

استفاده از رویکرد پویایی سیستم جهت مدل سازی اوتریفیکاسیون در دریاچه های مصنوعی

محمد رضا سمائی^۱، سید باقر مرتضوی^۲، اصغر ابراهیمی^۳، ابراهیم شاهسونی^۴

چکیده

مقدمه: امروزه با ورود انواع پساب ها و رواناب ها به منابع آب، فرایند اوتریفیکاسیون یا تغذیه گرایی به شدت تسریع شده است. چنین است که نیاز به مدیریت دریاچه های طبیعی و مصنوعی، به منظور پیش گیری یا به تعویق انداختن این مشکل، به وجود آمده است. تغذیه گرایی یک فرایند پیچیده است. یکی از ابزارهایی که در این زمینه می تواند ما را یاری کند، مدل سازی فرایند تغذیه گرایی می باشد. امروزه مدل های زیادی وجود دارد که این کار را انجام می دهد. نیاز به طیف وسیعی از داده ها، یادگیری مشکل و نیاز به زمان طولانی از مشکلات این مدل ها می باشد. امروزه جهت مدیریت تغذیه گرایی اغلب از ابزارهای کامپیوتری، به ویژه مدل سازی ریاضی بهره گرفته می شود.

روش ها: در این مقاله یک مدل فرایندی ساخته شد. نخست سیستم تغذیه گرایی، مشخصات و پارامترهای آن تعیین و روی صفحه VenSim ایجاد شد. سپس روابط ریاضی هر فرایند تعیین و وارد کامپیوتر شد. در نهایت مدل با استفاده از داده های یک مخزن، کالبره و تأیید شد. این مدل متغیرهای اصلی تغذیه گرایی را مدل می کند. این متغیرها شامل فسفر، نیتروژن، فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون است.

یافته ها: با بررسی نتایج حاصل از مدل، یک شکوفایی جلبکی مشاهده شد. در کالبراسیون مدل، ثابت نیم اشباع نیتروژن برابر ۱۰ میلی گرم بر لیتر بر حسب نیتروژن، ثابت نیم اشباع فسفر برابر ۵ میلی گرم بر لیتر بر حسب فسفر به دست آمد.

نتیجه گیری: یافته های مدل نشان داد که فسفر یک عامل محدود کننده در مخزن است. نتایج حاصله بیان گر آن است که در مقایسه با مدل های دیگر، استفاده از این مدل برای کاربر آسان تر بوده، با داشتن کمترین داده ها، نتایج مطلوب حاصل می گردد.

واژه های کلیدی: تغذیه گرایی، پویایی سیستم، مواد مغذی، مدل سازی، لانگ لیک، دریاچه های مصنوعی.

نوع مقاله: تحقیقی

پذیرش مقاله: ۱۹/۳/۱۹

دریافت مقاله: ۱۹/۲/۲

مقدمه

پایین نگه داشته شود، کالبراسیون سریع تر و آسان تر خواهد بود (۱۱). پس جهت تعیین پارامترهای حیاتی مورد نیاز مدل، بایستی از واکنش های شیمیایی و زیستی موجود در این فرایندها شناخت کافی به دست آورد (۱۸، ۱۳).

اوتریفیکاسیون یا تغذیه گرایی فرایندی است که ناشی از غنی شدن منابع آب از فسفر و نیتروژن می باشد. دریاچه های مصنوعی یا دریاچه های پشت سد ها، از نظر اکولوژی پیچیده و در عین حال پویا می باشند. این پیکره های آبی در تعامل با

از آن جا که تغذیه گرایی مخازن یک فرایند پیچیده است، مدل های رایانه ای ابزار بسیار مهمی در تشریح این فرایند به شمار می روند (۱۸). هر چند که هیچ گاه مدل ها حاوی تمام مشخصه های سیستم واقعی نیستند، اما مهم است که مدل، آن دسته از مشخصه های خاص را در خود داشته باشد؛ به طوری که در جریان حل مسأله مورد نظر حیاتی و لازم است (۱۲). از طرف دیگر، در صورتی که تعداد پارامترهای مدل

۱- مربی، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران (نویسنده مسؤول)

Email: mrsamaei@modares.ac.ir

۲- دانشیار، گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری بهداشت محیط، مرکز تحقیقات محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران.

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران.

فعالیت های انسان قرار دارند (۱۶). با این که وجود مواد مغذی برای گیاهان و جانوران حیاتی می باشد، اما حضور مقدار زیاد آن ها می تواند کیفیت آب و حتی خاک را کاهش دهد. برای مثال دو ماده مغذی فسفر و نیتروژن موجب تغذیه گرایی در برکه ها و دریاچه ها می شوند (۲). پدیده تغذیه گرایی و به دنبال آن افزایش غلظت فیتوپلانکتون ها می تواند کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهد (۱۵). از ویژگی های عمده این پدیده می توان به شکوفایی جلبک های سبز یا آبی- سبز و همچنین نوسان شدید اکسیژن محلول در آب اشاره کرد. این فرایند محیط آب را برای زندگی ماهی ها و زئوپلانکتون ها تحمل ناپذیر می کند. دانشمندان بر این باورند که تغذیه گرایی می تواند ترکیب گونه های یک زیستگاه را تغییر دهد (۱۴).

تاکتون پژوهش های زیادی در مورد تغذیه گرایی صورت گرفته است. در ایران نیز چند پژوهش در این رابطه انجام شده است، که یکی از آن ها پژوهشی است که در مورد تغذیه گرایی مخزن سد درودزن فارس انجام شده است. نتایج این پژوهش بیان گر آن است که با وجود گزارش های پیشین در مورد وجود مقدار جلبک زیاد در این مخزن، وضعیت آن نامطلوب نمی باشد (۷). در پژوهشی دیگر در دانشگاه علم و صنعت ایران، تغذیه گرایی مخزن کرخه بررسی و مدل سازی شده است (۱۸).

در سال های گذشته غلظت زیاد جلبک در چند دریاچه ایران گزارش شده است که می تواند مخازن ایران را از نظر زیست محیطی با تهدیدی جدی مواجه کند (۷). از سویی دیگر، مسأله کمبود آب و خشک سالی های اخیر در ایران نشان می دهد که موضوع تغذیه گرایی و مدل سازی آن تا چه اندازه دارای اهمیت است و باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد. استفاده گسترده از مدل های اکولوژیکی در مدیریت محیط زیست از حدود سال ۱۹۷۰ آغاز شد (۱۲). از این کارها می توان به مدل سازی تغذیه گرایی دریاچه Atawapaskat (Zincke) و خلیج فلاند (۱۰) اشاره کرد. کار دیگری که به طور اختصاصی با رویکرد پویایی سیستم انجام شده است، مدل سازی تغذیه گرایی دریاچه گلومسو در ترکیه می باشد که

از Stella II به عنوان ابزار پویایی سیستم استفاده شده است. خروجی این مدل در بر گیرنده غلظت فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و نیتروژن می باشد (Vezjak et al). در پژوهش دیگری که در چین، نیز از پویایی سیستم، مدل ErhaiSD، برای برنامه ریزی و مقابله با پدیده تغذیه گرایی استفاده شده است (۸). در آلمان شکوفایی سیانوباکتری ها در نواحی ساحلی کم عمق مدل سازی شده است (۹). همچنین پژوهشگران در هلند با استفاده از یک مدل اکولوژیک ژنریک، غلظت کلروفیل a و ترکیب فیتوپلانکتون ها را مدل سازی کرده اند (۱۷).

پویایی سیستم در میانه دهه ۱۹۵۰ در دانشکده مدیریت پژوهشگاه صنعتی ماساچوست (MIT) پایه گذاری شد و به تدریج گسترش پیدا کرد (۶). دانشمندان مختلف پژوهش های گوناگونی با این روش انجام داده، تعریف های مختلفی برای آن ارایه کرده اند. برای نمونه، در یکی از کامل ترین تعریف ها، Coyle پویایی سیستم را به صورت زیر تعریف کرده است (۵)، (۴): پویایی سیستم روش تحلیل مسایلی می باشد که در آن ها زمان یک عامل مهم است و در برگیرنده بررسی چگونگی واکنش و دفاع یک سیستم در برابر شوک هایی می باشد که از بیرون بر آن اعمال می شود.

در پویایی سیستم از چهار مؤلفه جهت ساخت مدل و نشان دادن روابط علت و معلولی استفاده می شود که عبارتند از ۱. انبارش ها (Stocks) یا متغیرهای حالت (State variables) ۲. جریان ها (Flows) ۳. پیکان ها یا اتصالات ۴. مبدل ها یا پارامترها (۱۸).

در فرایند توسعه مدل، تحلیل حساسیت یک ابزار بنیادی در ساخت، استفاده و درک مدل است (۹). در آزمون های تحلیل حساسیت، متغیرهای موجود در سیستم به دو دسته بسیار مهم و کم اثر تقسیم می شوند (۱۸). هدف معمول پژوهش با روش پویایی سیستم، درک چگونگی و علت پویایی مسایل و جستجوی سیاست های مدیریتی برای بهبود این وضعیت می باشد (۵).

فسفر واکنش گر محلول (Soluble Reactive Phosphorus یا SRP) از هیدرولیز کربن آلی محلول و تنفس زنجیره غذایی حاصل می شود و با جذب گیاهی کاهش می یابد. در این پژوهش برای مدل سازی آن از رابطه زیر استفاده شده است (۳):

$$V \frac{dp_s}{dt} = a_{pc} k_h(T) V C_d + a_{pd} k_{ra}(T) V a + a_{pc} k_{rh}(T) V z_h + a_{pc} k_{rc}(T) V z_c - a_{pd} k(T, n_t, p_s, I) V a \quad (7)$$

که در این رابطه a_{pa} نسبت فسفر به کلروفیل، a_{pc} نسبت فسفر به کربن، C_d کربن آلی غیر زنده محلول، K_{ra} افت های ناشی از تنفس و دفع در جلبک ها می باشند.

یون آمونیوم از طریق هیدرولیز کربن محلول آلی و از تنفس زنجیره غذایی حاصل می شود. این ماده از طریق جذب گیاهی و نیتریفیکاسیون کاهش می یابد (۱۸). رابطه زیر جهت مدل سازی بخش آمونیاک مدل استفاده شده است (۳):

$$V \frac{dn_a}{dt} = a_{nc} k_h(T) V C_d + a_{na} k_{ra}(T) V a + a_{nc} k_{rh}(T) V z_c - F_{am} a_{na} k_g(T, n_t, p_s, I) V a - k_n(T) V n_a \quad (8)$$

که در این رابطه F_{am} جزیی از نیتروژن غیر آلی است، که مطابق رابطه زیر، به وسیله جذب گیاهی کاهش می یابد (۳):

$$F_{am} = \frac{n_a}{k_{am} + n_a} \quad (9)$$

نیترات از طریق نیتریفیکاسیون حاصل می شود و با جذب توسط گیاهان کاهش می یابد. رابطه زیر جهت مدل سازی بخش نیترات مدل استفاده شده است (Chapra):

$$V \frac{dn_i}{dt} = k_n(T) V n_a - (1 - F_{am}) a_{na} k_g(T, n_t, p_s, I) V a \quad (10)$$

در این روابط V حجم، t زمان، a غلظت جلبک، anc نسبت نیتروژن به کربن، ana نسبت نیتروژن به کلروفیل، kg نرخ رشد جلبکی، Kn ثابت نیم اشباع نیتروژن، ni نیترات، na آمونیاک، nt نیتروژن غیر آلی کل $(n_a + n_i)$ ، T دما، Cd کربن آلی غیر زنده محلول، K_{ra} افت های ناشی از تنفس و

یکی از مراحل مهم توسعه یک مدل، نوشتن روابط ریاضی است. در یک سیستم بسته، موازنه جرم جلبک را می توان به صورت زیر نوشت (۳):

$$a = a_0 e^{K_g t} \quad (1)$$

که در این رابطه a غلظت جلبک و K_g نرخ رشد جلبکی است. با در نظر گرفتن عوامل محیطی محدود کننده، مانند غلظت مواد مغذی و مرگ و شکار، در حالت واقع بینانه تر این رابطه به صورت زیر در می آید (۳):

$$\frac{da}{dt} = K_g(T, N, I) a - K_d a \quad (2)$$

که در این رابطه $K_g(T, N, I)$ نرخ رشد به صورت تابعی از دما، مواد مغذی و نور است.

$$K_g(T, N, I) = K_{g,T} \phi_N \phi_L \quad (3)$$

در این رابطه $K_{g,T}$ نرخ رشد بیشینه است که در شرایط نور بهینه برای مواد مغذی و در یک دمای خاص روی می دهد. ϕ_N و ϕ_L فاکتورهای میرایی (Attenuation factors) برای نور و مواد مغذی محدود کننده است. جهت نشان دادن محدود کنندگی مواد مغذی روابط گوناگونی وجود دارد (۱۸). در این مطالعه از رابطه Michaelis-Menten استفاده شده است (۳):

$$\phi_N = \frac{N}{K_{SN} + N} \quad (4)$$

که در این رابطه N غلظت ماده مغذی و K_{SN} ثابت نیم اشباع ماده مغذی است. اما باید توجه کرد که تنها یک ماده مغذی محدود کننده نیست و ممکن است چند ماده محدود کننده باشند، بنابراین اثر آن ها را نیز در مدل باید دید.

پس از در نظر گرفتن کلیه عوامل مؤثر، در نهایت مدل کامل رشد فیتوپلانکتون را می توان به صورت زیر نوشت (۳):

$$K_g = K_{g,20} 1.066^{T-20} \left[\frac{2.718 f}{k_e H} (e^{-\alpha_i} - e^{-\alpha_0}) \right] \min \left(\frac{n}{k_{sn} + n}, \frac{p}{k_{pm} + p} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه n_t نیتروژن غیر آلی کل $(n_a + n_i)$ و T دما است.

- امکان سنجی شبیه سازی تغذیه گرای مخازن با روش پویایی سیستم.

روش ها

در پژوهش حاضر یک مدل تغذیه گرای با رویکرد پویایی سیستم ساخته شد. این مدل پارامترهای اصلی تغذیه گرای را مدل می کند. در این مدل، مخزن به دو لایه، اپیلمنیون و هیپولیمنیون تقسیم شده، هر لایه مخزن به صورت یک راکتور اختلاط کامل در نظر گرفته شده است. لایه ترموکلاین نیز به عنوان یک لایه گذار که وظیفه انتقال مواد در بین دو لایه دیگر را انجام می دهد، در مدل در نظر گرفته شده است. بنابراین غلظت متغیرها در هر لایه یکسان فرض شده است. همچنین مواد مغذی تأثیرگذار در رشد جلبکی فسفر، نیتروژن و کربن بود.

مراحل ساخت مدل با نرم افزار VenSim به صورت زیر بود:

نخست سیستم تغذیه گرای تعریف شده، تمام متغیرهای تأثیرگذار بر آن مشخص شدند. سپس طرح کلی سیستم به صورت ساده طراحی شد و مدل مفهومی تغذیه گرای تهیه گردید. در مرحله بعد این مراحل وارد کامپیوتر شد. یعنی متغیرهای سیستم در قالب چهار مؤلفه اصلی پویایی سیستم (متغیرهای حالت، مبدل ها و پارامترها) تعریف شده، هر کدام بر اساس نوعی که داشتند، روی صفحه طراحی VenSim ایجاد شدند. سپس با استفاده از پیکان ها و جریان ها روابط علت و معلولی بین اجزای سیستم به صورت ظاهری رسم شد. در این پروژه هشت متغیر حالت در نظر گرفته شده است که عبارت از غلظت های فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون های گیاهخوار و گوشتخوار، فسفر، نیترات، آمونیاک، کربن محلول و کربن معلق بودند. این متغیرها در دو سطح رولایه و زیرلایه شبیه سازی شدند. بنابراین تعداد متغیرهای حالت ۱۶ خواهد بود. این ۱۶ متغیر، پیکره اصلی مدل تغذیه گرای را تشکیل می دهند.

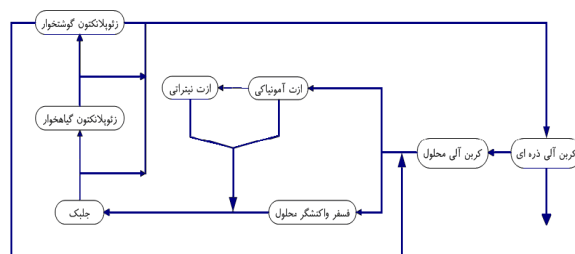
دفع در جلبک ها، I نور، Ps فسفر، Zc زئوپلانکتونهای گوشتخوار و Kam ثابت نیم اشباع برای تقدم آمونیاک است. در این پژوهش، روابط دیگری نیز برای مدل سازی دیگر عوامل مهم تأثیرگذار بر جلبک ها و تغذیه گرای استفاده شده است که به دلیل زیاد بودن تعداد آنها، در این مقاله به آنها اشاره نمی شود و در صورت لزوم می توان به منابع گفته شده در پایان مقاله مراجعه کرد (Chapra; Samaei; Vezjak et al). هدف اصلی این مطالعه، ساخت یک مدل مناسب جهت مدل سازی تغذیه گرای بوده است، که علاوه بر ساده بودن، بتواند با داشتن کمترین داده های ورودی وضعیت کلی یک مخزن را نیز ارزیابی کند. در این پژوهش، جهت مدل سازی تغذیه گرای از رویکردی نو، به نام پویایی سیستم، استفاده شد. در این رویکرد از روابط متداول تغذیه گرای استفاده گردید. یعنی از روابط متفاوتی با سایر مدل های تغذیه گرای استفاده نشده، بلکه از روش جدیدی جهت مدل سازی استفاده گردید و در نهایت یک مدل جدید ارائه شد. در این پژوهش از زبان برنامه نویسی VenSim، که یکی از ابزارهای پویایی سیستم می باشد، استفاده شد. بسیاری از سیستم های زیست محیطی مشخصات مشترکی دارند که با سود جستن از آن می توان رفتار سیستم را پیش بینی نمود و بر اساس آن به سهولت مدلی از سیستم طراحی کرد. هنر عمده در ساخت مدل سیستم های زیست محیطی، تشخیص این مشخصات و بهره گیری صحیح از اجزای سیستم (مثل ترکیب مناسبی از انبارش، جریان، مبدل و متصل کننده) می باشد.

به طور کلی مهم ترین اهداف این پژوهش، عبارتند بودند از:

- امکان سنجی کاربرد پویایی سیستم جهت مدل سازی کیفیت آب مخازن،
- ساخت یک مدل مناسب تغذیه گرای با روش پویایی سیستم، جهت مدل سازی کیفی مخازن،
- به کار بردن داده های موجود یک مخزن و تعیین مدل شبیه سازی کیفی آب در شرایط این مخزن جهت پیش بینی و تعیین مقادیر غذایی مخزن،

(Validation)، کالیبراسیون و اعتبارسنجی (Validation) بود (۱۲). برای نشان دادن کارایی این مدل و تأیید آن به داده‌های دقیقی نیاز بود. بنابراین از داده‌های مخزن لانگلیک در ایالات متحده استفاده شد (۱). پس از نوشتن روابط، مقادیر کمی و کیفی سال ۱۹۹۱ (از ۱۹۹۱/۶/۳ تا ۱۹۹۱/۱۱/۴) مخزن 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 لانگلیک کالیبره شد و آنالیز حساسیت در مورد ثابت‌ها انجام گردید. این آنالیز متغیرهای کم اثر را از متغیرهای تأثیرگذار جدا می‌کند. در آخرین مرحله با استفاده از داده‌های سال ۲۰۰۰ (ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۰۰)، مدل اعتبار سنجی گردید. داده‌های موجود مخزن لانگلیک از ۵ ایستگاه مختلف در اعماق گوناگون بود. چون در این پژوهش مخزن به صورت اختلاط کامل فرض شد، بنابراین از داده‌های کیفی سطحی تا عمق لایه اپیلیمنیون 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. تشخیص مرز بین لایه‌های مذکور نیز بر اساس نیمرخ دما در عمق مخزن صورت گرفت. ورودی‌های مدل شامل مقادیر غلظت فسفر واکنش‌گر محلول (SRP)، نیترات، نیتريت و فیتوپلانکتون است. از آن جا که شبیه‌سازی برای دو لایه اپیلیمنیون و هیپولیمنیون انجام می‌گیرد، بنابراین مقادیر ورودی و همچنین دما برای هر لایه در نظر گرفته شد. حرارت رولایه و زیرلایه به صورت مقادیر ماهیانه و به صورت نمودار در VenSim وارد گردید. ابعاد مخزن، مساحت لایه ترموکلاین، حجم رولایه و زیرلایه، دبی جریان ورودی و خروجی از مخزن و مقادیر غلظت‌های متغیرهای حالت نیز وارد مدل شد. در شکل ۲ شمایی کلی از مدل ساخته شده نشان داده شده است (۱۸).

در شکل ۱، مدل به صورت مفهومی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در این شکل تنها اثر مستقیم متغیرهای حالت بر هم نشان داده شده است.



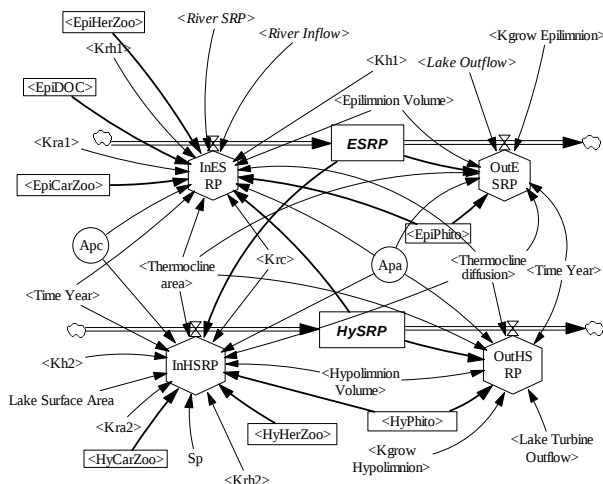
شکل ۱: قطعه‌بندی سنتیکی مدل تغذیه‌گرایی (Chapra)

در مرحله بعد، روابط ریاضی مربوط به هر ارتباط مشخص شد. برای این منظور نخست موازنه جرم برای هر کدام از متغیرهای حالت نوشته شد. در حالت کلی میزان تجمع هر ماده شیمیایی در مخزن را می‌توان به صورت زیر نوشت (۱۸):

بازتعلیق + ته‌نشینی - واکنش $\pm$ خروجی - ورودی = تجمع
ورودی نشان دهنده میزان آلاینده مورد نظر (آمونیاک یا نیترات) در جریان ورودی رودخانه است. جریان‌های ورودی به دریاچه لانگ شامل دو جریان بالادست از سد ناین‌مایل و رودخانه اسپوکان کوچک می‌باشد. خروجی نشان دهنده میزان آلاینده در جریان خروجی از سد می‌باشد. البته جاهایی که رابطه ریاضی قابل قبولی موجود نبود، رابطه‌ها با بهره‌گیری از نمودار تعریف شد. به طور مثال رابطه حجم - سطح - تراز مخزن به صورت نمودار حجم در برابر زمان و سطح در برابر زمان به مدل وارد گردید. سپس سری‌های زمانی مورد نیاز مدل تعریف شد. واحد سنجش زمان نیز به گونه‌ای تعیین شد که با روابط ریاضی مورد استفاده سازگار باشد. روابط ۶ تا ۱۰ برای بخش واکنش استفاده شده است.

سه گام مهم بعدی در روند مدل‌سازی عبارت از تأیید

معلولی و ارتباط پارامترهای مختلف متغیرهای حالت فیتوپلانکتون و فسفر می باشد، نشان داده شده است.

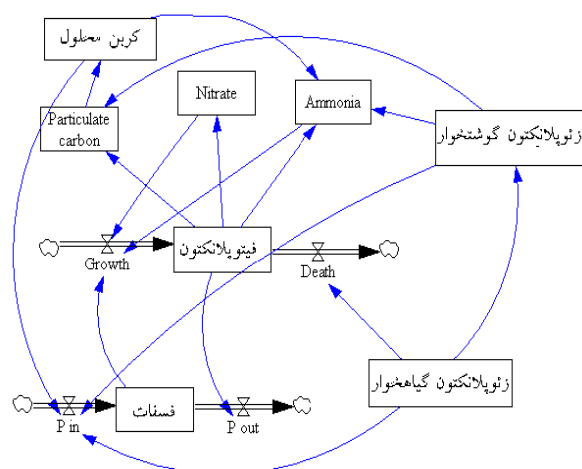


شکل ۴: شمای زیرمدل پویایی سیستم انبارش های فسفر در مدل تغذیه گرای

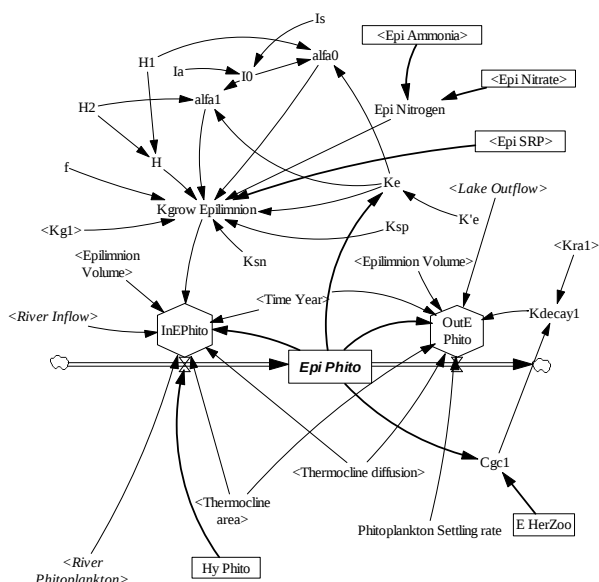
یافته ها

در نمودار ۱ و ۲ به ترتیب نتایج شبیه سازی فسفر در رولایه و زیرلایه با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه گردیده است. در آنالیز حساسیت مدل مشخص شد که اندکی تغییر در مقدار فسفر موجود، غلظت فیتوپلانکتون ها به شدت دچار تغییر می شود. این مطلب در مورد کربن و نیتروژن درست نبود. چنین نتیجه گرفته شد که فسفر، ماده مغذی محدود کننده است. در آنالیز حساسیت، ضرایب مربوط به نور را تغییر داده، معلوم شد که نور نیز عامل بسیار تأثیرگذاری است و یک پارامتر بسیار مهم مدل قلمداد می شود.

در آنالیز حساسیت مدل مشخص شد که اندکی تغییر در مقدار فسفر موجود، غلظت فیتوپلانکتون ها به شدت دچار تغییر می شود. این مطلب در مورد کربن و نیتروژن درست نبود. چنین نتیجه گرفته شد که فسفر، ماده مغذی محدود کننده است. در آنالیز حساسیت، ضرایب مربوط به نور را تغییر داده، معلوم شد که نور نیز عامل بسیار تأثیرگذاری است و یک پارامتر بسیار مهم مدل قلمداد می شود.

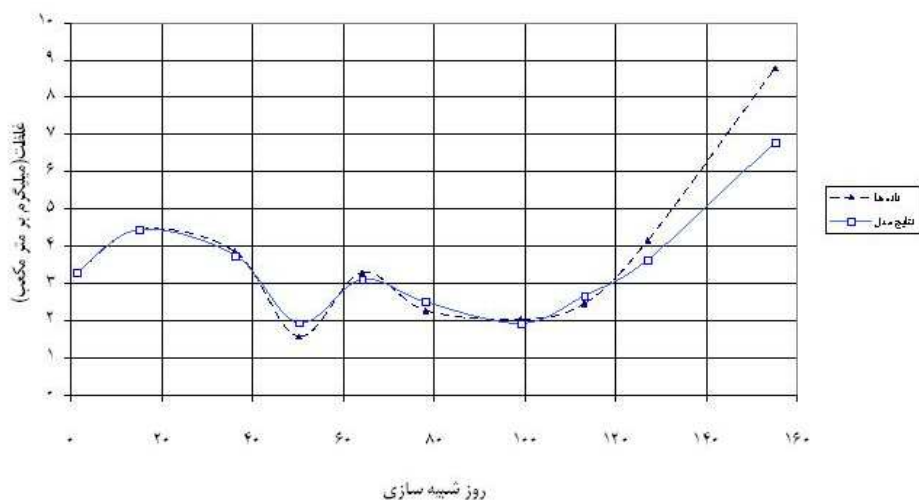


شکل ۲: نمای کلی مدل پویایی سیستم تغذیه گرای (Samaei et al)

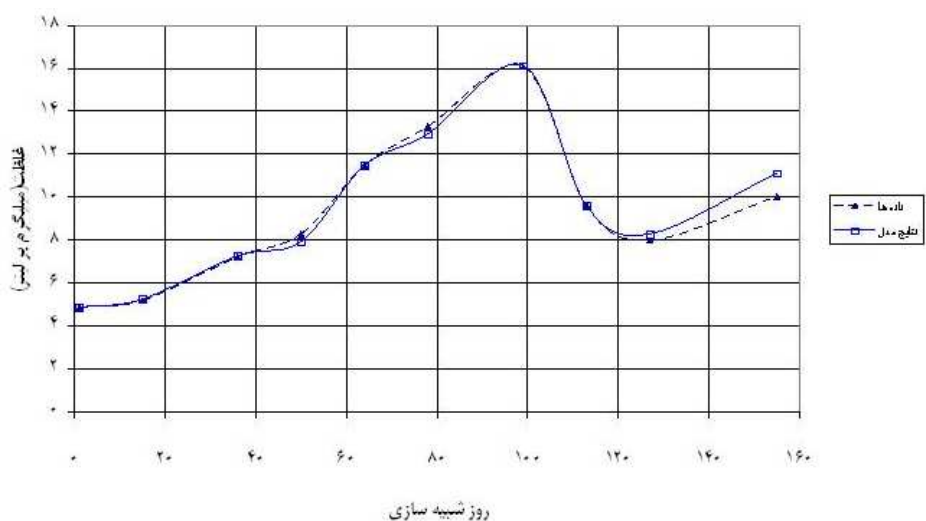


شکل ۳: شمای زیرمدل پویایی سیستم انبارش فیتوپلانکتون در رولایه

مستطیل ها نشان دهنده متغیرهای حالت می باشند. همان گونه که از شکل بالا مشاهده می شود در کل، ۸ متغیر حالت وجود دارد. هر کدام از این متغیرهای حالت یک زیرمدل را ایجاد می کنند. برای نمونه در شکل های ۳ و ۴ بخشی از زیرمدل مدل پویایی سیستم، که در برگزیده روابط علت و



نمودار ۱: مقایسه نتایج مدل سازی شده SRP در رولایه با داده های اندازه گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگلیک



نمودار ۲: مقایسه نتایج مدل سازی SRP در زیرلایه با داده های اندازه گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگلیک

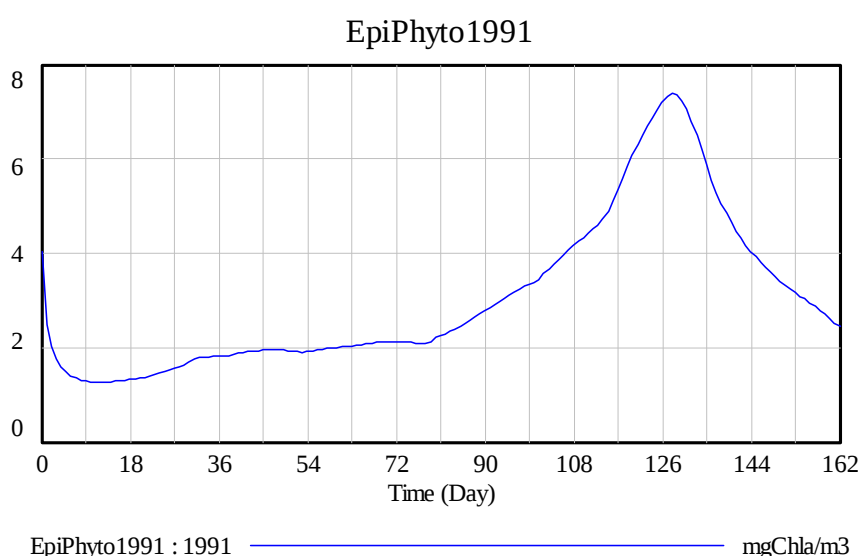
ضرایب در محدوده گفته شده، مقدار آن ضریب برای مخزن لانگلیک را به دست آمد، که در جدول مذکور آورده شده است.

نتایج مربوط به مدل سازی فیتوپلانکتون ها در شکل ۳ آمده است.

در جدول ۱ مقادیر ضرایب، نرخ ها و پارامترهای کالبراسیون در مدل تغذیه گرایی مخزن لانگلیک آورده شده است. در این جدول مقادیر متداول ضرایب از کتاب ها و مقالات مورد استفاده در پژوهش، به ویژه منبع ۳، استخراج شده و در مرحله کالبراسیون با تغییر دادن مقدار هر یک از

جدول ۱: مقادیر ضرایب، نرخ ها و پارامترهای کالیراسیون در مدل تغذیه گرایی مخزن لانگلیک

پارامتر	مقدار ضرایب کالیراسیون	مقدار متداول	واحد
K_{sn} (ثابت نیم اشباع نیتروژن)	۱۰	۰-۵۰۰	$mgNm^{-3}$
K_{sp} (ثابت نیم اشباع فسفر)	۵	۱-۳۰	$mgPm^{-3}$
K_{sa} (ثابت نیم اشباع جلبک)	۱۵		$mgChlam^{-3}$
Phito sett (میزان ته نشینی جلبک)	۰/۲		md^{-1}
K_{ra} (زوال ناشی از اثر ترکیبی تنفس و مدفوع)	۰/۰۹۹	۰/۰۰۱-۰/۱۷۱	day^{-1}



شکل ۳: نتایج مدل سازی فیتوپلانکتون در رولایه در سال ۱۹۹۱ لانگلیک

بحث

شامل سه قابلیت شبکه ای شدن، کاربر دوست بودن و هزینه پایین است.

مدل های پویایی سیستم امکان ارزیابی کلی وضعیت کیفی مخزن را میسر می سازند، بنابراین سرعت نتیجه گیری و انعطاف پذیری بسیار زیاد مدل را می توان از ویژگی های منحصر به فرد مدل های پویایی سیستم دانست. در صورت نیاز، جهت استفاده از مدل در مورد مخازن دیگر، افزودن پیچیدگی های بیشتر به مدل به راحتی قابل انجام است. همچنین در صورت در اختیار نداشتن برخی از مقادیر، می توان آن ها را از مدل حذف کرد.

امروزه مدل های توانمند در زمینه مسایل زیست محیطی باید از ویژگی های خاصی برخوردار باشند، تا در حل مناقشات بین رشته ها، گروه ها و سازمان های مؤثر بر کیفیت محیط زیست نقش مهمی را ایفا نمایند. یک مدل خوب باید دارای توانمندی، سازگاری و قابلیت دسترسی باشد (Samaei). توانمندی ها شامل قابلیت اجرایی مدل، بهره گیری از علوم جدید و توان رقابتی آن است. سازگاری، معرف میزان سازگاری مدل با دنیای بیرون است. قابلیت دسترسی مدل نیز

مطابق نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از مدل‌سازی فسفر در مدل پویایی سیستم انطباق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی فسفر دارد. همان گونه که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، فیتوپلانکتون‌ها یک شکوفایی تابستانه دارند. یعنی غلظت آن‌ها در تابستان به اوج رسیده، دوباره کاهش یافته است. دلیل آن می‌تواند نور زیاد و دمای بالا باشد. به نظر می‌رسد با توجه به این که 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 واکنش‌گر محلول و فسفر کل انجام شده، که در یک مورد آن از نمک‌های آلومینیوم جهت حذف انواع فسفر استفاده شده است و دوز مناسب آلومینیوم برای حذف SRP (با آزمایش جار) را بین ۲ تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر تعیین کرده است (۱).

به طور کلی پژوهش حاضر در برگیرنده نتایج زیر بوده است:

۱. مدل پویایی سیستم تغذیه‌گرایی نیاز به داده‌های کمتری در مقایسه با سایر مدل‌های موجود دارد. بنابراین مدل ارزانی بوده، می‌توان پاسخ‌های خوبی از آن به دست آورد.
۲. ماده مغذی محدود کننده 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.
۵. مدل‌های اکولوژیکی پویایی سیستم، اطلاعات مفیدی جهت مدیریت پیکره‌های آبی به دست می‌دهد، اما برای ارزیابی دقیق‌تر بهتر است از مدل‌های دو بعدی و بیشتر استفاده شود.

References

1. Auvray F, van Hullebusch ED, Deluchat V, Baudu M. Laboratory investigation of the phosphorus removal (SRP and TP) from eutrophic lake water treated with aluminium. *Water Res.* 2006; 40(14): 2713-9.
2. Bouraoui F, Grizzetti B. An integrated modelling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France). *Ecol Model.* 2008; 212(3-4): 450-9.
3. Chapra SC. *Surface water-quality modeling*. New York: McGraw-Hill; 1997.
4. Coyle RG. *Management system dynamics*. New York: Wiley; 1977.
5. Ford A, Ford FA. *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Washington, DC: Island Press; 1999.
6. Forrester JW. *Industrial dynamics*. Cambridge: MIT Press; 1961.
7. Geenen B. *Eutrophication of the Doroodzan reservoir in Iran [dissertation]*. Wageningen: Wageningen University and Research Centre; 1996.
8. Guo HC, Liu L, Huang GH, Fuller GA, Zou R, Yin YY. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. *J Environ Manag.* 2001; 61(1): 93-111.
9. Hense I, Burchard H. Modelling cyanobacteria in shallow coastal seas. *Ecol Model.* 2010; 221(2): 238-44.
10. Inkala A. *Modelling of Water Circulation and the Dynamics of Phytoplankton for the Analysis of Eutrophication [dissertation]*. Espoo: Helsinki University of Technology; 2001.
11. Inkala A, Pitkanen H. The effect of load reductions on algal biomass in the eastern Gulf of Finland- Modelling point of view. *Boreal Environ Res.* 1999; 4: 357-66.
12. Jørgensen SE, Bendoricchio G. *Fundamentals of ecological modelling*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier; 2001.

13. Keynejad MA, Ebrahimi S. Environmental Engineering. Tabriz: Sahand University of Technology; 1999. [In Persian].
14. Onderka M. Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir (Slovakia)--A simple regression model. *Ecol Model.* 2007; 209(2-4): 412-6.
15. Quiblier C, Leboulanger C, Sané S, Dufour P. Phytoplankton growth control and risk of cyanobacterial blooms in the lower Senegal River delta region. *Water Res.* 2008; 42(4-5): 1023-34.
16. Rivera EC, de Queiroz JF, Ferraz JM, Ortega E. Systems models to evaluate eutrophication in the Broa Reservoir, São Carlos, Brazil. *Ecol Model.* 2007; 202(3-4): 518-26.
17. Salacinska K, El Serafy GY, Los FJ, Blauw A. Sensitivity analysis of the two dimensional application of the Generic Ecological Model (GEM) to algal bloom prediction in the North Sea. *Ecol Model.* 2010; 221(2): 178-90.
18. Samaei MR. Eutrophication modeling with System Dynamics approach, Master of Science and Engineering in Civil and Environmental Engineering [dissertation]. Tehran: Iran University of Science and Technology; 2004. [In Persian].
19. Samaei MR. Nitrate and ammonia modeling in reservoirs with System Dynamics approach. 13th National Conference on Environmental Health. Kerman: Kerman University of Medical Science; 2011. [In Persian].
20. Samaei MR, Afshar A, Ahmadi Bargani M A. Eutrophication modeling in reservoirs with System Dynamics approach. 12th National Conference on Environmental Health. Tehran: Shahid Beheshti University of Medical Science; 2009. [In Persian].
21. Samaei MR, Afshar A, Gharavi M. System Dynamics Modeling of Phytoplankton and Zooplankton in Reservoirs. *Water and Wastewater.* 2005; 52: 47-55. [In Persian].
22. Vezjak M, Savsek T, Stuhler EA. System dynamics of eutrophication processes in lakes. *Eur J Oper Res.* 1998; 109(2): 442-51.
23. Zincke D. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton communities of lakes Atawapaskat, Michigan. *Journal of Atawapaskat Research.* 2004; 2: 1-6.

Using system dynamics approach to simulating eutrophication in artificial lakes

Mohammad Reza Samaei¹, Sayyed Bagher Mortazavi², Asghar Ebrahimi³, Ebrahim Shahsavani⁴

Abstract

Background: Nowadays the eutrophication of water bodies is enhanced due to discharge of effluents and runoffs. Therefore, there is a demand for the management of natural and artificial lakes to prevent or postpone this problem. Lakes eutrophication is a complex process. Therefore computerized models are very important tools to describe this process. Although there are several models for this, but these are not suitable for managing and overall assessment of water resources.

Methods: In this study a processing model was constructed. First the eutrophication system, parameters and characteristics were defined on Vensim. Then mathematical equations of each process was determined and entered to the system. Finally, the calibration and validation of the model was conducted by Long Lake reservoir data.

Findings: Based on the findings of this model major eutrophication variables include phosphorus, nitrogen, phytoplankton and zooplankton could be stimulated. The findings of calibration and validation of the model is pointed that this model can simulate eutrophication with minimum data.

Conclusion: it was indicated by the results that phosphorus is a limitation factor in reservoir. The unique properties of this model are its simplicity and minimum needs data.

Key words: Eutrophication, System Dynamics, Nutrients, Modeling, Long Lake.

1- Instructor, Department of Environment Health, School of Health and Nutrition, Shiraz University of Medical Science, Shiraz, Iran (Corresponding Author)

Email: mrsamaei@modares.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Occupational Health, School of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- PhD Student of Environmental Health Engineering, Environment Research Center, Isfahan University of Medical Sciences and Department of Environment Health Engineering, School of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Science, Yazd, Iran.

4- MSc Student, Department of Environment Health Engineering, School of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Science, Yazd, Iran.