

توسعه‌ی شبیه‌پویای شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر در دریاچه‌ها (مطالعه‌ی موردی: دریاچه‌ی اونتاریو)

حمید عبدالآبادی^{۱*}، امین سارنگ^۲، سیاوش بصام^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۶

چکیده

چرخه‌ی مواد سازوکاری را به‌وجود می‌آورد که از طریق آن مواد مغذی، و سایر اجزاء سازنده‌ی حیات، در دسترس موجودات زنده قرار می‌گیرند. عدم کارکرد صحیح این چرخه می‌تواند موجب بروز اختلال در چرخه‌ی حیات موجودات زنده گردد. در این مقاله، جریان پویای فسفر، که ماده‌ای ضروری برای رشد گیاهان است، در سه حالت فسفر موجودات سازنده (آلی)، فسفر موجودات مرده (آلی) و فسفر غیر آلی، بررسی گردید. با توجه به اثرات بازخوردی میان این سه متغیر حالت، نخست مدل شبیه‌سازی فسفر و فیتوپلانکتون با رویکرد پویایی سامانه‌ها، و با لحاظ معادلات حاکم، بازخوردها و جریانهای ورودی و خروجی توسعه یافت. سپس، رفتار هر یک از متغیرهای حالت، در دریاچه اونتاریو و با مقیاس زمانی یک‌ساله، بررسی و تحلیل شد. نتایج نشان دادند که مدل دارای کارایی مطلوبی در شبیه‌سازی و تخمین غلظت فراسنج‌ها است. هم‌چنین، تاثیر شرایط لایه‌بندی و اختلاط کامل دریاچه بر غلظت متغیرها بسیار زیاد بوده، و آنها را در دو دوره‌ی زمانی (روز ۱۰۰ تا ۱۵۸ و روز ۳۱۵ تا ۳۳۵)، تحت تاثیر خود قرار می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: چرخه‌ی فسفر - پویایی سامانه‌ها - فیتوپلانکتون - دریاچه‌ی اونتاریو

^۱ - دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست (منابع آب)؛ دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

^۲ - عضو هیئت علمی و استادیار دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران

^۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

* - نویسنده مسئول مقاله: h.abdolabadi@ut.ac.ir

مقدمه

چرخه‌ی مواد (چرخه‌ی زیست‌شیمیایی) فرایندی است که از طریق آن مواد مغذی و سایر ترکیبات در زیست بوم از شکلی به شکل دیگر تبدیل می‌شوند. حیات زیست بوم وابسته به چرخه‌ی این مواد است و بدون آن موجودات زنده قادر به یافتن مواد مغذی ضروری برای حفظ بقای خود نخواهد بود (فالمی، ۱۹۹۶).

فرایندهای متعددی مانند کارمایه‌ی خورشیدی، نیروی جاذبه و زنجیره‌ی تولیدکننده- مصرف‌کننده- تجزیه‌کننده، بر چرخه‌ی مواد تأثیر می‌گذارند. در این میان، کارمایه‌ی خورشیدی بیشترین تأثیر را دارد. خورشید کارمایه‌ی لازم را برای گیاهان (تولیدکننده‌ها) فراهم می‌کند، و آنها این کارمایه را در فرایند سوخت و ساز نوری به کار می‌برند (دیتان و واینبرک، ۲۰۰۰). در عملیات سوخت و ساز نوری، گیاهان نور، کربن دی‌اکسید و مواد مغذی کانی را برای ایجاد ترکیبات پیچیده‌تری از کربن، که به عنوان کارمایه‌ی ذخیره گردیده برای رشد استفاده می‌شود، با هم ترکیب می‌کنند. مصرف‌کنندگان این تولیدکنندگان را می‌خورند و ترکیبات پیچیده‌ی موجود در آن را به منظور کسب کارمایه‌ی و مواد مغذی لازم برای ادامه حیات می‌شکنند. پس از مرگ مصرف‌کنندگان، تجزیه‌کنندگان، مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان مرده را به مواد مغذی اولیه تجزیه می‌کنند، و این مواد را به محیط باز می‌گردانند. به محض این که مواد مغذی به ساده‌ترین شکل تبدیل شدند، قابل استفاده مجدد به‌وسیله‌ی تولیدکنندگان می‌باشند (دیتان و واینبرک، ۲۰۰۰؛ رالی و راش، ۲۰۰۴).

چرخه‌ی ابتدایی مواد موجود در محیط کاملاً پیچیده بوده، و هر یک جریانهایی را در خود دارد که مواد را به حالت‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی تبدیل می‌کند. به عنوان مثال، مواد ممکن است حالت‌های فیزیکی مختلفی اعم از جامد، مایع و یا گاز داشته باشند. عناصر مشترکی در چرخه‌ی مواد مغذی وجود دارد؛ که شامل: انباری مربوط به موجودات زنده (که به موجب آن مواد مغذی در موجودی به حالت زنده یافت می‌شود)، فرایند مرگ و میر (که مواد را از حالت زنده به حالت مرده

تبدیل می‌کند) و فرایند تجزیه (که به‌وسیله‌ی آن باکتریها مواد مرده را به حالت مواد اولیه‌ی کانی در می‌آورند) می‌شود (فالمی، ۱۹۹۶؛ فلین، ۲۰۱۰).

پدیده‌ی تغذیه‌گرایی یکی از عمده‌ترین مشکلات کیفی پیکره‌های آبی می‌باشد. تغذیه‌گرایی به معنای رسیدن بیش از حد مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) به پیکره‌های آبی، و به تبع آن، رشد بی‌رویه‌ی گیاهان آبی تا حدی است که کیفیت آب را کاهش داده و بوم‌نظام آبی و حیات جانداران را به مخاطره اندازد (سمایی و همکاران، ۱۳۸۳؛ سانچز کارلیو و همکاران، ۲۰۰۷). در این راستا، بررسی و تحلیل رفتار و تغییرات کیفی آب دریاچه‌ها به عنوان یکی از منابع اصلی آب شیرین، بر اثر شرایط محیطی و اقلیمی و ورود منابع آلاینده، از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و باید مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به این که در اکثر مطالعات انجام شده در ارتباط با تغذیه‌گرایی، فسفر ماده‌ی اصلی محدودکننده‌ی رشد گیاهان شناخته شده است، بنابراین، تحلیل و بررسی چرخه‌ی فسفر در پیکره‌های آبی از اهمیت بسزایی برخوردار است (عبدل‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ زینک، ۲۰۰۴).

استفاده از شبیه‌های شیء‌گرا در تحلیل مسائل پیچیده در سالهای اخیر بسیار عمومیت یافته است (اوزکانداکی و همکاران، ۲۰۱۱). این شبیه‌ها، همراه با ارتباط آسان با کاربر و نرم افزارهای مدیریت داده، چارچوب انعطاف‌پذیری را برای ساختن شبیه‌های مطالعاتی سامانه‌های پیچیده ایجاد می‌کنند (سیمونویچ و احمد، ۲۰۰۰). رویکرد تحلیل پویایی سامانه، روشی برپایه‌ی بازخورد بوده، که برای شبیه‌سازی سامانه‌های پویا در مقایسه با روشهای قدیمی بسیار مناسب است و به توصیفات ریاضی پیچیده نیازی ندارد. از جمله نقاط قوت این روش شبیه‌سازی می‌توان به افزایش سرعت توسعه‌ی مدل، افزایش اعتماد به شبیه، امکان توسعه و ارتباط مؤثر با نتایج اشاره نمود (لوکس و همکاران، ۱۹۸۸؛ سیمونویچ و فهمی، ۱۹۹۹).

با توجه به تواناییهای رویکرد پویایی سامانه‌ها، محققین زیادی از آن برای توسعه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی، ارزیابی دراز مدت کیفی منابع آب، تحلیل

مسأله مورد نظر رسم شده، سپس با استفاده از مؤلفه‌های انبارش، جریان، پیکانها و مبدلها، نمودار شبیه ترسیم می‌گردد. در ادامه، معادلات و روابط حاکم بر متغیرها به شبیه ترسیم گردیده منتقل می‌شود، و در نهایت، با تعیین افق زمانی و گام زمانی مورد نظر، شبیه‌سازی با حل معادلات با استفاده از روشهای عددی انجام می‌گیرد. در این مقاله، از نرم افزار Vensim به عنوان نرم افزاری توانمند و در عین حال ساده، جهت شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر استفاده گردید، و معادلات حاکم به روش رانگ کوتا درجه‌ی چهار حل شد. شکل ۱، نمودار علی و معلولی چرخه‌ی فسفر را نمایش می‌دهد.

مطابق شکل مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت فیتوپلانکتون (موجودات سازنده)، غلظت فسفر واکنشگر محلول بر اثر مصرف شدن به‌وسیله‌ی فیتوپلانکتون‌ها به عنوان ماده‌ی مغذی، کاهش می‌یابد. با کاهش یافتن غلظت آنها (غلظت مواد مغذی)، غلظت فیتوپلانکتون به دلیل عدم تامین کافی مواد مغذی، کاهش می‌یابد. بنابراین، چرخه‌ی ۱ به عنوان چرخه‌ی متعادل ساز شناخته شده، و این چرخه‌ی موجب مهار کردن رشد فیتوپلانکتون می‌شود. چرخه‌ی ۲ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت فیتوپلانکتون، غلظت فسفر ذره‌ای به علت تجزیه‌ی فیتوپلانکتون‌ها افزایش می‌یابد، که در نتیجه، تجزیه‌ی خود آنها غلظت فسفر واکنشگر محلول افزایش یافته، و در نهایت موجب افزایش غلظت فیتوپلانکتون می‌گردد.

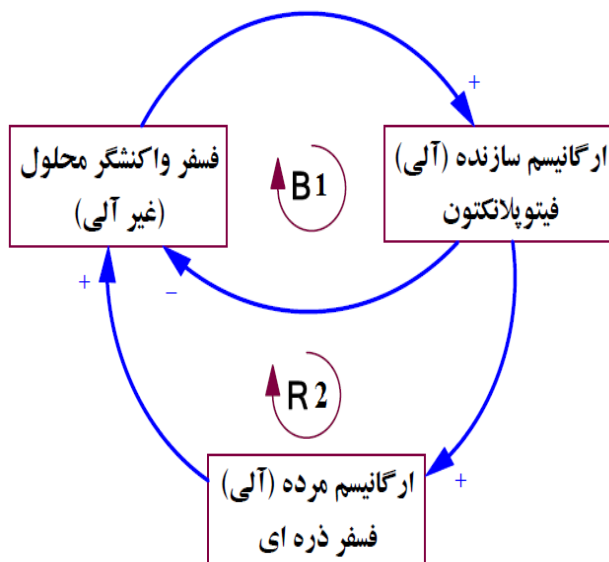
سیاستهای اعمالی مدیریت کیفی در حوضه‌ی رود، تامین تقاضای آب و بهره برداری از مخازن چندمنظوره استفاده کرده‌اند (گین، ۱۹۹۶؛ وزجاک و همکاران، ۱۹۹۸؛ فلین و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین، در ارتباط با شبیه‌سازی غلظت فسفر در مخزن سد شبیه‌هایی توسعه یافته‌اند (کاراموز و همکاران، ۱۳۸۷). نکته‌ی قابل توجه این است که در هیچ یک از تحقیقات صورت گرفته، چرخه‌ی فسفر به صورت کامل مورد ارزیابی و بررسی قرار نگرفته است.

هدف از انتخاب رویکرد پویایی سامانه در این تحقیق، درک صحیح روند رفتار چرخه‌ی فسفر در دریاچه هنگام وقوع لایه‌بندی و اختلاط کامل، در مقیاس زمانی یک‌ساله است.

اصول و روش‌ها

توصیف مدل

شبیه‌سازی شیء گرا مبتنی بر مفاهیم پویایی سامانه‌ها، یک رویکرد جامع‌گرایانه است که توانایی شبیه‌سازی ساختار و رفتار اجزاء یک سامانه‌ی پیچیده را دارد (فارستر و سینگ، ۱۹۸۰). رویکرد پویایی سامانه بر پایه‌ی روابط بازخوردی میان متغیرهاست. سامانه‌های بازخوردی متاثر از رفتار گذشته خود می‌باشند. این سامانه‌ها ساختار حلقه‌ای بسته‌ای دارند که نتایج را از فعالیتهای گذشته گرفته و در فرایندهای آینده استفاده می‌کنند (استرمن، ۲۰۰۰). شبیه‌های پویایی سامانه، رفتار سامانه‌های پیچیده را در طول زمان شبیه‌سازی می‌کنند. در این شبیه‌ها، نخست نمودار علی و معلولی



شکل ۱- نمودار علی و معلولی متغیرهای چرخه‌ی فسفر.

جدول ۱- مشخصات و مقادیر فراسنجه‌های استفاده شده در معادلات حاکم بر چرخه‌ی فسفر (چاپرا، ۱۹۹۷).

فراسنجه	نماد	مقدار	واحد	فراسنجه	نماد	مقدار	واحد
نرخ رشد فیتوپلانکتون	K_u	۲	d^{-1}	ضرب پخش	U_t		
عامل تصحیح دما	θ	۱/۰۶۶		لایه‌بندی تابستان		۰/۱۳	$cm^2.s^{-1}$
نرخ زوال (تنفس، چرا و دفع)	K_{ra}	۰/۰۲۵	d^{-1}	زمستان		۱۳	
سرعت سقوط جلبک	v_a	۰/۲	$m.d^{-1}$	آغاز لایه‌بندی تابستان		۱۰۰	d
سرعت سقوط فسفر ذره‌ای	v_p	۰/۲	$m.d^{-1}$	حاکم شدن لایه‌بندی		۵۸	d
نرخ تجزیه‌ی فسفر ذره‌ای	K_r	۰/۱	d^{-1}	آغاز اختلاط		۳۱۵	d
فیتوپلانکتون	a		$mgChla/m^3$	پایان لایه‌بندی		۲۰	d
فسفر واکنشگر محلول	P_s		mgP/m^3	حجم رولایه	V_e	$۲۵۴ * 10^9$	m^3
فسفر ذره‌ای	P_n		mgP/m^3	حجم زیرلایه	V_h	$۱۳۸ * 10^{10}$	m^3
سطح ترموکلاین	A_t	$۱۸۵ * 10^8$	m^2	عامل تبدیل فسفر به جلبک	a_{pa}	۱	$\frac{mgP}{mgChla}$

شبیه چرخه‌ی فسفر

در این مقاله، جهت شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر، دریاچه با توجه به لایه‌بندی حرارتی به دو بخش رولایه و زیرلایه تقسیم شد، و به‌وسیله‌ی فرایندهای پخشیدگی و ته‌نشینی ارتباط میان آنها برقرار گردید. معادلات شماره (۱) و (۲)، رابطه‌ی موازنه‌ی جرمی حاکم بر شبیه می‌باشند که برای متغیرهای حالت سامانه در رولایه و زیرلایه بسط داده شده‌اند (چاپرا، ۱۹۹۷). جدول ۱،

مشخصات و مقادیر فراسنجه‌های استفاده شده را در معادلات حاکم بر چرخه‌ی فسفر نمایش می‌دهد. پسوند e و h به ترتیب نشان دهنده‌ی فراسنجه‌ها در رولایه و زیرلایه است. لازم به ذکر است که ضرایب نهایی فراسنجه‌های نشان داده شده در جدول پس از واسنجی و صحت‌سنجی شبیه تعیین گردیده‌اند. این مقادیر پس از سعی و خطای زیاد، و با تغییر میزان فراسنجه‌ها در بازه‌های پیشنهاد شده، و بررسی نحوه‌ی تغییرات مقادیر

۱۹۹۷). شکل ۲ نمودار حالت جریان مدل شبیه‌سازی فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه را نمایش می‌دهد.

فسفر غیر واکنشگر محلول^۲ (ذره‌ای)

در این مقاله فسفر به دو بخش فسفر واکنشگر محلول و فسفر غیر واکنشگر محلول تقسیم می‌گردد. این تقسیم‌بندی پایه‌ای کاربردی داشته، و دلیل آن را می‌توان نحوه‌ی اندازه‌گیری غلظت فسفر در پیکره‌های آبی دانست. در اکثر موارد، غلظت فسفر در دو حالت فسفر واکنشگر محلول و فسفر کل اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف بین این دو مقدار، غلظت فسفر غیر واکنشگر محلول را تعیین می‌کند. با توجه به این‌که غلظت فسفر محلول در انباره‌ی فسفر غیر واکنشگر اندک می‌باشد، بنابراین، از آن مقدار می‌توان صرف نظر نموده و غلظت فسفر غیر واکنشگر را با غلظت فسفر ذره‌ای برابر دانست. فسفر ذره‌ای از تجزیه‌ی فیتوپلانکتون به‌دست آمده و با فرایندهای تجزیه، ته‌نشینی و زوال غلظت آن تنظیم می‌گردد. در نهایت، فسفر ذره‌ای به فسفر واکنشگر محلول تبدیل می‌شود. معادلات (۵) و (۶) روابط حاکم بر فسفر غیر واکنشگر محلول را در رولایه و زیرلایه دریاچه نشان می‌دهند (چاپرا، ۱۹۹۷).

$$V_e \frac{dP_{ne}}{dt} = W_{ne} - QP_{ne} + a_{pa} K_{rae} V_e a_e - K_{re} V_e P_{ne} + v_t A_t (P_{nh} - P_{ne}) - v_p A_t P_{ne} \quad (5)$$

$$V_h \frac{dP_{nh}}{dt} = W_{nh} + a_{pa} K_{rah} V_h a_h - K_{rh} V_h P_{nh} - v_p A_t P_{nh} + v_p A_t P_{ne} + v_t A_t (P_{ne} - P_{nh}) \quad (6)$$

محاسباتی و مشاهداتی در ماههای مختلف، با توجه به رفتار شبیه به دست آمده‌اند.

$$V_e \frac{dc_e}{dt} = W - Qc_e + v_t A_t (c_h - c_e) \pm S_e \quad (1)$$

$$V_h \frac{dc_h}{dt} = v_t A_t (c_e - c_h) \pm S_h \quad (2)$$

حجم دریاچه

یکی از موثرترین فراسنجهای کیفی در شبیه‌سازی پیکره‌های آبی، حجم دریاچه، و در نتیجه‌ی آن به‌دست آوردن حجم رولایه و زیر لایه با توجه به نیمرخ لایه‌بندی حرارتی می‌باشد. مقادیر حجم رولایه و زیرلایه در جدول ۱ ذکر گردیده‌اند.

فیتوپلانکتون^۱

جلبکها یکی از فراسنجهای مهم در بررسی وضعیت کیفی و تغذیه‌گرایی مخازن می‌باشند. پویایی مواد مغذی و جلبک به یکدیگر وابسته بوده، و تنفس جلبکی، چرای زئوپلانکتونی و زوال چرخه‌ی اصلی پویای فسفر را تشکیل می‌دهد. رشد فیتوپلانکتونها تابع عوامل دما، نور، غلظت مواد مغذی، غلظت جلبک و زئوپلانکتون‌ها می‌باشد. در این پژوهش، غلظت جلبک به صورت غلظت کلروفیل a و فرایندهای تنفس، زوال و چرای زئوپلانکتونی، در قالب فراسنج K_{ra} در نظر گرفته شده است. روابط (۳) و (۴)، معادلات حاکم بر فرایند رشد فیتوپلانکتون می‌باشند. برای زیرلایه‌ی دریاچه، غلظت فیتوپلانکتون را می‌توان به‌وسیله‌ی در نظر گرفتن مقدار ته‌نشین شده از لایه‌ی سطحی، و اثر پخشیدگی بین دو لایه، محاسبه کرد (چاپرا، ۱۹۹۷).

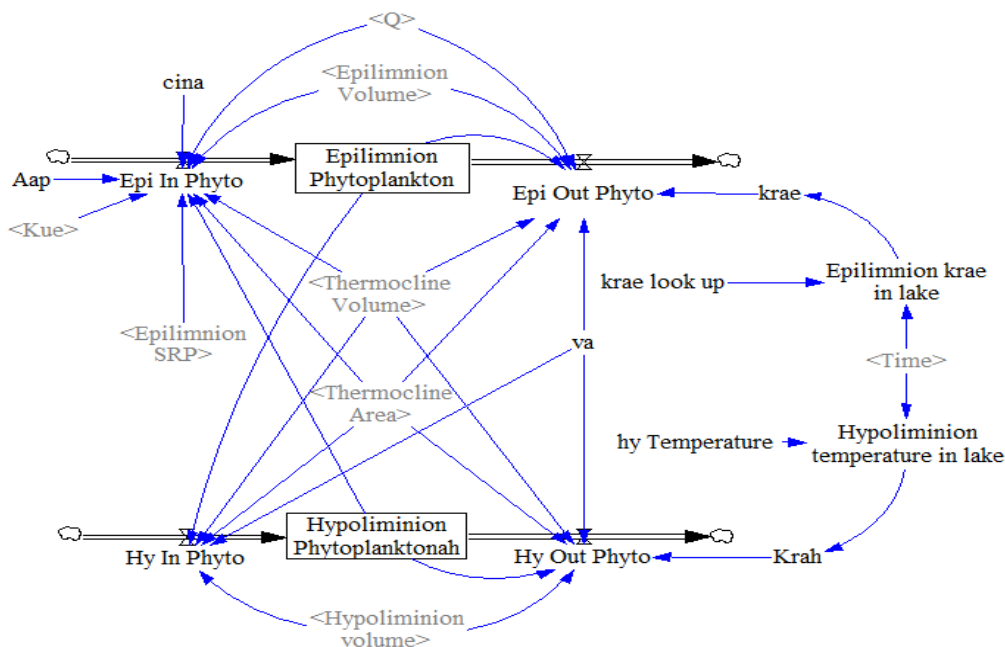
$$V_e \frac{da_e}{dt} = W - Qa_e + K_{ue} V_e a_e - K_{rae} V_e a_e + v_t A_t (a_h - a_e) - v_a A_t a_e \quad (3)$$

$$V_h \frac{da_h}{dt} = -K_{rah} V_h a_h + v_t A_t (a_e - a_h) + v_a A_t a_e - v_a A_t a_h \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴)، اثر دما بر رشد فیتوپلانکتون با کاربرد رابطه‌ی وانتروف-آرنیوس در مورد فراسنجهای K_{ra} و K_{u} در نظر گرفته شده است (چاپرا،

² - non-soluble reactive phosphorus (SRP)

¹ - phytoplankton



شکل ۲- نمودار - حالت جریان فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه.

کبیر، دارد (کریستی، ۱۹۹۷). شکل ۴ نمای کلی از محدوده‌ی این دریاچه را نشان می‌دهد. ویژگی‌های کلی دریاچه در جدول ۲ ارائه گردیده، و مشخصات استفاده شده در جدول ۱، تکمیل کننده‌ی این اطلاعات می‌باشند.

اطلاعات ورودی شبیه

به منظور انجام شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر به صورت روزانه، و به مدت یک‌سال، داده‌های مورد نیاز تعیین و جمع‌آوری شدند. این داده‌ها شامل، بار ورودی، مقدار اولیه‌ی متغیرهای حالت، ضرایب استوکیومتری، حجم رولایه و زیرلایه دریاچه، ضریب پخش، مساحت ترموکلاین و بدهی خروجی می‌شوند. به علت نبودن داده‌های مناسب و کامل برای نمونه مورد مطالعه داخلی، از داده‌های دریاچه‌ی اونتاریو استفاده شد. بدین ترتیب، با اتمام مرحله‌ی جمع‌آوری و ورود اطلاعات، شبیه‌سازی از یک ژانویه به صورت روزانه و به مدت یک‌سال آغاز گردید.

تحلیل حساسیت و صحت سنجی

جهت تحلیل رفتار شبیه و تعیین میزان و نحوه‌ی تاثیر فراسنجه‌ها در خروجی آن، تحلیل حساسیت شبیه انجام گردیده است. در این راستا، در هر اجرای شبیه تاثیر نوسانهای هر فراسنج بدون تغییر دیگر فراسنجه‌ها

فسفر واکنشگر محلول^۱

فسفر به عنوان یکی از عوامل مهم، و در اکثر موارد به عنوان عامل محدودکننده، در پدیده‌ی تغذیه‌گرایی مطرح می‌شود. فسفر آلی به فسفر واکنشگر محلول تبدیل شده و مورد استفاده فیتوپلانکتون قرار می‌گیرد. معادلات (۷) و (۸)، روابط حاکم بر فسفر واکنشگر محلول را در رولایه و زیرلایه دریاچه نشان می‌دهند (چاپرا، ۱۹۹۷). شکل ۳، نمودار حالت-جریان فسفر واکنشگر محلول و ذره‌ای را نمایش می‌دهد:

$$V_e \frac{dP_{se}}{dt} = W_{se} - QP_{se} - K_{ue} V_e P_{se} + K_{re} V_e P_{ne} + v_t A_t (P_{sh} - P_{se}) \quad (7)$$

$$V_h \frac{dP_{sh}}{dt} = W_{sh} + K_{rh} V_h P_{nh} + v_t A_t (P_{se} - P_{sh}) \quad (8)$$

منطقه‌ی مورد مطالعه

دریاچه اونتاریو چهاردهمین دریاچه بزرگ جهان، و کوچکترین دریاچه از مجموعه‌ی دریاچه‌های کبیر می‌باشد، که در آمریکای شمالی واقع شده است. دریاچه‌ی اونتاریو چهارمین رتبه را از نظر حداکثر عمق، و دومین رتبه را از نظر میانگین عمق بین دریاچه‌های

¹ - soluble reactive phosphorus(SRP)

به‌وسیله‌ی شبیه‌سازان ارائه شده‌اند، که در ذیل بعضی از آنها بررسی می‌گردند.

آزمون سازگاری ابعادی

در این آزمون، واحدهای مربوط به هر متغیر حالت، و متغیرهای کمکی مربوط به کل شبیه با کاربرد دستور Units Check بررسی می‌شوند، و در صورت وجود تناقض در ابعاد، پیغام اخطار ظاهر می‌گردد. البته باید به این نکته اشاره شود که اگر خطای سازگاری ابعاد وجود داشته باشد، مشکلی در شبیه‌سازی ایجاد نمی‌شود، ولی هنگام بروز مشکل شبیه‌سازی، می‌توان راحت‌تر مشکل را ردیابی نمود. در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی فاقد مشکل سازگاری ابعادی است.

آزمون شرایط حدی

در این آزمون شرایط حدی برای مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور، بار ورودی و غلظت فسفر و اکنشگر محلول و ذره‌ای، و همچنین بار ورودی فیتوپلانکتون برابر با صفر در نظر گرفته شد. شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی را تحت شرایط حدی نمایش می‌دهد. مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که غلظت فیتوپلانکتون (از ۱ میلی‌گرم سبزینه بر متر مکعب به مقدار ۰/۴) کاهش می‌یابد. همچنین، غلظت فسفر و اکنشگر محلول و ذره‌ای با توجه به تجزیه فیتوپلانکتون-ها افزایش یافته، و با تغییرات مورد انتظار مطابقت دارد. بنابراین، مشاهده می‌گردد که شبیه در شرایط حدی دارای عملکرد قابل قبولی است.

با توجه به نتایج آزمون‌های مختلف جهت صحت‌سنجی شبیه، و مقادیر نزدیک به عدد یک برای ضریب نش-ساتکلیف E_{ns} ، و ضریب همبستگی داده‌ها (I)، و همچنین مقدار کم خطای معیار و در نتیجه، تطابق مناسب خروجی شبیه با داده‌های مشاهداتی، می‌توان ادعا نمود که شبیه دارای عملکرد قابل قبولی بوده، و از قابلیت اطمینان مناسبی جهت شبیه‌سازی و اطمینان به نتایج برخوردار است.

بررسی می‌شود. به منظور تعیین مؤثرترین فراسنجهای شبیه ضریب، حساسیت نسبی بر اساس معادله‌ی ۹ محاسبه می‌شود (شیرمحمدی و همکاران، ۲۰۰۶).

$$F_{sa} = \frac{\partial O}{\partial P} \times \frac{P}{O} \quad (9)$$

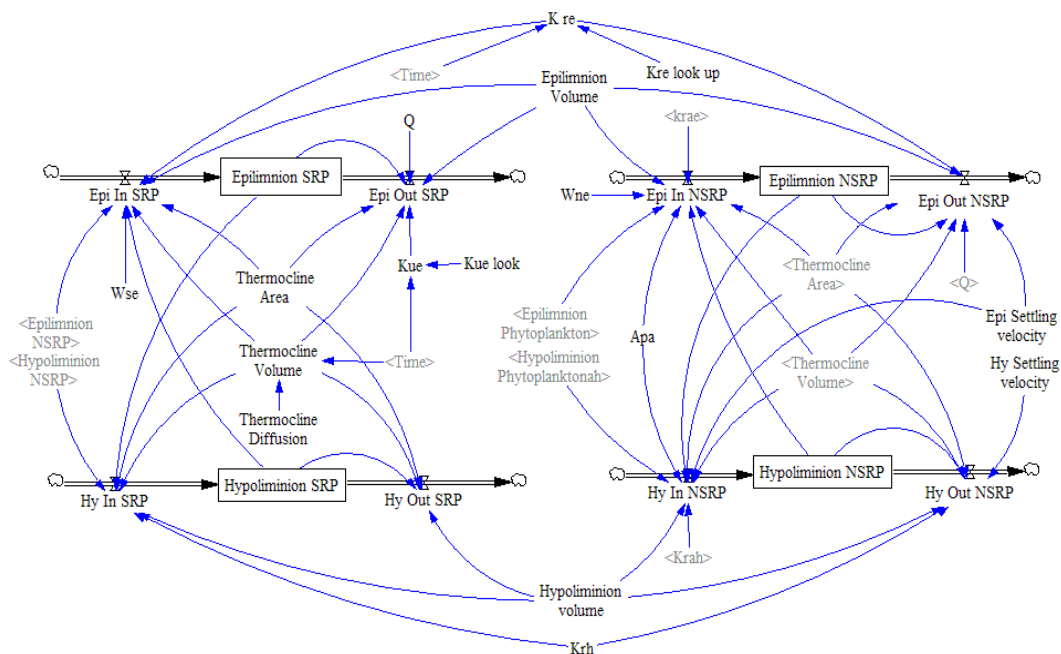
که در آن O خروجی شبیه و P فراسنج ورودی تحت بررسی می‌باشد. فراسنجهای شبیه به صورت دستی و با کاربرد روش سعی و خطا با مقادیر موجود در تحقیقات مشابه، واسنجی شده‌اند. جدول ۳، نتایج تحلیل حساسیت شبیه را برای غلظت متوسط فیتوپلانکتون نمایش می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که مؤثرترین فراسنجها به ترتیب نرخ رشد فیتوپلانکتون، نرخ زوال فیتوپلانکتون و نرخ تجزیه‌ی فسفر ذره‌ای می‌باشند. پس از تحلیل حساسیت، شبیه چرخه‌ی فسفر برای داده‌های دریاچه‌ی اونتاریو اجرا گردید، و میزان خطای مدل با استفاده از معیارهای نش-ساتکلیف^۱، ضریب همبستگی پیرسون، و خطای استاندارد بررسی شد (جدول ۴). ضریب نش-ساتکلیف (۱۹۷۰) به عنوان معیاری جهت بررسی میزان تطابق رفتار شبیه با داده‌های مشاهداتی استفاده می‌گردد. معادله‌ی ۱۰، رابطه‌ی این ضریب را تشریح می‌نماید، که در آن C_o داده‌های مشاهداتی و C_m داده‌های تخمین زده شده می‌باشند. مقادیر نزدیک به یک این ضریب نشان دهنده‌ی تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهداتی است:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum (C_o - C_m)^2}{\sum (C_o - C_{ave})^2} \quad (10)$$

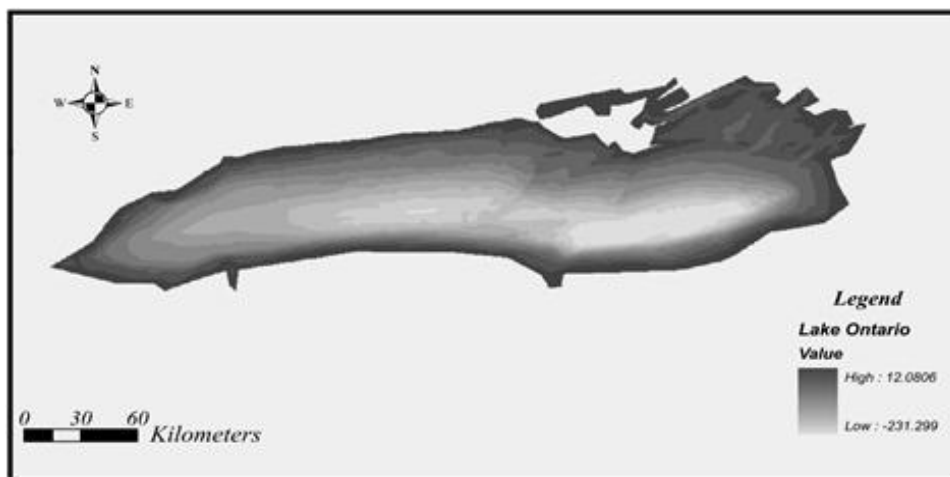
شکل ۵، داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل را از شبیه‌سازی غلظت فسفر و اکنشگر محلول برای رولایه و زیرلایه نمایش می‌دهد. مطابق نمودار مشاهده می‌گردد که رفتار فسفر و اکنشگر محلول در رولایه و زیرلایه دارای همبستگی مناسبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این دوره است.

آزمون‌های مشخصی برای شناسایی نقاط ضعف شبیه‌های ساخته شده با منطق پویایی سامانه‌ها

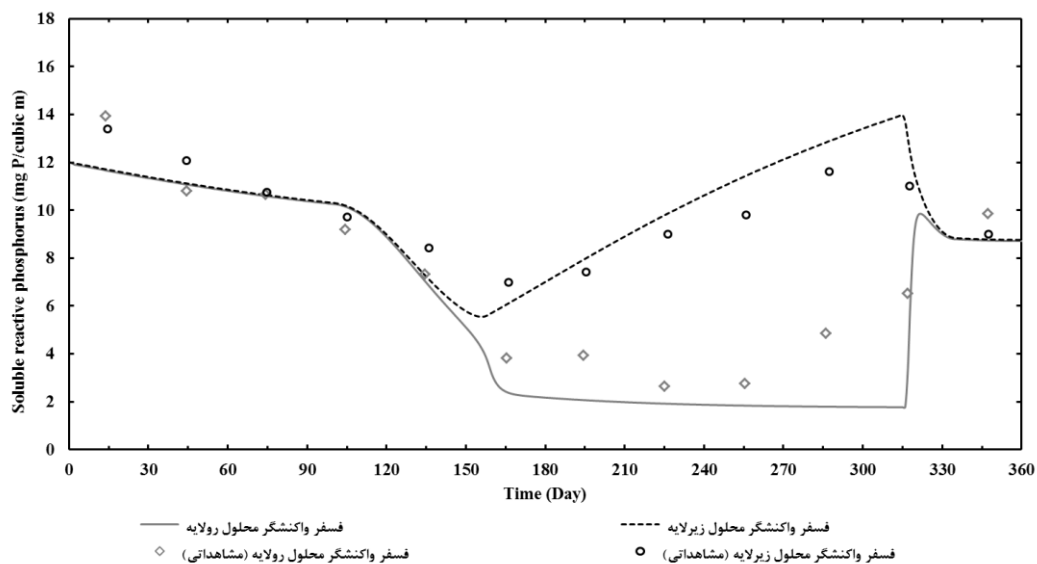
¹-Nash - Sutcliffe



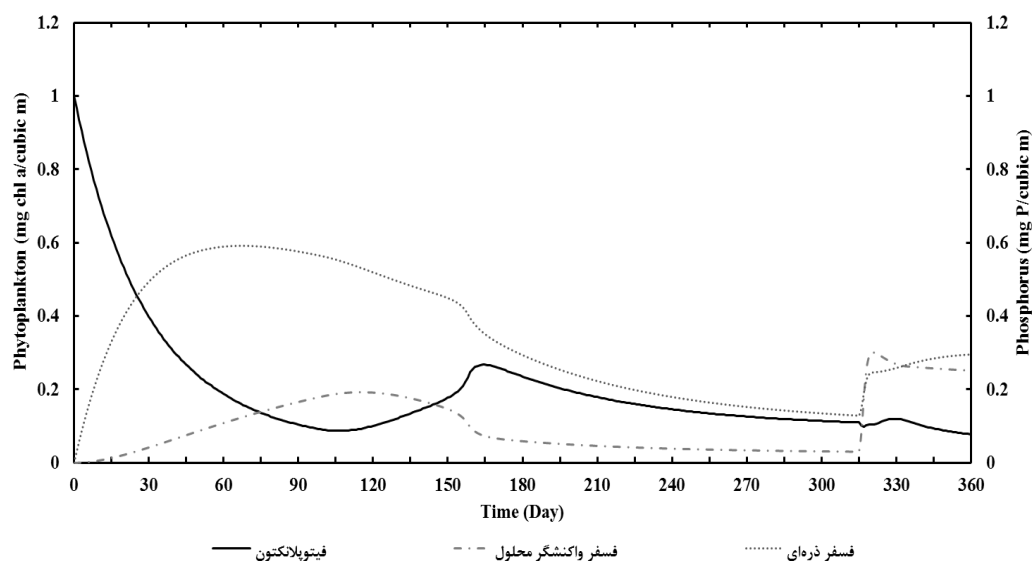
شکل ۳- نمودار حالت - جریان فسفر و اکنشگر محلول و فسفر ذره‌ای در رولایه و زیرلایه.



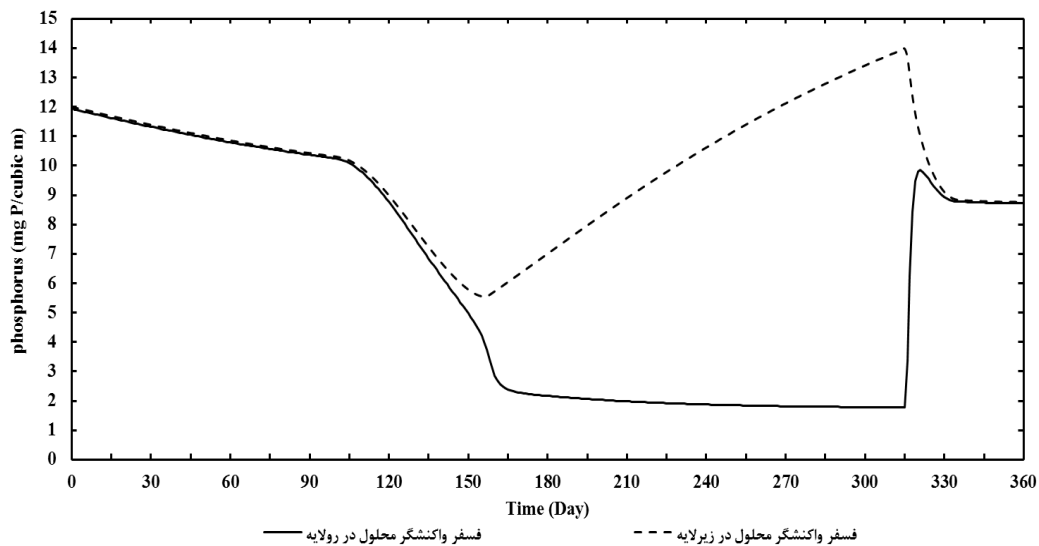
شکل ۴- دریاچه‌ی انتاریو.



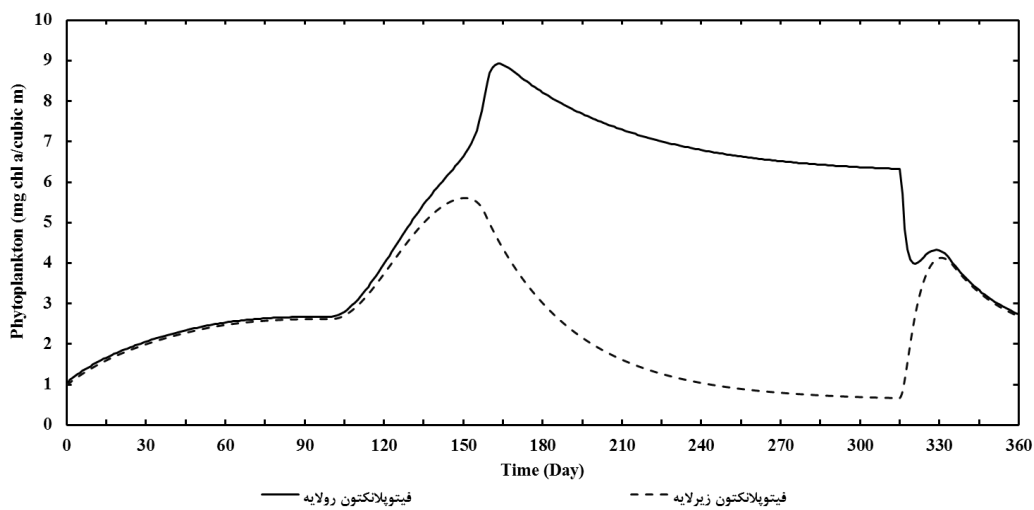
شکل ۵- داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی غلظت فسفر واکنشگر محلول در رولایه و زیرلایه.



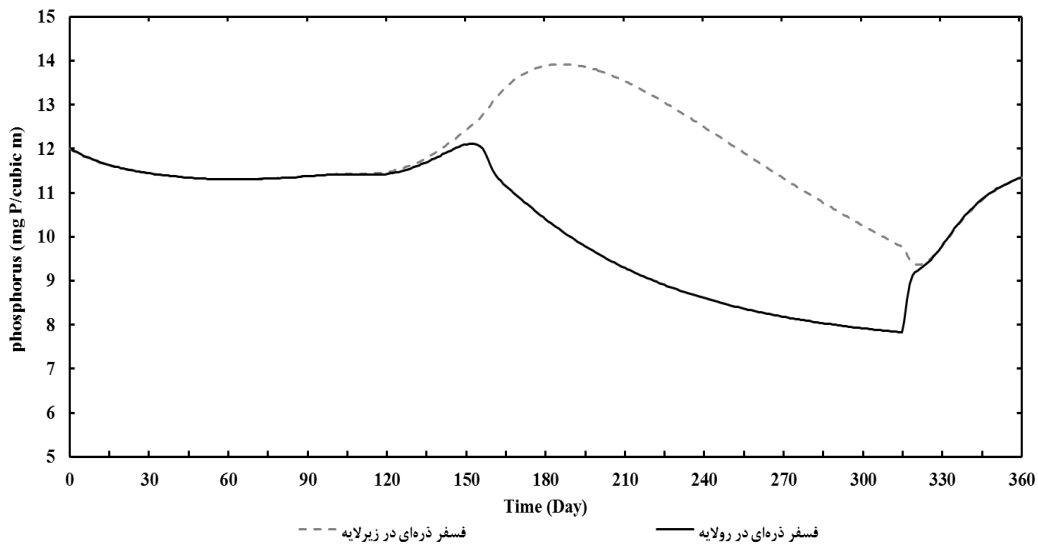
شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی متغیرهای حالت تحت شرایط حدی در رولایه‌ی دریاچه.



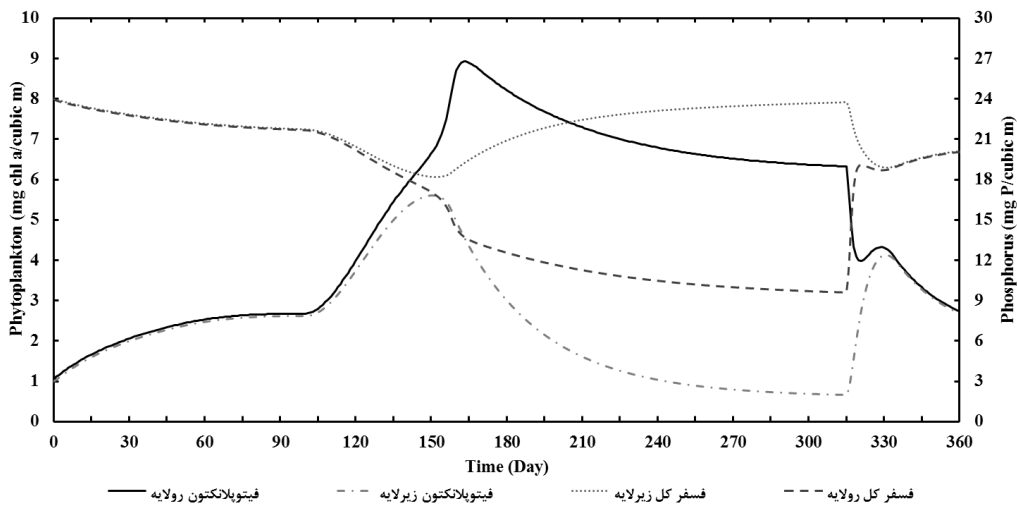
شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر واکنشگر محلول در رولایه و زیرلایه.



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی غلظت فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه.



شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر ذره‌ای در رولایه و زیرلایه.



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر در رولایه و زیرلایه.

جدول ۲- مشخصات دریاچه انتاریو.

حجم (km^3)	مساحت دریاچه (km^2)	عمق حداکثر (m)	عمق میانگین (m)	عرض (km)	طول (km)
۱۶۴۰	۱۹۰۱۰/۴۲	۲۴۴	۸۶	۸۵/۳	۳۱۱

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت فیتوپلانکتون.

فراسنجه‌ها	نماد	بازه تغییرات	F_{sa}
نرخ رشد فیتوپلانکتون	K_u	۱/۶ - ۰/۱۸	۰/۶۲۳
نرخ زوال (تنفس، چرا و دفع)	K_{ra}	۰/۰۴ - ۰/۰۲	-۰/۵۷۲
نرخ تجزیه فسفر ذره‌ای	K_r	۰/۲ - ۰/۰۵	۰/۳۲۳

جدول ۴- نتایج محاسبه‌ی معیارهای نش- ساتکلیف، ضریب همبستگی پیرسون، و خطای معیار.

	r	S_e	E_{ns}	معیارها	لایه‌ها
	۰/۸۴	۱/۵	۰/۸۴		رولایه
	۰/۸۶	۱/۰۷	۰/۶۸		زیرلایه

بحث و نتایج

پس از تدوین ساختار شبیه بر مبنای فراسنجهای مؤثر و بازخورد بین متغیرها، به تحلیل و ارزیابی رفتار متغیرها در طول دوره‌ی شبیه‌سازی خواهیم پرداخت. فرایند شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر در دریاچه‌ی اونتاریو به مدت یک‌سال، و به صورت روزانه، از ماه ژانویه آغاز گردید. در این فرایند، رفتار فراسنجهای فسفر واکنشگر محلول (SRP)، فسفر ذره‌ای (NSRP)، فسفر کل (TP)، و جلبک (phytoplankton) برای رولایه و زیرلایه دریاچه بررسی شد. به منظور تفسیر و تحلیل نتایج شبیه‌سازی، نخست رفتار فسفر واکنشگر محلول مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر واکنشگر محلول را برای رولایه و زیرلایه نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که، غلظت فسفر واکنشگر محلول از آغاز شبیه‌سازی تا حدود روز ۱۰۰ (آغاز افزایش دما و وقوع شرایط لایه‌بندی)، و از حدود روز ۳۱۵ به بعد (پایان شرایط لایه‌بندی)، در رولایه و زیرلایه تقریباً برابر است. علت این امر می‌تواند حاکم بودن شرایط اختلاط کامل در دریاچه باشد. با شروع روند افزایش دما و افزایش میزان نور (روز ۱۰۰ به بعد)، فعالیت فیتوپلانکتون‌ها افزایش یافته، و با توجه به این‌که فسفر اصلیت‌ترین ماده‌ی مغذی برای رشد جلبک است، غلظت این فراسنج در رولایه به شدت کاهش می‌یابد. این فرایند در طول تابستان و تا حدود روز ۳۱۵ ادامه داشته و باعث کاهش تدریجی فسفر واکنشگر محلول در رولایه می‌شود.

با تشدید شرایط لایه‌بندی حرارتی، برای زیرلایه‌ی دریاچه، شدت افزایش دما کم بوده، و تقریباً در طول تابستان با شیب نسبتاً کمی افزایش می‌یابد. همچنین، به دلیل کاهش نفوذ نور به این لایه بر اثر رشد جلبک در رولایه، شاهد رشد جلبک‌ها در زیرلایه نخواهیم بود. بنابراین، با توجه به عدم مصرف فسفر در زیرلایه، و

ته‌نشینی جلبک و فسفر ذره‌ای از رولایه و تجزیه آنها، شاهد افزایش غلظت فسفر واکنشگر محلول در زیرلایه در طول دوره لایه‌بندی حرارتی هستیم. نکته‌ی قابل ملاحظه‌ی دیگر در نمودار غلظت فسفر در رولایه و زیرلایه، نوسان ایجاد شده در حدود روز ۳۱۵ شبیه‌سازی است، که علت آن می‌تواند پایان شرایط لایه‌بندی حرارتی، و وقوع اختلاط کامل در دریاچه باشد.

غلظت فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه تحت تاثیر شرایط لایه‌بندی حرارتی قرار داشته، و شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی غلظت این متغیر را نمایش می‌دهد. همانند فسفر، مشاهده می‌گردد که غلظت فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه تا آغاز شرایط لایه‌بندی تقریباً برابر است. با شروع افزایش دما، غلظت فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه افزایش می‌یابد. این افزایش برای رولایه به علت داشتن شرایط بهتر نور و دما، بیشتر است.

غلظت فیتوپلانکتون در رولایه در حدود روز ۱۷۰ به حداکثر مقدار خود می‌رسد، و پس از آن، تا پایان شرایط لایه‌بندی حرارتی، به صورت تدریجی روندی نزولی دارد. همان‌گونه که در بخش شبیه‌سازی و معادلات حاکم بر چرخه‌ی فسفر اشاره گردید، فراسنج نرخ زوال فیتوپلانکتون (K_r)، که شامل فرایندهای چرخه‌ی تنفس، تجزیه و دفع می‌شود، مهمترین عامل تنظیم‌کننده‌ی غلظت فیتوپلانکتونها است. این فراسنج، مطابق رابطه میخائیل-منتن، با افزایش دما افزایش می‌یابد. بنابراین، علت کاهش تدریجی غلظت فیتوپلانکتون را طی تابستان می‌توان افزایش این فراسنج دانست. در نهایت، با کنار هم قرار دادن مباحث ذکر شده می‌توان علت به حداکثر رسیدن غلظت فیتوپلانکتون را در حدود روز ۱۷۰ تعامل دو فرایند بازخوردی رشد و مهار کردن فیتوپلانکتون مطرح نمود.

غلظت فیتوپلانکتون در زیرلایه در حدود روز ۱۵۰ به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن غلظت این

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نخست، شبیهی با رویکرد پویای سامانه، جهت شبیه‌سازی چرخه‌ی فسفر با لحاظ فراسنجهای تاثیرگذار، توسعه یافت. سپس، رفتار هر یک از فراسنجهای بررسی و تحلیل گردید. تحلیل و ارزیابی برای مقایسه رفتار فراسنجهای فسفر واکنشگر محلول، فسفر ذره‌ای و فیتوپلانکتون در رولایه و زیرلایه انجام شد.

نتایج نشان دادند که مدل قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی و تحلیل رفتار چرخه‌ی فسفر دارد. در این شبیه، بازخوردهای سه متغیر حالت فیتوپلانکتون (موجودات سازنده)، فسفر ذره‌ای (موجودات مرده) و فسفر محلول (فسفر غیر آلی) به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مشاهده گردید که غلظت متغیرهای مورد بررسی به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر شرایط لایه‌بندی و اختلاط دریاچه قرار دارد.

از نتایج این تحقیق می‌توان برای شناخت فراسنجهای موثر، اثرات متقابل و شبیه‌سازی پیچیدگیهای موجود در چرخه‌ی فسفر استفاده کرد. درک صحیح رفتار فسفر در پیکره‌های آبی به مدیران و برنامه‌ریزان سامانه‌های منابع آب امکان در نظر گرفتن سناریوهای مختلف را جهت مهار کردن آن خواهد داد. در پایان، پیشنهاد می‌گردد که برای بهبود فرایند شبیه‌سازی، تاثیر چرخه‌ی کربن و باز توزیع فسفر از بستر دریاچه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

۱. افشار، ع.، و م. سعادت پور. ۱۳۸۸. تغذیه گرای مخازن سدها: مدل سازی دو بعدی مخزن کرخه. فصلنامه آب و فاضلاب اصفهان. شماره ۷۱.
۲. سمایی، م.، ع. افشار، و م. غروی. ۱۳۸۳. مدلسازی فیتوپلانکتون-زئوپلانکتون در مخازن با روش پویایی سامانه. مجله آب و فاضلاب. شماره ۵۲.
۳. عبدل‌آبادی، ح.، ا. سارنگ، ع. محجوبی، و ع. بریانی. ۱۳۸۹. ارزیابی وضعیت کیفی مخازن سدها با استفاده از رویکرد پویایی سامانه. ششمین کنفرانس روز ملی محیط‌زیست. دانشگاه تهران.
۴. کاراموز، م.، م. طاهریون، ا. توکلی، و ا. باغوند. ۱۳۸۷. پویایی سامانه و کاربرد آن در تحلیل سامانه‌های زیست

متغیر در دوره‌ی لایه‌بندی به شدت کاهش می‌یابد. از مهمترین دلایل وقوع این رفتار می‌توان به عدم فعالیت فیتوپلانکتونها بر اثر عدم نفوذ نور و افزایش دما، ته‌نشینی، و مرگ و تجزیه آنها اشاره نمود. در نهایت، با وقوع اختلاط کامل در مخزن در حدود روز ۳۱۵، نوسان شدید در غلظت فیتوپلانکتون ایجاد شده، و تا پایان سال تقریباً غلظت آنها در رولایه و زیرلایه برابر است.

با توجه به این موضوع که انباره‌ی فسفر ذره‌ای با تجزیه‌ی فیتوپلانکتون افزایش می‌یابد، بنابراین، رفتار فیتوپلانکتون بر رفتار فسفر ذره‌ای تاثیر می‌گذارد. مطابق شکل ۹، و همانند متغیرهای دیگر، مشاهده می‌گردد که غلظت فسفر ذره‌ای در رولایه و زیرلایه تا حدود روز ۱۰۰ تقریباً برابر است. پس از روز ۱۵۰، غلظت فسفر ذره‌ای در رولایه، همزمان با کاهش غلظت فیتوپلانکتون، کاهش یافته و به تدریج تا حدود روز ۳۱۵ ادامه می‌یابد.

غلظت فسفر ذره‌ای در زیرلایه بیشتر از مقدار آن در رولایه بوده، که از جمله دلایل آن می‌توان به ته‌نشینی فسفر ذره‌ای از رولایه، و ثابت ماندن نرخ تجزیه‌ی فیتوپلانکتون در زیرلایه اشاره نمود. البته، با توجه به کاهش فیتوپلانکتون در زیرلایه، غلظت فسفر ذره‌ای در دوره‌ی لایه‌بندی به تدریج کاهش یافته و در نهایت در حدود روز ۳۱۵ با وقوع اختلاط کامل با غلظت فسفر ذره‌ای در رولایه برابر می‌شود.

برای جمع‌بندی نتایج این مقاله می‌توان به دو موضوع اشاره نمود. نخست، غلظت فسفر کل در رولایه (مجموع غلظت فسفر واکنشگر محلول و ذره‌ای)، در دوره‌ی لایه‌بندی حرارتی کاهش یافته و به مصرف فیتوپلانکتونها می‌رسد (شکل ۱۰). همچنین، در شرایط وقوع اختلاط کامل، غلظت فسفر ذره‌ای و واکنشگر محلول برای لایه‌ی فوقانی و تحتانی برابر است. موضوع قابل توجه دیگر، کاهش غلظت فسفر کل در زیرلایه در دو دوره زمانی است (شکل ۱۰). دوره‌ی اول برابر با زمان شروع شرایط لایه‌بندی حرارتی تا حاکم شدن کامل لایه‌بندی در دریاچه (روز ۱۰۰ تا ۱۵۸) بوده، و دوره‌ی دوم از آغاز برهم خوردن لایه‌بندی حرارتی تا وقوع اختلاط کامل (روز ۳۱۵ تا ۳۳۵) ادامه می‌کند.

- patterns in complete exploitation of water resources scenarios: an example from northwestern semi-arid Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 132: 377-393.
18. Shirmohammadi, A., I. Chaubey, R.D. Harmel, D.D. Bosch, R. Muñoz-Carpena, A. Sexton, M. Arabi, M.L. Wolfe, and J. Frankenberger. 2006. Uncertainty in TMDL models, *Trans. ASAE* 49: 1033-1049.
 19. Simonovic, S.P., and H. Fahmy. 1999. A new modeling approach for water resources policy analysis. *J. Water Resour. Res.* 35: 295-304.
 20. Simonovic, S.P., S. and Ahmad. 2000. System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. *J. comput. Civil Eng.* 14: 190-198.
 21. Sterman, J.D. 2000. *Business dynamics*. McGraw-Hill. Boston.
 22. Vezjak, M., T. Savsek, and E.A. Stuhler. 1998. System dynamics of eutrophication process in lakes. *Euro. J. Operat. Res.* 109:442-451.
 23. Zincke, D. 2004. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton communities of lakes Atwapaskat, Michigan. *J. Atwapaskat Res.* 001-006.
- محیطی. دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست. دانشگاه تهران.
5. Chapra, S.D. 1997. *Surface water quality modeling*. 1st Edition. Mc Graw-Hill, Inc.
 6. Christie, W.J. 1974 Changes in the fish species composition of the Great Lakes. *J. Fish. Res. Board Can* 31: 827-54.
 7. Deaton, M.L., and J.J. Winebrake. 2000. *Dynamic modeling of environmental systems*. Springer Verlag.
 8. Flynn, K.J. 2010. Ecological modelling in a sea of variable stoichiometry; Dysfunctionality and the legacy of Redfield and Monod. *Prog. Oceanography* 84: 52-65.
 9. Flynn, K.J., D.R. Clark, and Y. Xue. 2008. Modelling the release of dissolved organic matter by phytoplankton. *J. Phycol.* 44: 1171-1187.
 10. Föllmi, K. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. *Earth-Science Reviews.* 40: 55-124.
 11. Forrester, J.W., and P.M. Senge. 1980. Tests for building confidence in system dynamics models. *In System Dynamics*. Amsterdam, North-Holland.
 12. Geene, B. 1996. *Eutrophication of Doodzen reservoir in Iran*. Dissertation for the degree of doctor of science (technology). Wageningen.
 13. Loucks, D.P., J.R. Stedinger, and D.A. Haith. 1981. *Water resources systems planning and analysis*. 1st Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New York.
 14. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
 15. Özkundakci, D., D.P. Hamilton, and D. Trolle. 2011. Modelling the response of a highly eutrophic lake to reductions in external and internal nutrient loading. *N. Z. J. Mar. Freshw. Res.* 45: 165-185.
 16. Ruley, J.E., and K.A. Rusch. 2004. Development of a simplified phosphorus management model for a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake. *Ecol. Eng.* 22:77-98.
 17. Sanchez-Carrillo, S., L.C. Alatorre, R. Sánchez-Andrés, and J. Garatuza-Payán. 2007. Eutrophication and sedimentation