌یابد و در این مقاله برای مدلسازی آن از رابطه زیر استفاده شده است [۱۶]:

$$V \frac{dp_s}{dt} = a_{pc} k_h(T) V C_d + a_{pa} k_{ra}(T) V a + a_{pc} k_{rh}(T) V z_h + a_{pc} k_{rc}(T) V Z_c - a_{pa} k(T, n_t, p_s, I) V a$$

که در این رابطه a_{pa} ، نسبت فسفر به کلروفیل؛ a_{pc} ، نسبت فسفر به کربن؛ C_d ، کربن آلی غیرزنده محلول؛ K_{ra} ، افتهای ناشی از تنفس و دفع در جلبکها می‌باشند. در این مقاله، روابط دیگری نیز برای مدلسازی دیگر عوامل مهم تأثیرگذار بر جلبکها و تغذیه‌گرایی استفاده شده است که به دلیل زیاد بودن تعداد آنها، در این مقاله به آنها اشاره نمی‌شود و در صورت لزوم می‌توان به منابع گفته شده در پایان مقاله [۱۶، ۵] مراجعه کرد.

اختلاط در دریاچه‌ها از طریق چند مکانیسم انجام می‌شود (۱۸، ۱۹، ۲۰). پاسخ یک پیکره آبی به این مکانیسم‌های اختلاط بستگی به چندین عامل از قبیل ویژگی‌های مورفولوژیک (۲۱) و عوامل اقلیمی و هواشناسی دارد (۱۸، ۱۹).

⁷ attenuation factors

⁸ Michaelis-Menten

روش کار

در پژوهش حاضر یک مدل تغذیه‌گرایی با رویکرد پویایی سیستم ساخته شده است. این مدل پارامترهای اصلی تغذیه‌گرایی را مدل می‌کند. به طور کلی اهداف مهمی که در این مقاله مورد نظر بوده‌اند، عبارتند از:

- تعیین ساختار یک مدل مناسب با روش پویایی‌سیستم، توسط ابزار ونسیم، جهت مدلسازی تغذیه‌گرایی مخازن،
 - به‌کاربردن داده‌های موجود یک مخزن و تعیین مدل شبیه‌سازی کیفی آب در شرایط این مخزن جهت پیش‌بینی و تعیین مقادیر غذایی مخزن،
 - مقایسه نتایج مدلسازی با داده‌های اولیه در مخزن مورد نظر،
 - امکان‌سنجی شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخازن با روش پویایی سیستم.
- همچنین در این مطالعه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:
- مخزن به دو لایه، اپیلمنیون و هیپولیمنیون، تقسیم شده و غلظت متغیرها در هر لایه یکسان فرض شده است.
 - مواد مغذی تاثیرگذار در رشد جلبکی شامل فسفر، ازت و کربن بوده است.
 - هر لایه مخزن به صورت یک راکتور اختلاط کامل در نظر گرفته شده است.
- مراحل ساخت مدل با نرم‌افزار ونسیم به صورت زیر بوده است:

نخست طرح کلی سیستم (و بنابراین مدل) تا حد امکان به صورتی ساده طراحی شد. یعنی متغیرهای سیستم در قالب چهار مولفه اصلی پویایی‌سیستم تعریف شده و هر کدام بر اساس نوعی که دارند روی صفحه طراحی ایجاد شدند. سپس با استفاده از پیکانها و جریانها روابط علت و معلولی بین اجزای سیستم به صورت ظاهری رسم شد. در این پروژه هشت انبارش در نظر گرفته شده است که عبارتند از: غلظتهای فیتوپلانکتون، زئوپلانکتونهای گیاهخوار و گوشتخوار، فسفر، نیترات، آمونیاک، کربن محلول و کربن ذره‌ای. این متغیرها در دو سطح رولایه و زیرلایه شبیه‌سازی شده‌اند، بنابراین تعداد انبارشها ۱۶ خواهد بود. این ۱۶ متغیر، پیکره اصلی مدل تغذیه‌گرایی را تشکیل می‌دهند. در شکل ۱ نمای کلی مدل آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در این شکل تنها اثر مستقیم متغیرهای حالت بر هم نشان داده شده است.

در مرحله بعد رابطه بین اجزای سیستم با به‌کارگیری روابط ساده ریاضی تعریف شد. جاهایی که رابطه ریاضی قابل قبولی موجود نبود، رابطه‌ها با بهره‌گیری از نمودار تعریف شد. مثلاً رابطه حجم-سطح-تراز مخزن به صورت نمودار حجم در برابر زمان و سطح در برابر زمان به مدل وارد شد. سپس سریهای زمانی موردنیاز مدل تعریف شد. واحد سنجش زمان نیز به گونه‌ای تعیین شد که با روابط ریاضی مورد استفاده سازگار باشد.

برای نشان دادن کارایی این مدل به داده‌های دقیقی نیاز بود. بنابراین از داده‌های مخزنی در ایالات متحده استفاده شد. پس از نوشتن روابط، مقادیر کمی و کیفی سال ۱۹۹۱ مخزن [۲۲] به مدل وارد شد و مقادیر معمول پارامترها (که از مقالات علمی معتبر استخراج شده) به مدل داده شد. در مرحله بعد مدل برای مخزن لانگ لیک کالیفرنیه شد. و آنالیز حساسیت در مورد ثابتها انجام گردید. در آخرین مرحله با استفاده از داده‌های سال ۲۰۰۰، مدل اعتبارسنجی گردید. داده‌های موجود مخزن لانگ‌لیک از ۵ ایستگاه مختلف در اعماق گوناگون بود. چون در این مقاله مخزن به صورت

اختلاط کامل فرض شده است، بنابراین از داده‌های کیفی سطحی تا عمق لایه اپیلمنیون میانگین گرفته شد و در مدل به عنوان مقدار آن پارامتر در رولایه مورد استفاده قرار گرفت، چنین کاری برای لایه هیپولیمنیون نیز انجام شد. ورودیهای مدل شامل مقادیر غلظت فسفرواکنشگر محلول^۹ (SRP)، نترات، نیتريت و فیتوپلانکتون است که مورد آخر به صورت کلروفیل a اندازه‌گیری می‌شود. از آنجا که شبیه‌سازی برای دو لایه اپیلمنیون و هیپولیمنیون انجام می‌گیرد، بنابراین مقادیر ورودی و همچنین دما برای هر لایه در نظر گرفته می‌شود. حرارت رولایه و زیرلایه به صورت مقادیر ماهیانه و بصورت نمودار در VenSim وارد می‌شود. ابعاد مخزن، مساحت لایه ترموکلاین، حجم رولایه و زیرلایه، دبی جریان ورودی و خروجی از مخزن و مقادیر غلظتهای متغیرهای حالت نیز وارد مدل می‌شود. بسیاری از سیستم‌های زیست‌محیطی مشخصات مشترکی دارند که با سود جستن از آن می‌توان رفتار سیستم را پیش‌بینی نمود، و بر اساس آن به سهولت مدلی از سیستم طراحی کرد. هنر عمده در ساخت مدل سیستم‌های زیست‌محیطی، تشخیص این مشخصات، و بهره‌گیری صحیح از اجزای سیستم (مثل ترکیب مناسبی از انبارش، جریان، مبدل و متصل‌کننده) می‌باشد.

نتایج

جهت مدلسازی تغذیه‌گرایی مدلهای زیادی موجود می‌باشند، اما در این مقاله با رویکردی نو با نام پویایی سیستم به مدلسازی تغذیه‌گرایی پرداخته شده است. در این رویکرد از روابط متداول تغذیه‌گرایی استفاده شده است. یعنی از روابط متفاوتی با سایر مدلهای تغذیه‌گرایی استفاده نشده، بلکه از روش جدیدی جهت مدلسازی استفاده گردیده است. شبیه‌سازی مخزن لانگلیک از ۱۹۹۱/۶/۳ تا ۱۹۹۱/۱۱/۴ صورت گرفته و از داده‌های ژانویه‌ی ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۰۰ لانگلیک [۲۲] در صحت‌سنجی یا اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. بنابراین ۱۹۹۱/۶/۳ روز اول شبیه‌سازی در مدل کالیبراسیون لانگ لیک می‌باشد و شبیه‌سازی به مدت ۱۵۵ روز انجام گرفته است. به دلیل زیاد بودن تعداد نمودارها، تنها نتایج یکی از انبارشها آورده شده است. در شکل ۲ نتایج شبیه‌سازی شده فسفر در رولایه با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. به دلیل اهمیت کلروفیل a (جلبک) در تغذیه‌گرایی و همچنین نقش مهم فسفر به عنوان یک ماده مغذی محدودکننده در شکل‌های ۴ و ۵ مدل پویایی سیستم این دو انبارش نشان داده شده است. در آنالیز حساسیت مدل مشخص شد که اندکی تغییر در مقدار فسفر موجود، تعداد فیتوپلانکتونها به شدت دچار تغییر می‌شود، این مطلب در مورد کربن و ازت درست نبود. چنین نتیجه گرفته شد که فسفر ماده مغذی محدود کننده است. در آنالیز حساسیت، ضرایب مربوط به نور را تغییر داده و نتایج را مشاهده کردیم. معلوم شد که نور نیز عامل بسیار تاثیر گذار است و جزء پارامترهای بسیار مهم مدل تلقی می‌شود. در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج مدلسازی فسفر و در شکل ۷ نتایج مدلسازی جلبکها آمده است. در جدول ۱ مقادیر ضرایب، نرخها و پارامترهای کالیبراسیون در مدل تغذیه‌گرایی مخزن لانگلیک آورده شده است. در این جدول مقادیر متداول ضرایب از کتابها و مقالات مورد استفاده در مقاله بویژه [۱۵] استخراج شده و در مرحله کالیبراسیون با تغییر دادن مقدار هریک از ضرایب در محدوده گفته شده، مقدار آن ضریب برای مخزن لانگلیک را به دست آوردیم که در جدول مذکور آورده شده است.

⁹ soluble reactive phosphorus

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

امروزه مدل‌های توانمند در زمینه‌ی مسائل زیست محیطی باید از ویژگی‌های خاصی برخوردار باشند تا در حل مناقشات بین رشته‌ها، گروه‌ها و سازمان‌های موثر بر کیفیت محیط‌زیست نقش مهمی را ایفا نمایند. یک مدل خوب باید دارای توانمندی، سازگاری و قابلیت دسترسی باشد [۷]. توانمندیها شامل قابلیت اجرایی مدل، بهره‌گیری از علوم جدید و توان رقابتی آن است. سازگاری، معرف میزان سازگاری مدل با دنیای بیرون است. قابلیت دسترسی مدل نیز شامل سه قابلیت شبکه‌ای شدن، کاربرد دوست بودن و هزینه‌ی پایین است.

انعطاف‌پذیری مدل، سادگی فراگیری برای سایر کاربران و استفاده از بخش‌های نامحدود از ویژگی‌های مهم این مدل تغذیه‌گرایی می‌باشد. مدل تغذیه‌گرایی ساخته شده در این مقاله، مخزن را به لایه بالا (رولایه یا اپیلیمنیون) و لایه پایین (زیرلایه یا هیپولیمنیون) تقسیم نموده و هر بخش را به عنوان یک راکتور اختلاط کامل در نظر می‌گیرد. این دو لایه از طریق یک ضریب پخش، در حال مبادله مواد با هم هستند. این ضریب بستگی به لایه‌بندی مخزن دارد و به صورت تابعی از زمان در مدل تعریف شده است. در مدل پویایی سیستم تغذیه‌گرایی متغیرهایی مانند فسفر، آمونیاک، نیترات و فیتوپلانکتون شبیه‌سازی می‌شوند. خروجی‌های مدل شامل غلظت این متغیرها به علاوه غلظت زئوپلانکتونهای گیاهخوار و گوشتخوار و کربن محلول و ذره‌ای می‌باشد. خروجی‌ها در دو بخش مجزا ارائه می‌شوند. این دو بخش همان رولایه و زیرلایه می‌باشد. در کالیبراسیون مدل تغذیه‌گرایی لانگلیک به این نتیجه رسیدیم که فسفر ماده‌ی مغذی محدودکننده رشد فیتوپلانکتونهاست.

مدل‌های پویایی سیستم امکان ارزیابی کلی وضعیت کیفی مخزن را میسر می‌سازند، بنابراین سرعت نتیجه‌گیری و انعطاف‌پذیری بسیار زیاد مدل را می‌توان از ویژگی‌های منحصر به فرد مدل‌های پویایی سیستم دانست. در صورت نیاز، جهت استفاده از مدل در مورد مخازن دیگر، افزودن پیچیدگی‌های بیشتر به مدل به راحتی قابل انجام است. همچنین در صورت در اختیار نداشتن برخی از مقادیر می‌توان آنها را از مدل حذف کرد.

به طور کلی نتایج بدست آمده از این مقاله را می‌توان در موارد زیر ذکر کرد:

۱. مدل پویایی سیستم تغذیه‌گرایی نیاز به داده‌های کمتری در مقایسه با سایر مدل‌های موجود دارد. بنابراین مدل ارزانی بوده و می‌توان پاسخهای خوبی از آن بدست آورد.
 ۲. ماده مغذی محدودکننده رشد جلبکی در مخزن لانگلیک فسفر می‌باشد. بنابراین کنترل ورود فسفر به مخزن می‌تواند موجب بهبود کیفی مخزن و کاهش خطر تغذیه‌گرایی شود.
 ۳. در مخزن لانگلیک، نور نیز یکی از عوامل مهم محدودکننده رشد جلبکی است.
 ۴. نتایج شبیه‌سازی لانگلیک مطابقت بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.
- مطابق شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از مدلسازی فسفر در مدل پویایی سیستم انطباق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر دارد.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فیتوپلانکتونها یک شکوفایی تابستانه دارند. یعنی غلظت آنها در تابستان به اوج رسیده و دوباره کاهش یافته است. دلیل آن می‌تواند نور زیاد و دمای بالا باشد.

به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در بیشتر مخازن، عامل اصلی تغذیه‌گرایی فسفر می‌باشد، باید به شکلی آن را حذف کرد. جهت مدیریت تغذیه‌گرایی پیشنهاد می‌شود تا حد ممکن از ورود فسفر از طریق رودخانه به مخزن جلوگیری به عمل آید. با این وجود ممکن است ناچار به حذف فسفر از مخزن شویم که هزینه زیادتری را به ما تحمیل می‌کند. تحقیقاتی

در مورد حذف فسفر و اکشنر محلول و فسفر کل انجام شده که در یک مورد آن از نمکهای آلومنیوم جهت حذف انواع فسفر استفاده شده است و دوز مناسب آلومنیوم برای حذف SRP (با آزمایش جار) را بین ۲ تا ۴ میلی گرم بر لیتر تعیین کرده است [۲۳].

منابع

- [1]: Rivera Elmer Ccopa (2007), Julio Ferraz de Queiroz, Jose Maria Ferraz, Enrique Ortega, Systems models to evaluate eutrophication in the Broa Reservoir, Sao Carlos, Brazil, ecological modelling 202 (2007) 518–526.
- [2]: Bouraoui Faycal, Bruna Grizzetti, An integrated modelling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France), ecological modelling 212 (2008) 450–459.
- [3]: Quiblier C. (2008), Christophe Leboulangerb., Seyni Sane´d, Philippe Dufourc, “Phytoplankton growth control and risk of cyanobacterial blooms in the lower Senegal River delta region”, Water Research, 42 (2008) 1023 – 1034.
- [4]: Onderka Milan (2007), Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir (Slovakia)—A simple regression model, Ecological Modelling 209 (2007) 412–416.
- [5] Vezjak M. (1998), T. Savsek, E.A. Stuhler, “System Dynamics of eutrophication process in lakes”, European Journal of operational research 109, PP:442-451
- [6] Geenen, Bart(1996), “Eutrophication of the Doroodzan reservoir in Iran”, Dissertation for the degree of Doctor of Science(Technology), Wageningen.

[۷]: سمائی، محمد رضا (۱۳۸۳)، "مدلسازی تغذیه‌گرایی با رویکرد پویایی سیستم"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی

عمران-محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[8] Zincke, Diansy (2004), "Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton communities of lakes Atawapaskat, Michigan", Journal of Atawapaskat Research(2004), PP: 001-006

[9] Inkala, Arto (2001), “Modelling of water circulation and the dynamic of phytoplankton for the analysis of eutrophication”, Dissertation for the degree of Doctor of Science(Technology), Helsinki University of Technology, Finland

[10] Guo H. C., L. Liu, G. H. Huang, G. A. Fuller, R. Zou and Y. Y. Yin, “A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin” Journal of Environmental Management (2001) 61, 93–111.

[11] Totorial and technical documentation Vensim. (1988-2008). Ventana Systems, Inc

[12] Jalali M. and A.Afshar (2004), “System dynamics modeling of hydropower reservoir operation”, ICOLD2004, Korea

[13]: Inkala, A., Pitkanen H. (1999), “The effect of load reductions on algal biomass in the eastern Gulf of Finland- Modelling point of view”, Boreal Environment Research 4:357-366

[۱۴] کی‌نژاد، محمدعلی و سیروس ابراهیمی(۱۳۷۶)، "مهندسی محیط‌زیست"، جلد اول، دانشگاه صنعتی سهند تبریز،

(ترجمه)

[۱۵]: سمائی، محمد رضا، عباس افشار و مجتبی غروی (۱۳۸۳)، "مدلسازی فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در مخازن با روش

پویایی سیستم"، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۲، زمستان ۸۳.

[16]:Chapra Steven C.(1997), Surface Eater-Quality Modeling, McGraw-Hill

[۱۷]: ترابیان، علی(۱۳۸۱) و سید حسین هاشمی، "مدلسازی کیفی آبهای سطحی"، دانشگاه تهران

[18]: Rebecca Lawson, Michael A. Anderson, 2007. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake, Water research, Vol. 41,pp. 4457 – 4467

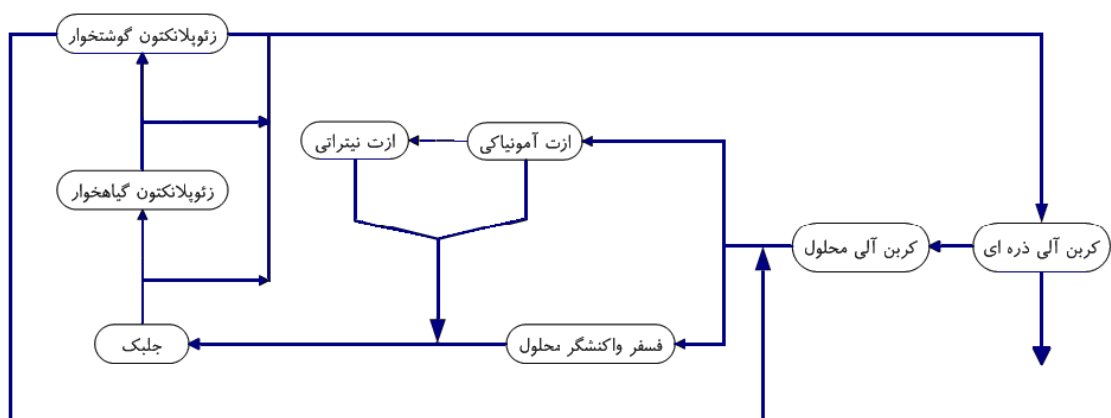
[19]: Imboden, D.M., Wuest, A., 1995. Mixing mechanisms in lakes. In: Lerman, A., Imboden, D.M., Gat, J.R. (Eds.), Physics and Chemistry of Lakes. Springer, Berlin, pp. 83–138.

[20]: Martin, J.L., McCutcheon, S.C., 1999. Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling. Lewis Publications, Boca Raton, FL, 794pp.

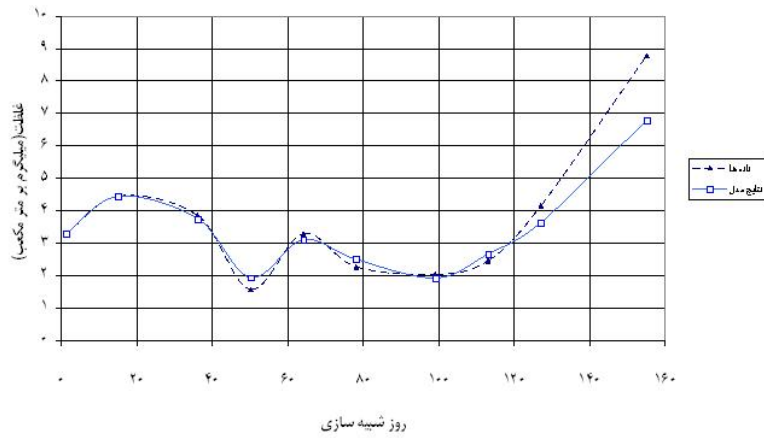
[21]: Kling, G.W., 1988. Comparative transparency, depth of mixing, and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa. *Limnol. Oceanogr.* 33 (1), 27–40.

[22]: Annear Jr. Robert L., Chris J. Berger, Scott A. Wells, November 2001, “Upper Spokane River Model”, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report EWR-4-01.

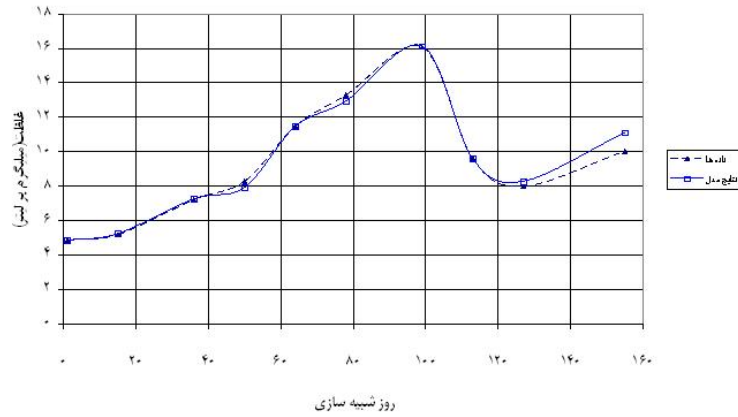
[23]: Auvray Franck, Eric D. van Hullebusch, Veronique Deluchat, Michel Baudu (2006), Laboratory investigation of the phosphorus removal (SRP and TP) from eutrophic lake water treated with aluminium, *Water Research*, 40 (2006) 2713 – 2719



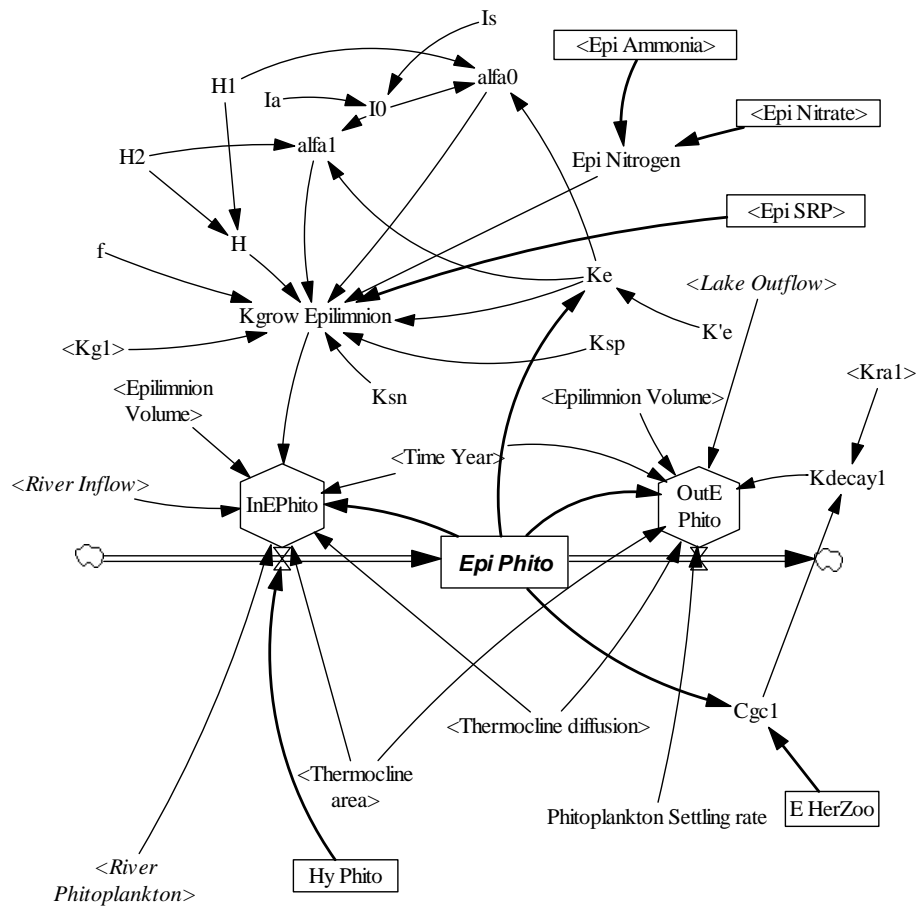
شکل ۱. قطعه‌بندی سنتیکی مدل تغذیه گرایبی [۱۶]



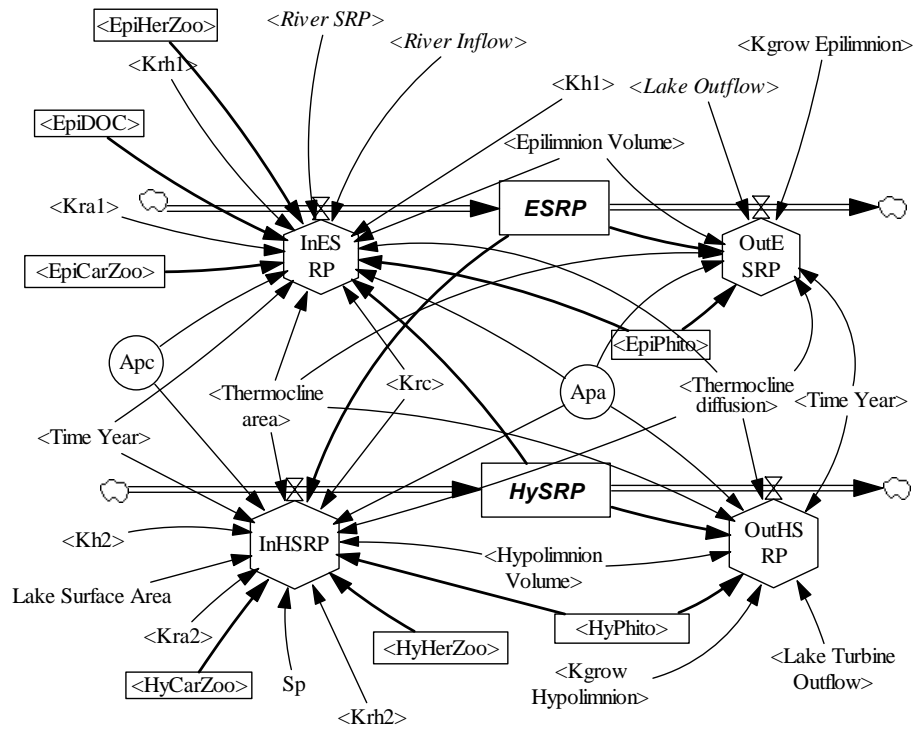
شکل ۲. مقایسه نتایج مدلسازی شده SRP در رولایه با داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگلیک



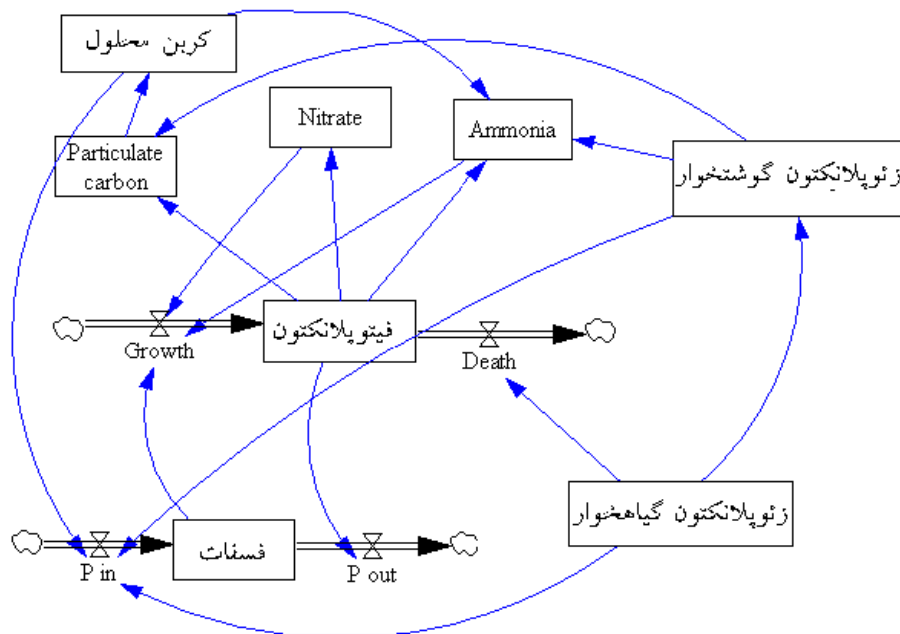
شکل ۳. مقایسه نتایج مدلسازی SRP در زیر لایه با داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگلیک



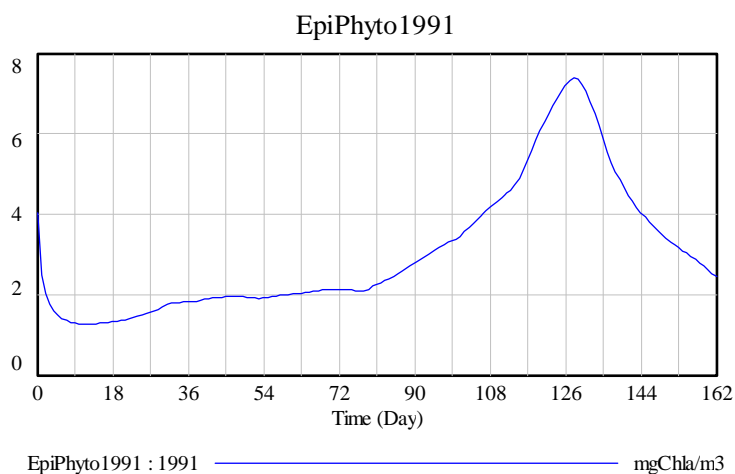
شکل ۴. شمای مدل پویایی سیستم انبارش فیتوپلانکتون در رولایه



شکل ۵. مدل پویایی سیستم انبارشهای فسفر در مدل تغذیه‌گرایی



شکل ۶. نمای کلی مدل پویایی سیستم تغذیه‌گرایی



شکل ۷. نتایج مدلسازی فیتوپلانکتون در رولایه در سال ۱۹۹۱ لانگلیک

جدول ۱. مقادیر ضرایب، نرخها و پارامترهای کالیبراسیون در مدل تغذیه‌گرایی مخزن لانگلیک

واحد	مقدار متداول	مقدار ضرایب کالیبراسیون	پارامتر
$mgN m^{-3}$	۰-۵۰۰	۱۰	K_{sn} (ثابت نیم اشباع ازت)
$mgP m^{-3}$	۱-۳۰	۵	K_{sp} (ثابت نیم اشباع فسفر)
$mgChla m^{-3}$		۱۵	K_{sa} (ثابت نیم اشباع جلبک)
md^{-1}		۰,۲	Phito Sett (میزان ته‌نشینی جلبک)
day^{-1}	۰,۰۰۱-۰,۱۷۱	۰,۰۹۹	K_{ra} (زوال ناشی از اثر ترکیبی تنفس و مدفوع)