استفاده از رویکرد پویایی سیستم جهت مدل‌سازی اوتریفیکاسیون در دریاچه‌های مصنوعی

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

چکیده

مقدمه: امروزه با ورود انواع پساب‌ها و رواناب‌ها به منابع آب، فرایند اوتریفیکاسیون یا تغذیه‌گرایی به شدت تسریع شده است. چنین است که نیاز به مدیریت دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی، به منظور پیش‌گیری یا به تعویق انداختن این مشکل، به وجود آمده است. تغذیه‌گرایی یک فرایند پیچیده است. یکی از ابزارهایی که در این زمینه می‌تواند ما را یاری کند، مدل‌سازی فرایند تغذیه‌گرایی می‌باشد. امروزه مدل‌های زیادی وجود دارد که این کار را انجام می‌دهد. نیاز به طیف وسیعی از داده‌ها، یادگیری مشکل و نیاز به زمان طولانی از مشکلات این مدل‌ها می‌باشد. امروزه جهت مدیریت تغذیه‌گرایی اغلب از ابزارهای کامپیوتری، به ویژه مدل‌سازی ریاضی بهره گرفته می‌شود.

روش‌ها: در این مقاله یک مدل فرایندی ساخته شد. نخست سیستم تغذیه‌گرایی، 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 داده‌های یک مخزن، کالیبره و تأیید شد. این مدل متغیرهای اصلی تغذیه‌گرایی را مدل می‌کند. این متغیرها شامل فسفر، نیتروژن، فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون است.

یافته‌ها: با بررسی نتایج حاصل از مدل، یک شکوفایی جلبکی مشاهده شد. در کالیبراسیون مدل، ثابت نیم اشباع نیتروژن برابر ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بر حسب نیتروژن، ثابت نیم اشباع فسفر برابر ۵ میلی‌گرم بر لیتر بر حسب فسفر به دست آمد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های مدل نشان داد که فسفر یک عامل محدود کننده در مخزن است. نتایج حاصله بیان‌گر آن است که در مقایسه با مدل‌های دیگر، استفاده از این مدل برای کاربر آسان‌تر بوده، با داشتن کمترین داده‌ها، نتایج مطلوب حاصل می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه‌گرایی، پویایی سیستم، مواد مغذی، مدل‌سازی، لانگ‌لیک، دریاچه‌های مصنوعی.

نوع مقاله: *تحقیقی*

دریافت مقاله: ۸۹/۲/۲ *پذیرش مقاله: ۸۹/۳/۱۹*

مقدمه

از آن جا که تغذیه‌گرایی مخازن یک فرایند پیچیده است، مدل‌های رایانه‌ای ابزار بسیار مهمی در تشریح این فرایند به شمار می‌روند (۱۸). هر چند که هیچ گاه مدل‌ها حاوی تمام مشخصه‌های سیستم واقعی نیستند، اما مهم است که مدل، آن دسته از مشخصه‌های 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 پایین نگه داشته شود، کالیبراسیون سریع‌تر و آسان‌تر خواهد بود (۱۱). پس جهت تعیین پارامترهای حیاتی مورد نیاز مدل، بایستی از واکنش‌های شیمیایی و زیستی موجود در این فرایندها شناخت کافی به دست آورد (۱۸، ۱۳).

اوتریفیکاسیون یا تغذیه‌گرایی فرایندی است که ناشی از غنی شدن منابع آب از فسفر و نیتروژن می‌باشد. دریاچه‌های مصنوعی یا دریاچه‌های پشت سدها، از نظر اکولوژی پیچیده و در عین حال پویا می‌باشند. این پیکره‌های آبی در تعامل با

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 حرفه‌ای، 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.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir

فعالیت‌های انسان قرار دارند (۱۶). با این که وجود مواد مغذی برای گیاهان و جانوران حیاتی می‌باشد، اما حضور مقدار زیاد آن‌ها می‌تواند کیفیت آب و حتی خاک را کاهش دهد. برای مثال دو ماده مغذی فسفر و نیتروژن موجب تغذیه‌گرایی در برکه‌ها و دریاچه‌ها می‌شوند (۲). پدیده تغذیه‌گرایی و به دنبال آن افزایش غلظت فیتوپلانکتون‌ها می‌تواند کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهد (۱۵). از ویژگی‌های عمده این پدیده می‌توان به شکوفایی جلبک‌های سبز یا آبی- سبز و همچنین نوسان شدید اکسیژن محلول در آب اشاره کرد. این فرایند محیط آب را برای زندگی ماهی‌ها و زئوپلانکتون‌ها تحمل ناپذیر می‌کند. دانشمندان بر این باورند که تغذیه‌گرایی می‌تواند ترکیب گونه‌های یک زیستگاه را تغییر دهد (۱۴).

تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد تغذیه‌گرایی صورت گرفته است. در ایران نیز چند پژوهش در این رابطه انجام شده است، که یکی از آن‌ها پژوهشی است که در مورد تغذیه‌گرایی مخزن سد درودزن فارس انجام شده است. نتایج این پژوهش بیان‌گر آن است که با وجود گزارش‌های پیشین در مورد وجود مقدار جلبک زیاد در این مخزن، وضعیت آن نامطلوب نمی‌باشد (۷). در پژوهشی دیگر در دانشگاه علم و صنعت ایران، تغذیه‌گرایی مخزن کرخه بررسی و مدل‌سازی شده است (۱۸).

در سال‌های گذشته غلظت زیاد جلبک در چند دریاچه ایران گزارش شده است که می‌تواند مخازن ایران را از نظر زیست محیطی با تهدیدی جدی مواجه کند (۷). از سویی دیگر، مسأله کمبود آب و خشک سالی‌های اخیر در ایران نشان می‌دهد که موضوع تغذیه‌گرایی و مدل‌سازی آن تا چه اندازه دارای اهمیت است و باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

استفاده گسترده از مدل‌های اکولوژیکی در مدیریت محیط زیست از حدود سال ۱۹۷۰ آغاز شد (۱۲). از این کارها می‌توان به مدل‌سازی تغذیه‌گرایی دریاچه Atawapaskat (Zincke) و خلیج فنلاند (۱۰) اشاره کرد. کار دیگری که به طور اختصاصی با رویکرد پویایی سیستم انجام شده است، مدل‌سازی تغذیه‌گرایی دریاچه گلوم‌سو در ترکیه می‌باشد که از Stella II به عنوان ابزار پویایی سیستم استفاده شده است. خروجی این مدل در بر گیرنده غلظت فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون و نیتروژن می‌باشد (Vezjak et al). در پژوهش دیگری که در چین، نیز از پویایی سیستم، مدل ErhaiSD، برای برنامه‌ریزی و مقابله با پدیده تغذیه‌گرایی استفاده شده است (۸). در آلمان شکوفایی سیانوباکتری‌ها در نواحی ساحلی کم‌عمق مدل‌سازی شده است (۹). همچنین پژوهشگران در هلند با استفاده از یک مدل اکولوژیک ژنریک، غلظت کلروفیل a و ترکیب فیتوپلانکتون‌ها را مدل‌سازی کرده‌اند (۱۷).

پویایی سیستم در میانه دهه ۱۹۵۰ در دانشکده مدیریت پژوهشگاه صنعتی ماساچوست (MIT) پایه‌گذاری شد و به تدریج گسترش پیدا کرد (۶). دانشمندان مختلف پژوهش‌های گوناگونی با این روش انجام داده، تعریف‌های مختلفی برای آن ارایه کرده‌اند. برای نمونه، در یکی از کامل‌ترین تعریف‌ها، Coyle پویایی سیستم را به صورت زیر تعریف کرده است (۵، ۴): پویایی سیستم روش تحلیل مسایلی می‌باشد که در آن‌ها زمان یک عامل مهم است و در برگیرنده بررسی چگونگی واکنش و دفاع یک سیستم در برابر شوک‌هایی می‌باشد که از بیرون بر آن اعمال می‌شود.

در پویایی سیستم از چهار مؤلفه جهت ساخت مدل و نشان دادن روابط علت و معلولی استفاده می‌شود که عبارتند از ۱. انبارش‌ها (Stocks) یا متغیرهای حالت (State variables) ۲. جریان‌ها (Flows) ۳. پیکان‌ها یا اتصالات ۴. مبدل‌ها یا پارامترها (۱۸).

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

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

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

$$a = a_0 e^{K_g t} \quad (۱)$$

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 بینانه‌تر این رابطه به صورت زیر در می‌آید (۳):

$$\frac{da}{dt} = K_g(T,N,I)a - K_d a \quad (۲)$$

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

$$K_g\ (T\ ،N\ ،I) = K_{g,T}\, \varnothing_N\, \varnothing_L \quad (۳)$$

در این رابطه $K_{g,T}$ نرخ رشد بیشینه است که در شرایط نور بهینه برای مواد مغذی و در یک دمای خاص روی می‌دهد. $\varnothing_L$ و $\varnothing_N$ 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).

$$\phi_N = \frac{N}{K_{SN} + N} \quad (۴)$$

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 آن‌ها را نیز در مدل باید دید.

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

$$K_g = K_{g,20}\, 1.066^{T-20}\left[\frac{2.718 f}{k_e H}\left(e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}\right)\right]\min\left(\frac{n}{k_{sn}+n}, \frac{p}{k_{pn}+p}\right) \quad (۶)$$

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

فسفر واکنش‌گر محلول (SRP یا Soluble Reactive Phosphorus) از هیدرولیز کربن آلی محلول و تنفس زنجیره غذایی حاصل می‌شود و با جذب گیاهی کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای مدل‌سازی آن از رابطه زیر استفاده شده است (۳):

$$V\frac{dp_s}{dt} = a_{pc}k_h(T)VC_d + a_{pa}k_{ra}(T)Va + a_{pc}k_{rh}(T)V_{zh} + a_{pc}k_{rc}(T)VZ_c - a_{pa}k(T,n_t,p_s,I)Va \quad (۷)$$

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} افت‌های ناشی از تنفس و دفع در جلبک‌ها می‌باشند.

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

$$V\frac{dn_a}{dt} = a_{nc}k_h(T)VC_d + a_{na}k_{ra}(T)Va + a_{nc}k_{rh}(T)VZ_c - F_{am}a_{na}k_g(T,n_t,p_s,I)Va - k_n(T)Vn_a \quad (۸)$$

که در این رابطه Fam جزیی از نیتروژن غیر آلی است، که مطابق رابطه زیر، به وسیله جذب گیاهی کاهش می‌یابد (۳):

$$F_{am} = \frac{n_a}{k_{am} + n_a} \quad (۹)$$

نیترات از طریق نیتریفیکاسیون حاصل می‌شود و با جذب توسط گیاهان کاهش می‌یابد. رابطه زیر جهت مدل‌سازی بخش نیترات مدل استفاده شده است (Chapra):

$$V\frac{dn_i}{dt} = k_n(T)Vn_a - (1-F_{am})a_{na}k_g(T,n_t,p_s,I)Va \quad (۱۰)$$

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، Kra افت‌های ناشی از تنفس و

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

دفع در جلبک‌ها، I نور، Ps فسفر، Zc زئوپلانکتونهای گوشتخوار و Kam ثابت نیم اشباع برای تقدم آمونیاک است.

در این پژوهش، 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 مراجعه کرد (Chapra; Samaei; Vezjak et al).

هدف اصلی این مطالعه، ساخت یک مدل مناسب جهت مدل‌سازی تغذیه‌گرایی بوده است، که علاوه بر ساده بودن، بتواند با داشتن کمترین داده‌های ورودی وضعیت کلی یک مخزن را نیز ارزیابی کند. در این پژوهش، جهت مدل‌سازی تغذیه‌گرایی از رویکردی نو، به نام پویایی سیستم، استفاده شد. در این رویکرد از روابط متداول تغذیه‌گرایی استفاده گردید. یعنی از روابط متفاوتی با سایر مدل‌های تغذیه‌گرایی استفاده نشده، بلکه از روش جدیدی جهت مدل‌سازی استفاده گردید و در نهایت یک مدل جدید ارایه شد. در این پژوهش از زبان برنامه‌نویسی VenSim، که یکی از ابزارهای پویایی سیستم می‌باشد، استفاده شد. بسیاری از سیستم‌های زیست محیطی 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 زیست محیطی، تشخیص این مشخصات و بهره‌گیری صحیح از اجزای سیستم (مثل ترکیب مناسبی از انبارش، جریان، مبدل و متصل‌کننده) می‌باشد.

به طور کلی مهم‌ترین اهداف این پژوهش، عبارتند بودند از:

- امکان‌سنجی کاربرد پویایی سیستم جهت مدل‌سازی کیفیت آب مخازن،
- ساخت یک مدل مناسب تغذیه‌گرایی با روش پویایی سیستم، جهت مدل‌سازی کیفی مخازن،
- به کار بردن داده‌های موجود یک مخزن و تعیین مدل شبیه‌سازی کیفی آب در شرایط این مخزن جهت پیش‌بینی و تعیین مقادیر غذایی مخزن،
- امکان‌سنجی شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخازن با روش پویایی سیستم.

روش‌ها

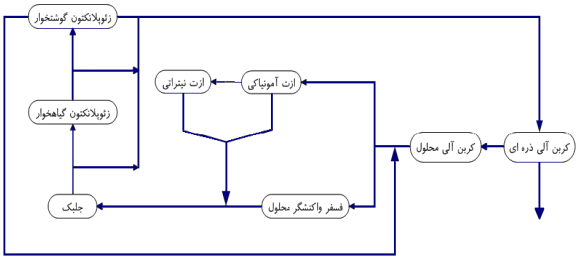
در پژوهش حاضر یک مدل تغذیه‌گرایی با رویکرد پویایی سیستم ساخته شد. این مدل پارامترهای اصلی تغذیه‌گرایی را مدل می‌کند. در این مدل، مخزن به دو لایه، اپیلیمنیون و هیپولیمنیون تقسیم شده، هر لایه مخزن به صورت یک رآکتور اختلاط کامل در نظر گرفته شده است. لایه ترموکلاین نیز به عنوان یک لایه گذار که وظیفه انتقال مواد در بین دو لایه دیگر را انجام می‌دهد، 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 نرم‌افزار VenSim به صورت زیر بود:

نخست سیستم تغذیه‌گرایی تعریف شده، تمام متغیرهای تأثیرگذار بر آن مشخص شدند. سپس طرح کلی سیستم به صورت ساده طراحی شد و مدل مفهومی تغذیه‌گرایی تهیه گردید. در مرحله بعد این مراحل وارد کامپیوتر شد. یعنی متغیرهای سیستم در قالب چهار مؤلفه اصلی پویایی سیستم (متغیرهای حالت، مبدل‌ها و پارامترها) تعریف شده، هر کدام بر اساس نوعی که داشتند، روی صفحه طراحی VenSim 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 متغیر حالت در نظر گرفته شده است که عبارت از غلظت‌های فیتوپلانکتون، زئوپلانکتون‌های گیاهخوار و گوشتخوار، فسفر، نیترات، آمونیاک، کربن محلول و کربن معلق بودند. این متغیرها در دو سطح رولایه و زیرلایه شبیه‌سازی شدند. بنابراین تعداد متغیرهای حالت ۱۶ خواهد بود. این ۱۶ متغیر، پیکره اصلی مدل تغذیه‌گرایی را تشکیل می‌دهند.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir

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 ± 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.

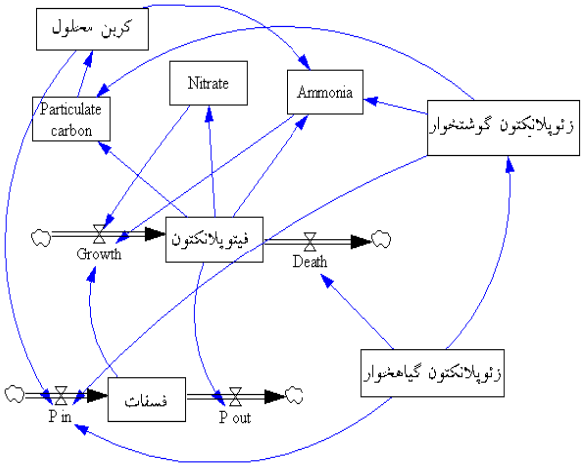
سه گام مهم بعدی در روند مدل‌سازی عبارت از تأیید (Verification)، کالیبراسیون و اعتبارسنجی (Validation) بود (۱۲). برای نشان دادن کارایی این مدل و تأیید آن به داده‌های دقیقی نیاز بود. بنابراین از داده‌های مخزن لانگ‌لیک در ایالات متحده استفاده شد (۱). پس از نوشتن روابط، مقادیر کمی و کیفی سال ۱۹۹۱ (از ۱۹۹۱/۶/۳ 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، نیتریت و فیتوپلانکتون است. از آن جا که شبیه‌سازی برای دو لایه اپیلمنیون 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.

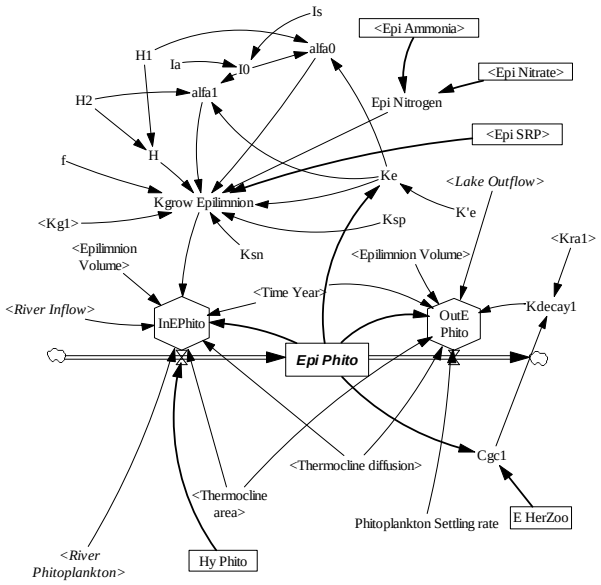
در شکل ۲ شمایی کلی از مدل ساخته شده نشان داده شده است (۱۸).

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

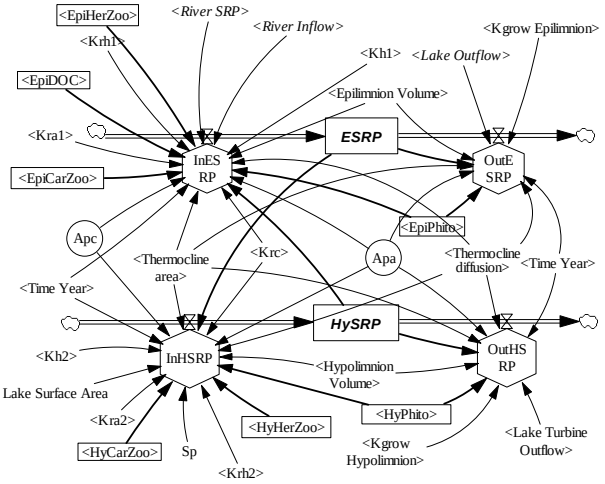


شکل ۲: نمای کلی مدل پویایی سیستم تغذیه‌گرایی (Samaei et al)



شکل ۳: شمای زیرمدل پویایی سیستم انبارش فیتوپلانکتون در رولایه

مستطیل‌ها نشان دهنده متغیرهای حالت می‌باشند. همان گونه که از شکل بالا مشاهده می‌شود در کل، ۸ متغیر حالت وجود دارد. هر کدام از این متغیرهای حالت یک زیرمدل را ایجاد می‌کنند. برای نمونه در شکل‌های ۳ و ۴ بخشی از زیرمدل مدل پویایی سیستم، که در برگیرنده روابط علت و معلولی و ارتباط پارامترهای مختلف متغیرهای حالت فیتوپلانکتون و فسفر می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۴: شمای زیرمدل پویایی سیستم انبارش‌های فسفر در مدل تغذیه‌گرایی

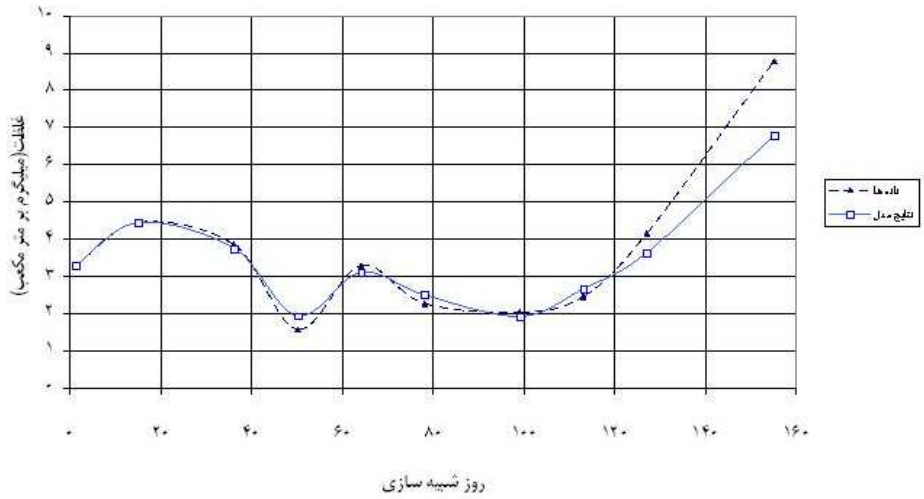
یافته‌ها

در نمودار ۱ و ۲ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی فسفر در رولایه و زیرلایه با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است.

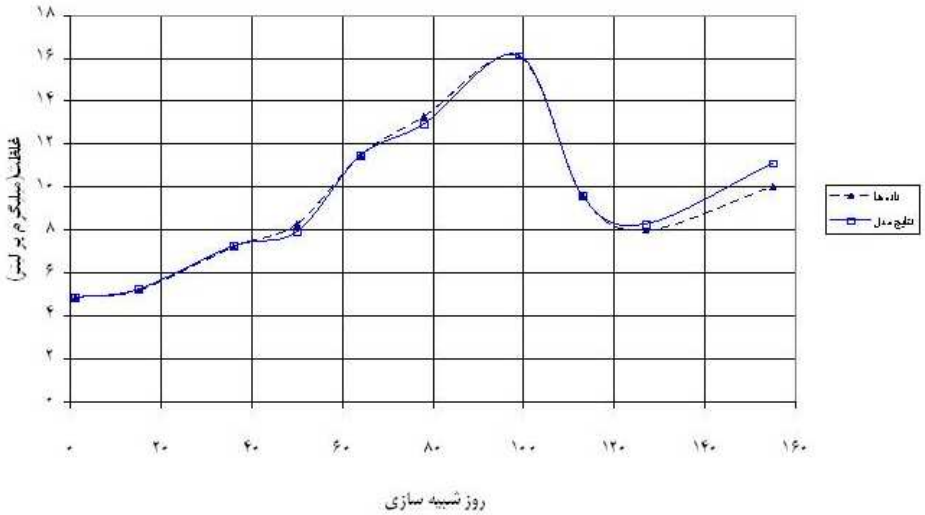
در آنالیز حساسیت مدل مشخص شد که اندکی تغییر در مقدار فسفر موجود، غلظت فیتوپلانکتون‌ها به شدت دچار تغییر می‌شود. این مطلب در مورد کربن و نیتروژن درست نبود. چنین نتیجه گرفته شد که فسفر، ماده مغذی محدود کننده است. در آنالیز حساسیت، ضرایب مربوط به نور را تغییر داده، معلوم شد که نور نیز عامل بسیار تأثیرگذاری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

در آنالیز حساسیت مدل مشخص شد که اندکی تغییر در مقدار فسفر موجود، غلظت فیتوپلانکتون‌ها به شدت دچار تغییر می‌شود. 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 می‌شود.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir



نمودار ۱: مقایسه نتایج مدل‌سازی شده SRP در رولایه با داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگ‌لیک



نمودار ۲: مقایسه نتایج مدل‌سازی SRP در زیرلایه با داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۹۹۱ لانگ‌لیک

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 پژوهش، به ویژه منبع ۳، استخراج شده و در مرحله کالیبراسیون با تغییر دادن مقدار هر یک از ضرایب در محدوده گفته شده، مقدار آن ضریب برای مخزن لانگ‌لیک را به دست آمد، که در جدول مذکور آورده شده است.

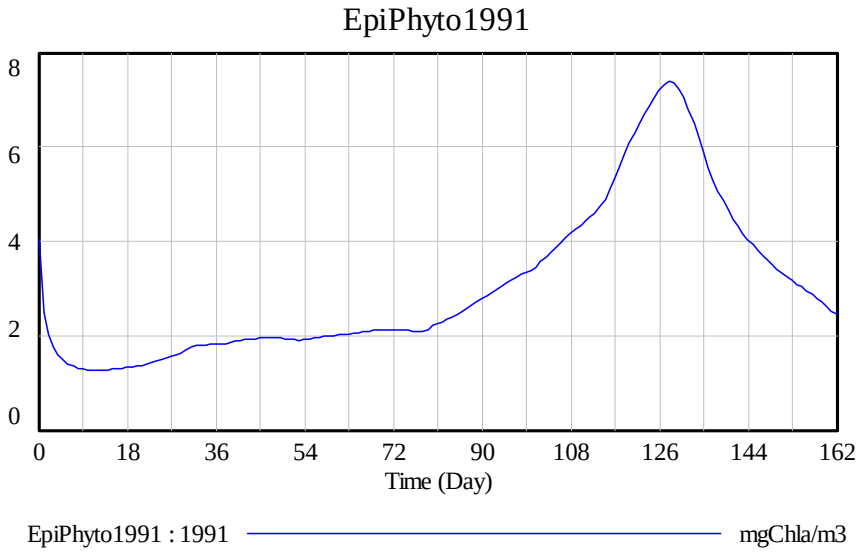
نتایج مربوط به مدل‌سازی فیتوپلانکتون‌ها در شکل ۳ آمده است.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

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

پارامتر	مقدار ضرایب کالیبراسیون	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 ته‌نشینی 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 مدل‌سازی فیتوپلانکتون در رولایه در سال ۱۹۹۱ لانگ‌لیک

بحث

امروزه مدل‌های توانمند در زمینه مسایل زیست محیطی باید از ویژگی‌های خاصی برخوردار باشند، تا در حل مناقشات بین رشته‌ها، گروه‌ها و سازمان‌های مؤثر بر کیفیت محیط زیست نقش مهمی را ایفا نمایند. یک مدل خوب باید دارای توانمندی، سازگاری و قابلیت دسترسی باشد (Samaei). 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، کاربر دوست بودن و هزینه پایین است.

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.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir

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.

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).

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.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

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. Euthrophication 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, GharaviM. 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 euthrophication 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.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

Using system dynamics approach to simulating eutrophication in artificial lakes

***Mohammad Reza Samaei*[1], *Sayyed Bagher Mortazavi*[2], *Asghar Ebrahimi*[3], *Ebrahim Shahsavani*[4]**

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 euthrophication 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 euthrophication 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 euthrophication 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.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir