

مدل سازی فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در مخازن با روش پویایی سیستم

مجتبی غروی ***

عباس افشار **

محمد رضا سمایی *

(دریافت ۸۳/۳/۱۳ پذیرش ۸۳/۵/۲۵)

چکیده

جامع‌نگری و برخورد سیستمی در مدیریت کمی و کیفی منابع آب به علت افزایش مؤلفه‌های این سیستم‌ها و پیچیدگی ارتباطات و اثرات متقابل آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌سازی و مدیریت مسائل زیست‌محیطی به ویژه پدیده تغذیه‌گرایی، به دلیل پیچیدگی و اثرات متقابل عوامل مؤثر در آن کار ساده‌ای نیست. امروزه سعی بر این است که با ایجاد مدل‌های مفهومی درک این روابط را ساده کنند. روش پویایی سیستم، رویکردی نسبتاً تازه‌ای را در مدل‌سازی کیفیت آب پیش روی مهندسين قرار داده که به وسیله آن می‌توان اندرکنش‌های بین اجزای سیستم آبی را به سادگی نشان داد. غنی شدن اکوسیستم‌های آبی از مواد مغذی منجر به تولید زیستی بالا شده و ممکن است اثرات نامطلوبی نظیر شکوفایی جلبکی و کاهش اکسیژن محلول در آب‌های نزدیک بستر ایجاد کند. فیتوپلانکتون‌ها شاخه‌ای از جلبک‌ها هستند که در آب شناورند. این موجودات تولیدکنندگان اولیه در پیکره‌های آبی هستند. فیتوپلانکتون‌ها غذای زئوپلانکتون‌ها را تشکیل می‌دهند. در این مقاله از نرم‌افزار VenSim به عنوان ابزار اولیه برای مدل‌سازی فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها در مخزن استفاده شده است. مدل ساخته شده قادر است غلظت برخی از مؤلفه‌های کیفی آب مخزن مانند فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها را در طول زمان محاسبه کند. در این مقاله دریاچه لانگ (واقع در آمریکا) به عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی در مدت ۱۲۷ روز انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: فیتوپلانکتون - پویایی سیستم - زئوپلانکتون - مدل‌سازی - مواد مغذی

System Dynamics Modeling of Phytoplankton and Zooplankton in Reservoirs

*Afshar, A., (Prof.), Samaei, M.R., (M.Sc.), and Gharavei, M. (Ph.D)
Civil Engineering College, IUST*

Abstract

The need for predictive water quality modeling has arisen largely as a result of increased eutrophication of lakes throughout the world. In 1919 Nauman introduced the concept of oligotrophy and eutrophy, distinguishing oligotrophic lakes with little planktonic algae and eutrophic lakes containing much phytoplankton. The phytoplankton consist of the assemblage of small plants having no or very limited powers of locomotion. A variety of formulations have been developed to represent the effect of temperature, light, and nutrient on phytoplankton growth. A number of processes contribute to the loss rate of phytoplankton. These processes are: respiration, excretion and predatory losses. The zooplankton include animals suspended in water with limited power of locomotion. Phytoplankton as well as zooplankton are usually denser than water, and constantly sink by gravity to lower depths. 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 phytoplankton and zooplankton are simulated by system dynamics approach. Then we integrated a limiting nutrient into our phytoplankton-zooplankton scheme to complete our fundamental picture of how nutrient/food-chain interactions are modeled.

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست دانشگاه علم و صنعت ایران
** استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران
*** استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

۱۰ متر) صورت می‌گیرد، بنابراین فیتوپلانکتون تنها در رولایه، یعنی عمق نفوذ نور، شبیه‌سازی شده است.

مواد و روش‌ها

در پویایی سیستم، نخست شکل گرافیکی مدل با استفاده از چهار مؤلفه اصلی که برای نشان دادن روابط علت و معلولی استفاده می‌شوند، ایجاد می‌شود. این مؤلفه‌ها عبارتند از: انبارش‌ها^۲، جریان‌ها^۳، پیکان‌ها^۴، مبدل‌ها^۵.

انبارش برای تشریح هر پارامتر یا متغیری که تجمع می‌نماید استفاده می‌شود. جریان‌ها، فرایندهایی را نشان می‌دهند که انبارش‌ها را پر یا خالی می‌کنند. پیکان‌ها برای نشان دادن روابط بین متغیرهای مدل استفاده می‌شوند. جهت این پیکان‌ها جهت وابستگی روابط را نشان می‌دهد. پیکان‌ها، اطلاعات را در مدل از یک مؤلفه به مؤلفه دیگر حمل می‌نمایند. مبدل‌ها نیز ورودی را به خروجی متصل می‌کنند.

اساس روش پویایی سیستم، بر پایه فرضیه فرایندهای باز خورد می‌باشد. یک سیستم بازخورد متأثر از رفتار گذشته خود است. این سیستم یک ساختار حلقه بسته دارد که نتایج را از فعالیت‌های گذشته گرفته و در فرایندهای آینده استفاده می‌نماید. یک نوع از سیستم‌های بازخورد، حلقه‌های بازخورد منفی است که باعث تعادل پایدار سیستم می‌گردد [۷].

برای ساختن یک مدل با نرم‌افزار VenSim نخست متغیرهای سیستم در قالب چهار مؤلفه اصلی پویایی سیستم تعریف شده و هر کدام بر اساس نوعی که دارند، روی صفحه طراحی ایجاد می‌شوند. سپس با استفاده از پیکان‌ها و جریان‌ها، روابط علت و معلولی بین اجزای سیستم به صورت ظاهری رسم می‌گردد [۸].

در این قسمت شرح مختصری از محدودیت‌های رشد فیتوپلانکتونی و روابط مربوط به رشد آن‌ها آمده است. در یک سیستم بسته، موازنه جرم جلبک را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲]

$$\frac{da}{dt} = Kg(T, N, I)a - K_d a \quad (1)$$

که در این رابطه، a غلظت جلبک، T دما، N غلظت مواد مغذی محدود کننده، I شدت نور، K_h نرخ افت فیتوپلانکتون‌ها

روش‌های شبیه‌سازی در کنار پیشرفت سریع روش‌های تحلیل سیستم، همچنان به عنوان یک ابزار مفید تصمیم‌گیری در مسائل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال نیاز به یافتن روش‌های جدید شبیه‌سازی که علاوه بر تشریح پویایی سیستم‌های پیچیده، بتواند قابلیت مدل‌سازی ساده و راحت آن‌ها را برای کاربر ایجاد نماید، احساس می‌گردد. یکی از این روش‌ها، روش پویایی سیستم است که یک روش شبیه‌سازی شی‌گرا براساس روابط باز خورد می‌باشد. از عوامل جذابیت این روش می‌توان به افزایش سرعت ایجاد یک مدل، امکان توسعه گروهی مدل‌ها و قابلیت و سادگی اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم اشاره نمود [۱، ۷ و ۹].

یکی از متداول‌ترین کاربردهای مدل‌های شبیه‌سازی، کشف اثرات ناشی از افزایش مواد مغذی روی اکوسیستم‌های آبی، پدیده تغذیه‌گرایی^۱ و تولیدات اولیه و دینامیک پلانکتون‌ها می‌باشد [۵ و ۶].

مقاله حاضر با استفاده از ابزار مدل‌سازی VenSim تهیه شده است. مخزن لانگ لیک به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. این مخزن در شمال شرقی ایالات متحده آمریکا واقع شده است. خروجی مدل شامل غلظت فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون می‌باشد. مواد مغذی مهم در تغذیه‌گرایی، فسفر و ازت می‌باشد. فیتوپلانکتون‌ها تنها قادرند که از ازت نیتراتی و آمونیایی به عنوان منبع ازت و از فسفر واکنش‌گر محلول (SRP) به عنوان منبع فسفر مورد نیاز خود استفاده کنند.

فرضیات

در این مطالعه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- غلظت فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در جریان ورودی با خروجی مساوی در نظر گرفته شده است.
- غلظت ازت و فسفر مخزن به صورت تابعی از زمان تعریف شده است.

- غلظت مواد مغذی در کل مخزن یکسان فرض شده است. به عبارت دیگر مخزن به عنوان یک راکتور اختلاط کامل در نظر گرفته شده است. چون رشد تنها در رولایه (به عمق تقریبی

¹ Eutrophication

² Stocks

³ Flows

⁴ Connectors

⁵ Convertors

راه‌های گوناگونی برای لحاظ کردن محدود کنندگی مواد مغذی وجود دارد. برای مهم‌ترین مواد محدود کننده، یعنی فسفر و نیتروژن روابط زیر ارائه شده است:

$$\Phi_p = \frac{p}{p + K_{SP}} \quad (5)$$

که در این رابطه Φ_p فاکتور میرایی p ، p غلظت فسفر در دسترس و K_{SP} غلظت نیم اشباع p است.

$$\Phi_n = \frac{n}{n + K_{SN}} \quad (6)$$

که در این رابطه Φ_n فاکتور میرایی n و n غلظت نیتروژن در دسترس و K_{SN} غلظت نیم اشباع n می‌باشد.

سه رویکرد اصلی برای تعیین اثر ترکیبی مواد مغذی قابل استفاده است. در این مقاله از یکی از این رویکردها (رابطه ۷)، که پذیرفته‌شده‌ترین آن‌هاست استفاده شده است

$$\Phi_N = \min\{\Phi_p, \Phi_n\} \quad (7)$$

که در این رابطه Φ_N فاکتور میرایی مواد مغذی محدود کننده، Φ_p فاکتور میرایی فسفر و Φ_n فاکتور میرایی غلظت نیتروژن است.

برای محاسبه اثر نور بر رشد فیتوپلانکتون‌ها باید چند عامل مانند نوسانات روزانه سطح آب، میرایی یا خاموشی نور با افزایش عمق و وابستگی نرخ رشد به نور را در نظر گرفت. وابستگی نرخ رشد به نور را می‌توان با انجام آزمایش به دست آورد. در واقع نرخ رشد در یک نور بهینه به مقدار پیک خود می‌رسد.

در مورد اثر محدود کنندگی نور نیز روابط زیادی وجود دارد که در این پژوهش از رابطه ۸ استفاده شده است [۲]

$$\Phi_L = \frac{2.718F}{K_e H} (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}) \quad (8)$$

که در این رابطه Φ_L فاکتور میرایی نور، F دوره نوری، K_e ضریب میرایی نور، H عمق لایه ترموکلاين است.

مقادیر α_0 و α_1 از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_0 = \frac{I_a}{I_s} e^{-k_e H_1} \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{I_a}{I_s} e^{-k_e H_2} \quad (10)$$

که در این روابط I_a میانگین شدت نور در ساعات روز I_s ، (Lyd^{-1}) ، شدت نور بهینه (Lyd^{-1}) ، H_1 قطر رولایه (متر) و H_2 عمق مخزن (متر) می‌باشد. توجه شود که مقادیر نورهای

و $K_g(T, N, I)$ نرخ رشد به صورت تابعی از دما، مواد مغذی و نور است. نرخ افت نیز یک ثابت ساده نیست [۲]. نرخ رشد را به صورت رابطه ۲ می‌توان نوشت

$$K_g(T, N, I) = K_{g,T} \Phi_N \Phi_L \quad (2)$$

در این رابطه، Φ_N فاکتور میرایی مواد مغذی محدود کننده، Φ_L فاکتور میرایی نور و $K_{g,T}$ نرخ رشد بیشینه است که در شرایط نور بهینه برای مواد مغذی و در یک دمای خاص روی می‌دهد. مقدار فاکتورهای میرایی بین صفر تا یک تغییر می‌کند که صفر نشان دهنده محدودیت کامل و یک، نشان دهنده عدم وجود محدودیت است. تجربه نشان داده است که اگرچه مقادیر زیاد نور و دما بازدارنده رشد است، اما در کل هر سه عامل می‌توانند محرک رشد باشند. چگونگی فرمول‌بندی ریاضی این اثرات در زیر ارائه می‌شود.

روابط زیادی را می‌توان برای نشان دادن اثر دما بر رشد گیاهان به کار برد. شکلی که بیشتر معمول است و به کار می‌رود، مدل تتا می‌باشد.

$$K_{g,T} = K_{g,20} \theta^{T-20} \quad (3)$$

اپلی^۱ (۱۹۷۲) براساس پژوهش‌های زیادی که روی گونه‌های مختلف فیتوپلانکتون انجام داده است، مقدار θ را $1/0.66$ پیشنهاد کرده است. مقدار ضریب $K_{g,T}$ با افزایش ۱۰ درجه سلسیوس دما، دو برابر می‌شود. در این پژوهش از رابطه ۳ برای تصحیح اثر دما استفاده شده است. رابطه ۴ که به رابطه میکلس-ماتتن^۲ معروف است، رایج‌ترین رویکرد برای محدود کنندگی مواد مغذی ارائه می‌کند [۲]

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

که در این رابطه K_{SN} غلظت نیم اشباع N و N غلظت مواد مغذی محدود کننده است. در غلظت‌های پایین مواد مغذی، این رابطه به طور خطی با مواد مغذی متناسب است و در غلظت‌های بالا به مقدار ثابتی می‌رسد. مقادیر ثابت نیم اشباع برای ازت و فسفر در جدول ۱ آمده است.

¹ Eppley

² Michaelis-Menten

جدول ۱- ثابت نیم اشباع برای مواد مغذی محدود کننده رشد فیتوپلانکتون ها [۲]

| یکای | ثابت نیم اشباع | ماده مغذی |
|----------------------|----------------|-----------|
| μgPL^{-1} | ۱-۵ | فسفر |
| μgNL^{-1} | ۵-۲۰ | نیتروژن |

که در این رابطه K_z غلظت زئوپلانکتون و C_{gz} نرخ چرای زئوپلانکتون ($\text{m}^3\text{gc}^{-1}\text{d}^{-1}$) می باشد.

با توجه به مطالب گفته شده، روابط بالا در مدل فیتوپلانکتون ها وارد می شود. در این پژوهش غلظت فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون، دو انبارش مدل پویایی سیستم می باشند.

پس از وارد کردن مقادیر مواد غذایی، دما و مشخصات هیدرودینامیک (حجم مخزن و سطح لایه ترموکلاين) و نوشتن روابط ریاضی، مدل کالیبره می شود. سطح لایه ترموکلاين برای محاسبه میزان فیتوپلانکتون ته نشین شده مورد استفاده مدل قرار می گیرد.

مشخصات دما و مواد مغذی دریاچه لانگ در شکل های ۳ تا ۵ آمده است. شبیه سازی از روز ۱۹۹۱/۳/۶ تا ۱۹۹۱/۷/۱۰ انجام گرفته است (یعنی از اواخر زمستان تا اواخر بهار).

داده های کالیبراسیون تمامی مقادیر و پارامترهای مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

نتایج و بحث

همان گونه که شرح داده شد، مدل پویایی سیستم توسط نرم افزار VenSim ساخته شد. شکل کلی مدل فیتوپلانکتون در شکل ۱ مشاهده می شود. همان گونه که ملاحظه می شود، در این شکل، اجزای سیستم و روابط بین آنها، هم چنین چرخه های باز خورد نشان داده شده است [۶].

شکل ۱ نمای کلی مدل را نمایش می دهد. شمای جزئی تر مدل ساخته شده در شکل ۲ آمده است. در این پژوهش پویایی فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون با استفاده از نرم افزار VenSim شبیه سازی شده است.

گفته شده در تمام روابط بالا از نوع مرئی و قابل دسترس فتوسنتزی است.

در مدل سازی فیتوپلانکتون در مخازن، سه نوع افت در نظر گرفته می شود. نخست، افت ناشی از تنفس که طی آن گیاهان عکس عمل فتوسنتز عمل کرده و با مصرف اکسیژن، دی اکسید کربن آزاد می کنند. دوم، افت های ناشی از دفع مواد یا به عبارتی مدفوع می باشد. در این فرایند، اگر چه جلبک می تواند کربن آلی را به صورت محصول جانبی برون سلولی آزاد کند، اما آنچه برای مدل ساز مهم است، رهاسازی مواد مغذی است. سوم، افت های شکاری (چرای زئوپلانکتونی) است که ناشی از خورده شدن جلبک ها توسط زئوپلانکتون هاست. چون اندازه گیری جداگانه دو فرایند نخست دشوار است، معمولاً آنها را با هم به عنوان یک نرخ افت درجه - یک مدل می کنند و به آن افت های غیر شکاری می گویند. پس نرخ مرگ و میر به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می شود

$$K_d = K_{ra} + K_{gz} \quad (11)$$

که در این رابطه K_d نرخ افت فیتوپلانکتون ها (d^{-1}), K_{ra} افت ناشی از اثر ترکیبی تنفس و دفع (d^{-1}) و K_{gz} افت های شکاری (d^{-1}) می باشد.

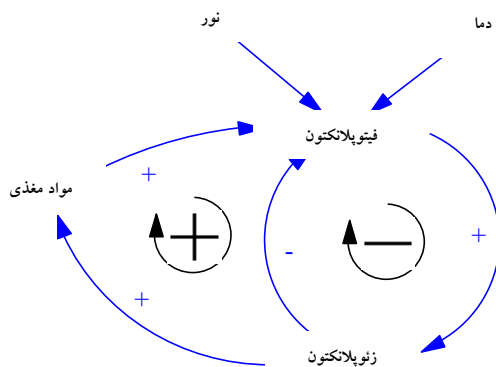
با باز نویسی رابطه ۱، رابطه ۱۲ حاصل می شود [۲]

$$\frac{da}{dt} = K_g(T, N, I)a - K_{ra}a - K_{gz}a \quad (12)$$

نرخ افت ناشی از چرای^۱ زئوپلانکتونی توسط رابطه ۱۳ محاسبه می شود [۳]

$$K_{gz} = C_{gz}Z\theta_{gz}^{T-20} \quad (13)$$

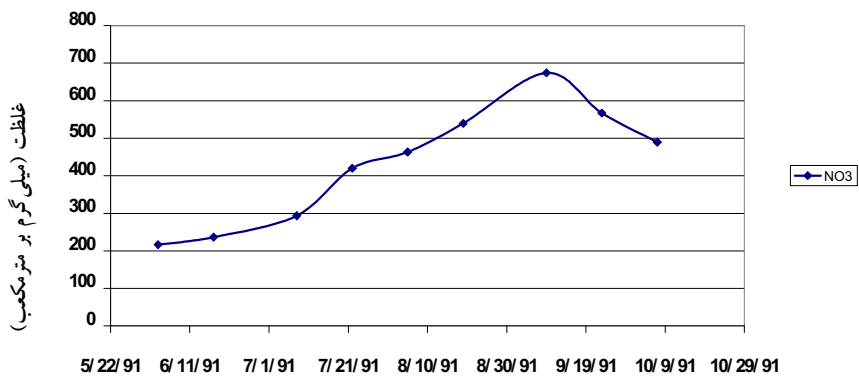
¹ Grazing



شکل ۱- شمای کلی مدل همراه با چرخه‌های بازخورد

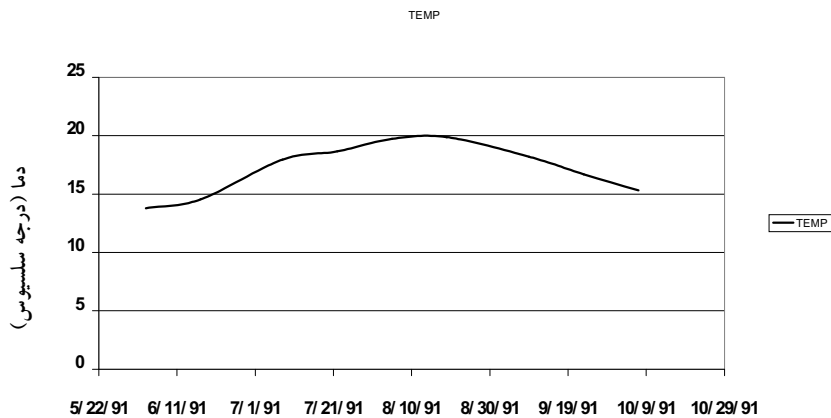
جدول ۲- مقادیر مورد استفاده در مدل و پارامترهای کالیبراسیون

| پارامتر | نشانه | مقدار | واحد |
|--|------------------------|----------------|--------------|
| دوره نوری | F | ۰/۵ | |
| ضریب رشد جلبکی | $K_{g,20}$ | ۱/۲ | d^{-1} |
| ضریب تصحیح دما برای رشد جلبکی | θ | ۱/۰۸ | |
| ضریب میرایی نور | K_e | ۰/۳ | m^{-1} |
| ثابت نیم اشباع فسفر | K_{sp} | ۴ | mgP/m^3 |
| ثابت نیم اشباع نیتروژن | K_{sn} | ۱۵ | mgN/m^3 |
| نرخ تنفس جلبک | " $K_{ra,20}$ " | ۰/۱۳ | d^{-1} |
| مقدار اولیه فیتوپلانکتون | فیتوپلانکتون | ۲ | $mgChla/m^3$ |
| مقدار اولیه زئوپلانکتون | زئوپلانکتون | ۰/۰۵ | gC/m^3 |
| نرخ شکار فیتوپلانکتون (چرای زئوپلانکتون) | C_{gz} | ۱/۲ | $m^3/gC/d$ |
| ثابت نیم اشباع جلبک | K_{sa} | ۱۰ | $ugChl/L$ |
| نسبت کربن به کلروفیل | A_{ca} | ۰/۰۴ | $gC/mgChl$ |
| راندمان شکار | E | ۰/۶ | |
| افت‌های غیر شکاری فیتوپلانکتون‌ها | $K_{rz,20}$ | ۰/۰۰۵ | d^{-1} |
| افت‌های شکاری | $K_{gz,20}$ | ۰/۰۴ | d^{-1} |
| میزان تابش نوری | I_a | ۳۰۰ | Ly/d |
| میزان نور بهینه | I_s | ۳۵۰ | Ly/d |
| حجم مخزن | V | $۳/۰۲۷۹۲e+۰۰۸$ | مترمکعب |
| مساحت ترموکلاین | Thermocline area | $۱/۱۳۹۹۹e+۰۰۷$ | مترمربع |
| نرخ ته‌نشینی فیتوپلانکتون | Phitoplankton Settling | ۰/۲ | m/d |
| عمق لایه ترموکلاین | $H=H_2-H_1$ | ۱۰ | متر |



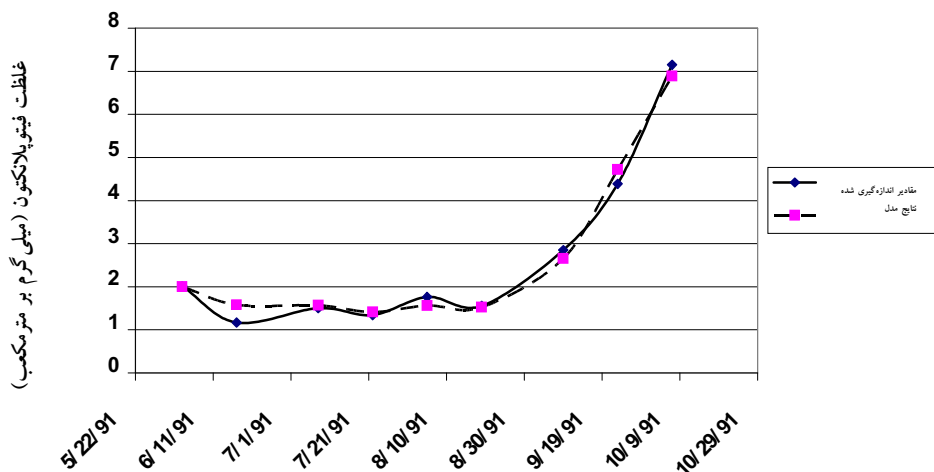
زمان، روز

شکل ۴- نمودار تغییر غلظت نیترات مخزن در طول زمان شبیه‌سازی [۴]



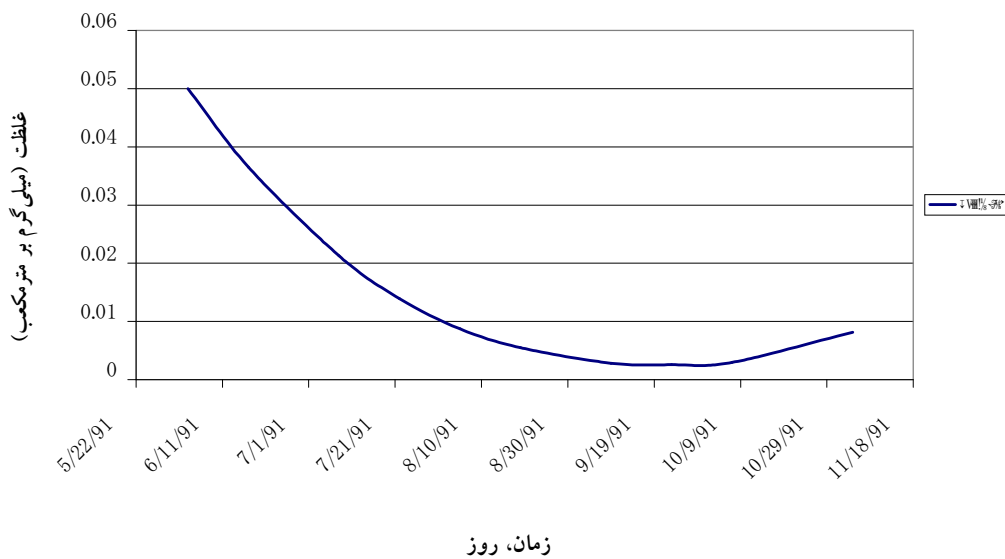
زمان، روز

شکل ۵- نمودار تغییرات دمای مخزن در طول زمان شبیه‌سازی [۴]



زمان، روز

شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی فیتوپلانکتون و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده در دریاچه لانگ



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی زئوپلانکتون در دریاچه لانگ

زئوپلانکتون‌ها نیز افزایش یابد. اما این فرایند با یک تأخیر زمانی روی داده است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در روزهای پایانی شبیه‌سازی رشد زئوپلانکتون‌ها نیز افزایش یافته است.

با توجه به نتایج به دست آمده و محاسبه غلظت فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در مخزن سد، مشاهده می‌شود که استفاده از رویکرد پویایی سیستم به ویژه در مسائل پیچیده محیط زیست بسیار مناسب بوده و می‌توان از آن به عنوان ابزاری مناسب در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب مخازن استفاده نمود. از مزایای این روش می‌توان به انعطاف‌پذیری و سرعت اجرای مدل اشاره کرد. هم‌چنین با استفاده از روش پویایی سیستم، یک ارزیابی کلی از وضعیت مخزن به دست می‌آید که می‌توان از آن در برنامه‌ریزی منابع آب استفاده کرد.

قدردانی

بدین وسیله از آقای مهندس محمدرضا جلالی، دانشجوی دکترای مهندسی آب، به خاطر کمک در زمینه نرم‌افزار VenSim تشکر می‌گردد.

در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی فیتوپلانکتون‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در دریاچه لانگ مقایسه شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی مطابقت نسبتاً خوبی با داده‌های واقعی دارد. در شکل ۷ نیز نتایج شبیه‌سازی زئوپلانکتون‌ها مشاهده می‌گردد.

این واقعیت نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ساده پویایی سیستم می‌تواند در ارزیابی کلی وضعیت مخزن کمک کند؛ چرا که مقدار غلظت فیتوپلانکتون‌ها نشان دهنده شکوفایی جلبکی و وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن می‌باشد.

نتیجه‌گیری

معمولاً نیتروژن کافی برای مصرف فیتوپلانکتون‌ها در آب موجود می‌باشد؛ بنابراین، این ماده محدود کننده رشد فیتوپلانکتونی نیست. معمولاً فسفر ماده مغذی و محدود کننده است؛ بنابراین تغییرات نیترات اثر چندانی بر رشد فیتوپلانکتونی ندارد. از طرفی در ماه‌های تابستان، به دلیل افزایش دما و نور، رشد فیتوپلانکتون‌ها افزایش یافته است. با افزایش رشد فیتوپلانکتون‌ها انتظار می‌رود که رشد

- 1- Jalali, M. and Afshar, A., (2004). "*System Dynamics Modeling of Hydropower Reservoir Operation*", ICOLD 2004, Korea.
- 2- Chapra Steven, C., (1997). "*Plan Growth and Nonpredatory Losses*", Surface Water Quality Modeling, pp. 603-621, Mc Graw-Hill.
- 3- Chapra Steven, C. (1997). "*Predator-Prey and Nutrient/Food-Chain Interactions*", Surface Water-Quality Modeling, pp. , 622-631, McGraw-Hill.
- 4- Annear, Jr., Robert, L., Chris, J., Berger S., and Wells, A., (2001). "*Upper Spokane River Model*", Technical Report EWR-4-01, U.S. Army Corps of Engineers.
- 5- Allan, D. T. Johengen and E. Rutherford, (2001). "*Nutrient Loading and its Relevance to the Great Lakes Basins*", University of Michigan.
- 6- Vezjak, M., Savsek, T. and Stuhler, E.A., (1998). "*System Dynamics of Eutrophication Process in Lakes*", European Journal of Operational Research, No. 109, pp. 442-451.
- 7- Hayward, J., (2000). "*Introduction to System Dynamics*", University of Glamorgan.
- 8- Saysel, A.K., et al., (2002). "*Environmental Sustainability in an Agricultural Development Project: a System Dynamics Approach*", Journal of Environmental Management, No 64, pp.247-260.
- 9- Harris, B., (2000). "*Applying System Dynamics to Business*", Facilitated Systems.