



شبیه‌سازی سفر در دریاچه‌های درون‌شهری و تأثیر اقدامات سازه‌ای و مدیریتی بر بار ورودی به آن (مطالعه‌ی موردی: دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر)

امیر محمودی انزایی^۱، مسعود تجریشی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

amahmoudi87@gmail.com

خلاصه

دریاچه‌ی درون‌شهری چیتگر با مساحت ۱۳۲ هکتار و حجم تقریبی ۶/۹ میلیون مترمکعب، در شمال‌غربی تهران و منطقه‌ی ۲۲ شهرداری تهران واقع شده است. با افزایش درجه‌ی حرارت هوا، بوم‌سازگان دریاچه با مشکلاتی چون افزایش حشرات موذی، رشد قورباغه و شکل‌گیری و رشد فزاینده‌ی جلبک در داخل دریاچه روبه‌رو شده است. اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته از مشخصات کیفی ۵۹ نمونه با توزیع مکانی مناسب درون دریاچه گویای آن است که فسفر ماده‌ی مغذی محدودکننده‌ی تغذیه‌ی گرای در این دریاچه است. با استفاده از مدل شبیه‌ساز AQUATOX و با بررسی سناریوهای متنوع نظیر ورود رواناب، ورود آب رودخانه‌ی کن (با تصفیه‌ی شیمیایی فسفات یا بدون تصفیه‌خانه)، استفاده از سایر منابع آبی برای تأمین آب دریاچه، تأثیر وجود یا عدم حضور ماهی و اقدامات مدیریتی در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کن به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب دریاچه تأثیر این اقدامات بر بار فسفر ورودی به دریاچه و وضعیت تغذیه‌ی گرای آن بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر، حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کن، شبیه‌سازی سفر، تغذیه‌ی گرای

۱. مقدمه

امروزه ساخت دریاچه‌های کم‌عمق درون‌شهری^۱ در نقاط مختلف جهان رواج یافته است. این دریاچه‌ها که به صورت طبیعی وجود دارند، با اجرای طرح‌های عمرانی و به شکل مصنوعی ساخته و معمولاً با هدف زیبایی منظره‌ی شهری و ایجاد یک مکان تفریحی-گردشگری طراحی و اجراء می‌شوند. البته این دریاچه‌ها در بعضی موارد با هدف کنترل رواناب شهری و پیش‌تصفیه‌ی آن قبل از تخلیه به منابع پذیرنده (از قبیل رودخانه‌ها و سدها) ساخته می‌شوند؛ زیرا این دریاچه‌ها قابلیت خوبی برای حذف مواد معلق از آب و کاهش بار آلودگی (علی‌الخصوص از رواناب‌ها که حامل آلاینده‌های سمی و خطرناک شهری‌اند) دارند. در بعضی نقاط، این دریاچه‌ها برای ذخیره‌ی آب و تأمین آب مورد نیاز مناطق پایین‌دست نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱]

شرایط خاص دریاچه‌های کم‌عمق شهری، از جمله بار آلی زیاد ورودی به دریاچه از طریق رواناب شهری، سرریز فاضلاب شهری در مواقع بارندگی، جاری‌شدن رواناب‌های زمین‌های کشاورزی به سوی این دریاچه‌ها، آلودگی ناشی از پرندگان آبی ساکن در دریاچه، زمان ماند طولانی آب در آن و نوع استفاده از آن (به خصوص در مواقعی که به منظور تأمین آب مناطق پایین‌دست و یا به عنوان یک منطقه‌ی تفریحی-گردشگری مورد بهره‌برداری قرار گیرند)، لزوم توجه ویژه به کیفیت آب این دریاچه‌ها را آشکار می‌سازد. روش‌های عمده‌ی جهانی، به کار گرفته شده برای کنترل آلودگی‌های متنوع احتمالی در دریاچه‌های درون‌شهری عبارتند از: کاهش بار مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) ورودی به دریاچه، استفاده از آلوم^۲ (یا آلومینیوم سولفات هیدراته^۳) به عنوان مواد منعقدکننده برای حذف آلودگی فسفر از رواناب، کاهش جمعیت پرندگان آبی با سیاست‌های مدیریتی زیست‌محیطی و افزایش جریان خروجی از دریاچه و جایگزینی آن با آب تازه. [۲]

¹ Urban Lakes

² Alum: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

³ Hydrated Aluminium Sulphate



غلظت کل فسفر^۴ در دریاچه‌ها پارامتری بسیار قوی برای پیش‌بینی شاخص‌های کیفی دریاچه و به طور کلی مجموعه‌ای بوم‌سازگان^۵ دریاچه است، که شامل: بیومس کل فیتوپلانکتون^۶، سهم سیانوباکتری‌ها، میزان شیوع و شکوفایی فیتوپلانکتون‌های سمی، میزان شفافیت و غیره‌وازی شدن آب، تنوع و ترکیب موجودات زنده، ماکروفیت‌ها، زئوپلانکتون‌ها و ماهی‌ها می‌باشد. [۳] به علت ارتباط قوی میان غلظت کل فسفر و بوم‌سازگان دریاچه‌ها، مطالعات زیادی به منظور تعیین عوامل تأثیرگذار بر غلظت فسفر کل دریاچه‌ها انجام شده است.

ماکینن^۷ در قالب پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد خود در سال ۲۰۰۹، به مدل‌سازی غلظت فسفر کل، نیتروژن کل و کلروفیل a در شرایط ثابت و دینامیک، توسط شبیه‌ساز AQUATOX برای دریاچه‌ی فیهاجاروی^۸ در منطقه‌ی شهری ساکیلا^۹ (در نزدیکی شهر نوکیا در کشور فنلاند) پرداخته است. این دریاچه کم‌عمق بوده و به لحاظ وضعیت تغذیه‌گرایی در شرایط مزوتروفیک قرار دارد. نتایج گویای آن است که ضریب کارایی نش-ساتکلیف^{۱۰} در هر دو شرایط مقداری منفی را به خود اختصاص داده است. با توجه به این که مدل شبیه‌ساز AQUATOX مقدار غلظت مواد مغذی و کلروفیل a را در شرایط ثابت نسبتاً خوب پیش‌بینی کرده است، لذا مدل برای کارهای مدیریتی کارا ارزیابی می‌شود. البته تأکید شده است که در کارهای آتی بر روی جنبه‌های زیست‌شناختی مدل و توانمندی‌های آن در این حوزه تمرکز بیشتری شود. [۴]

کیانی‌راد^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی، در قالب طرح بررسی مدل‌های اکولوژیکی حوضه‌ی آبریز، به شبیه‌سازی دریاچه‌ی کلیر^{۱۲} توسط مدل شبیه‌ساز AQUATOX (Release 2.1) پرداختند. دریاچه‌ی کلیر در ایالت کالیفرنیا و ۱۲۰ کیلومتری شمال سان‌فرانسیسکو و در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی ساکرامنتو^{۱۳} قرار گرفته است. این دریاچه به صورت طبیعی در شرایط تغذیه‌گرایی قرار دارد و در فصول تابستان و پاییز که زیست‌توده‌های جلبکی آبی و قرمز بروز می‌کند، نیتروژن محدودکننده‌ی تغذیه‌گرایی است. در مورد میزان فسفر، بار داخلی ناشی از بروز شرایط بی‌هوازی در کف دریاچه (فسفر رسوبات) بیش از بار خارجی ورودی می‌باشد. در این پژوهش، ۷ سناریو توسط مدل شبیه‌ساز AQUATOX برای ارزیابی پاسخ زیست‌توده‌های جلبکی به تغییرات مواد مغذی ورودی یا تغییرات دبی ورودی و خروجی به آزمون گذاشته شده و نمودارهای خروجی مدل آنالیز شده‌اند. [۵]

رالی^{۱۴} و همکار در سال ۲۰۰۴ میلادی برای دریاچه‌ی شهری واقع در باتون‌روژ در ایالت لوئیزیانا با مساحت ۰/۲۳ کیلومتر مربع و حوضه‌ی آبریزی با مساحت ۱/۹۲ کیلومتر مربع و زمان ماند حدود ۵۶ روز که به دلیل پدیده‌ی تغذیه‌گرایی و شکوفایی جلبک باعث مرگ ماهی‌ها شده بود، از یک مدل کیفی فسفر برای مدل‌سازی استفاده نمودند. در عین حال، راه‌کارهای مدیریتی متفاوتی ارائه گردیده که در نهایت کنترل فسفر ته‌نشین شده در کف و نیز کاهش ورود فسفر از حوضه‌ی آبریز به عنوان راه‌حل پیشنهاد شده‌اند. [۶] در مطالعه‌ی پیش‌رو به مدل‌سازی فسفر توسط شبیه‌ساز AQUATOX در دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر پرداخته شده و اعتبارسنجی مدل و شبیه‌سازی وضعیت آبی دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر در دستور کار قرار گرفته است و با استفاده از سناریوهای متنوع، شرایط احتمالی دریاچه در سال‌های آتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر^{۱۵} در مختصات UTM، بین محدوده‌ی ۵۱۸۰۰۰ تا ۵۲۲۰۰۰ طول شرقی و ۳۹۵۴۰۰۰ تا ۳۹۵۶۵۰۰ عرض شمالی واقع شده است. این دریاچه از شمال به حوضه‌ی آبریز رودخانه‌های کن و وردآورد، از شرق به حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کن، از غرب به حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی وردآورد و از جنوب به آزادراه تهران-کرج محدود می‌شود. ساختگاه سد و دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر در شمال‌غرب شهر تهران، واقع در منطقه‌ی ۲۲ شهرداری تهران و شمال پارک جنگلی چیتگر قرار گرفته است. راه‌های دسترسی متعددی به دریاچه وجود دارد، از جمله آزادراه تهران-کرج در جنوب دریاچه، بزرگراه همت در شمال دریاچه و بزرگراه آزادگان در شرق آن. راه دسترسی به بند انحرافی کن نیز از طریق ورودی دهکده‌ی

⁴ Total Phosphorus (TP)

⁵ Ecosystem

⁶ Total Phytoplankton Biomass

⁷ Makynen

⁸ Phyhajarvi

⁹ Sakyla

¹⁰ Nash-Dutcliff Efficiency Coefficient

¹¹ Kianirad

¹² Clear Lake

¹³ Sacramento River

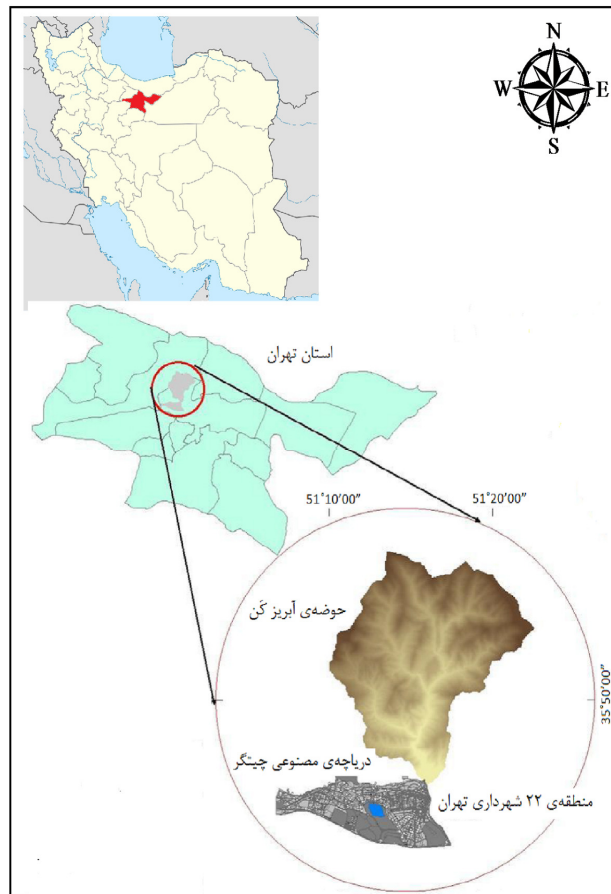
¹⁴ Ruley

¹⁵ این دریاچه با نام‌های دیگری چون «دریاچه‌ی شهدای خلیج فارس» و «دریاچه‌ی منطقه‌ی ۲۲» نیز شناخته می‌شود.

المپیک در بزرگراه همت میسر است. مشخصات کلی دریاچه مصنوعی چیتگر در جدول ۱ درج شده است. [۷] ضمناً شماتیکی از موقعیت مکانی دریاچه چیتگر و حوضه آبریز رودخانه کن در شکل ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات کلی دریاچه مصنوعی چیتگر

تراز نرمال دریاچه	۱۲۶۷/۵ متر از سطح دریا
حداکثر عمق دریاچه نسبت به تراز نرمال	۹/۵ متر
عمق متوسط دریاچه نسبت به تراز نرمال	۵/۲ متر
حداقل عمق دریاچه نسبت به تراز نرمال	۴ متر
مساحت دریاچه در تراز نرمال	۱۳۱/۶ هکتار
حجم دریاچه در تراز نرمال	۶/۸۷ میلیون مترمکعب
متوسط میزان تبخیر آب از سطح دریاچه	۲/۰۵ میلیون مترمکعب در سال
متوسط میزان بارش بر روی دریاچه	۳۵۰ هزار مترمکعب در سال
متوسط میزان نشت آب از دریاچه	کمتر از ۲۰ هزار مترمکعب در سال



شکل ۱- موقعیت مکانی دریاچه مصنوعی چیتگر، حوضه آبریز رودخانه کن و منطقه ۲۲ شهرداری تهران در استان تهران

۳. معرفی مدل شبیه‌ساز AQUATOX

مدل AQUATOX یک مدل شبیه‌ساز برای سیستم‌های آبی است که وضعیت آلاینده‌های متفاوت (نظیر مواد مغذی و مواد شیمیایی آلی) و اثرات آن‌ها بر روی بوم‌سازگان (شامل ماهی‌ها، بی‌مهرگان و گیاهان آبی) را پیش‌بینی می‌کند. از این منظر، AQUATOX ابزاری ارزشمند برای بوم‌شناسان، زیست‌شناسان، مدل‌سازان کیفیت آب و تمامی افرادی است که درگیر اجرای ارزیابی ریسک بوم‌شناختی در سیستم‌های آبی هستند.



به منظور سریع بودن، سادگی استفاده برای کاربران و قابل‌بازبینی بودن، این مدل شبیه‌ساز با ساده‌ترین تفکیک زمانی و مکانی‌ای که با این اهداف سازگار است، طراحی شده است. در حقیقت این مدل برای توصیف شرایط متوسط روزانه در یک سیستم آبی با اختلاط کامل طرح‌ریزی شده است؛ به بیان دیگر، این مدل صفر بُعدی است. البته مدل می‌تواند شرایط لایه‌بندی حرارتی را به صورت یک بُعدی و در جهت قائم به صورت فصلی شبیه‌سازی نماید. در حالت کلی مدل‌های یک بُعدی برای مخازنی که طول آن‌ها بین ۰/۵ تا ۱۰ کیلومتر است، مناسب می‌باشد؛ اگر این طول بزرگ‌تر باشد، از مدلی دو بُعدی برای تجمع شرایط طولی و عمقی استفاده می‌شود. فرض یک بُعدی بودن نیز برای بسیاری از مخازن فرض مناسبی است. [۸]

۴. خلاصه‌ی داده‌های ورودی به مدل شبیه‌ساز AQUATOX

غلظت اولیه‌ی آمونیاک، نترات، فسفات و اکسیژن محلول از نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی انستیتو آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف، استخراج شده و وارد مدل شبیه‌ساز شده‌اند. این اعداد عبارتند از: ۱) آمونیاک ($(\text{N-NH}_4^+, \text{N-NH}_4^+)$: 0.025 mg/L)، نترات ((N-NO_3^-) : 1.642 mg/L)، ۳) فسفات ((P-PO_4^{3-}) : 0.044 mg/L) و ۴) اکسیژن محلول: 7.78 mg/L . در مورد دی‌اکسید کربن، با توجه به این که اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر بر روی دریاچه انجام نمی‌شود، از نتایج تحقیقات انجام شده بر روی نمونه‌های مشابه [۹] بهره برده و بر اساس قلیائیت و pH عددی تخمینی (۲ میلی‌گرم بر لیتر) را وارد مدل شبیه‌ساز می‌نماییم.

اطلاعات نوع و شرایط اولیه‌ی گیاهان و بی‌مهرگان دریاچه از نتایج بررسی‌های مؤسسه‌ی علوم شیلاتی - پژوهشکده‌ی آبروی‌پروری کشور در سه مرحله (بهمن ماه سال ۱۳۹۲ و اردیبهشت و خرداد ماه ۱۳۹۳) استخراج شده‌اند. داده‌های مربوط به رودخانه‌ی کن نیز از مجموعه اندازه‌گیری‌های انستیتو آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف به دست آمده و در اختیار مدل قرار گرفته‌اند. در مورد داده‌های هواشناسی (باد و میزان تبخیر) گزارشات هواشناسی ایستگاه‌های چیتگر و مهرآباد ملاک استخراج داده‌های مورد نیاز مدل بوده‌اند.

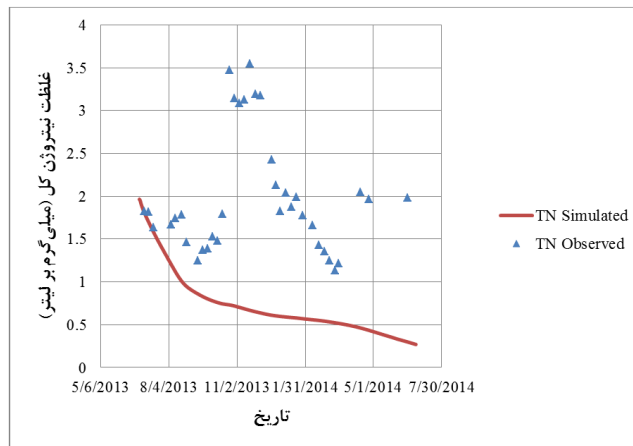
۵. اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل به منظور آزمودن میزان مطابقت غلظت‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و غلظت‌های واقعی اندازه‌گیری شده، انجام می‌پذیرد. در حقیقت، اعتبارسنجی مدل برای ارزیابی این که مدل تا چه اندازه برای شبیه‌سازی اهداف مد نظر، مناسب است و این که نتایج به دست آمده تا چه اندازه اعتمادپذیر هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اعتبارسنجی استفاده شده در این تحقیق، روش ضریب کارایی نش-ساتکلیف است که کاربرد آن بیش‌تر در مدل‌های هیدرولوژیکی و در ابعاد حوضه‌ی آبریز و بررسی کارایی مدل‌های کیفیت آب مشاهده شده است. [۱۰]

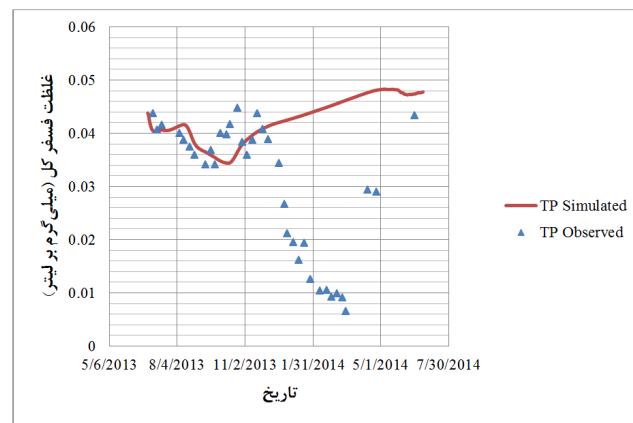
جهت اعتبارسنجی مدل، یک شبیه‌سازی یک‌ساله از وضعیت دریاچه انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی یک‌ساله (از تاریخ ۵ تیر ماه ۱۳۹۲ تا تاریخ ۵ تیر ماه ۱۳۹۳)، با توجه به نحوه‌ی مدیریت دریاچه در سال اخیر، فرض بر این است که آب ورودی به دریاچه، به دلیل کم بودن آورد رودخانه‌ی کن در سال آبی گذشته، بسیار ناچیز بوده و مقدار آن در مدل صفر لحاظ شده است. علاوه بر این، با توجه به اندازه‌گیری‌های مستقیم و پیش‌بینی‌های مدل، غلظت احتمالی هر یک از گونه‌های بوم‌سازگان دریاچه در ابتدای این دوره‌ی شبیه‌سازی، بدین صورت است: (مابقی گونه‌ها مطابق نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و نیز پیش‌بینی مدل، غلظت ناچیزی دارند.)

- $\text{Cyclotella nana} = 0.45 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ dry}$
- $\text{Phyt Diatom, Marine \& Phyto, Diatom max} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ dry}$
- $\text{Phyt, Blue-Greens DR} = 2.8 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ dry}$

نمودار مقایسه‌ی داده‌های فسفر کل و نیتروژن کل مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۲ و ۳ ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که بر روی شکل‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود، از ابتدای دوره‌ی مدل‌سازی تا اواسط فصل پاییز، مطابقت بسیار خوبی بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد، اما پس از این تاریخ، افزایش ناگهانی در غلظت نیتروژن کل و کاهش ناگهانی در غلظت فسفر کل مشاهده می‌شود. مجدداً پس از گذر این دوره‌ی زمانی، غلظت‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به تدریج به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این تفاوت (به ویژه در دوره‌ی بعد از اواسط پاییز) می‌تواند ناشی از این موارد باشد: عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی دقیق فرایندهای رخ داده بعد از فصل پاییز، عدم صحت شرایط اولیه‌ی تعریف شده برای مدل، و از همه محتمل‌تر عدم اطلاع دقیق ما از اقدامات مدیریتی احتمالی انجام شده در دریاچه.



شکل ۲- مقایسه داده‌های نیتروژن کل مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط شبیه‌ساز AQUATOX برای دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر



شکل ۳- مقایسه داده‌های فسفر کل مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط شبیه‌ساز AQUATOX برای دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر

محاسبه‌ی ضریب کارایی نش-ساتکلیف برای نیتروژن کل و فسفر کل، نشان می‌دهد که مقدار عددی این شاخص اعتبارسنجی برای آن‌ها به ترتیب برابرند با: $R_{TN}^2 = -۳/۵۷$ و $R_{TP}^2 = -۱/۲۶$. توجه داشته باشید که علی‌رغم تمامی عدم قطعیت‌هایی که در شبیه‌سازی دریاچه وجود داشته است، به نظر می‌رسد این نتایج برای این مدل‌سازی کوتاه مدت قابل قبول باشد. در صورتی که داده‌های افزایش یافته‌ی نیتروژن کل و کاهش یافته‌ی فسفر کل را در محاسبات ضریب کارایی نش-ساتکلیف دخیل نکنیم، مقدار عددی ضریب کارایی نش-ساتکلیف برای این دو پارامتر برابر خواهد بود با: $R_{TN}^2 = -۰/۴۰$ و $R_{TP}^2 = ۰/۸۳$. مجموعاً عملکرد مدل در شبیه‌سازی فسفر کل، بهتر از عملکرد آن در شبیه‌سازی نیتروژن کل ارزیابی می‌شود.

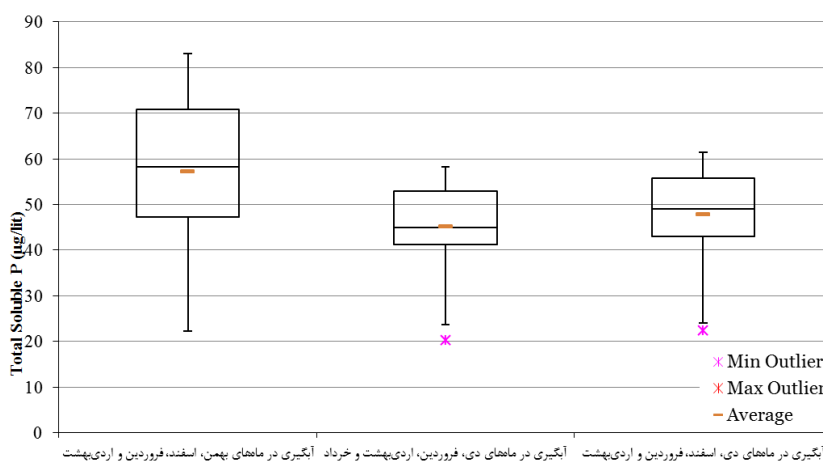
۶. بررسی تغییرات غلظت مواد مغذی و شرایط تغذیه‌گرایی در اثر تغییر الگو و مقدار آب ورودی به دریاچه

نظر به قابل توجه بودن میزان تبخیر سالانه از سطح دریاچه مصنوعی چیتگر (طبق برآوردهای صورت پذیرفته از داده‌های هواشناسی، بیش از دو میلیون مترمکعب در سال)، می‌توان گفت که حفظ بوم‌سازگان دریاچه و فراهم شدن شرایط بهره‌برداری مطلوب از کاربری‌های تعریف شده برای دریاچه مستلزم آن است که همه ساله آب از دست رفته از پیکره‌ی آبی دریاچه از طریق منابع آبی دریاچه از طریق منابع آبی در دسترس جبران شود. در شرایط فعلی تنها منبع آب قابل اعتماد برای آب‌گیری دریاچه، رودخانه‌ی کن می‌باشد که حبابه‌ی تخصیص داده شده به آن سالیانه حداکثر ۵ میلیون مترمکعب در فصل‌های زمستان و بهار است.

در مورد تأثیر تغییر الگوی آب‌گیری، ۲۲ ترکیب متفاوت از دوره‌های ۴، ۵ و ۶ ماهه‌ی آب‌گیری توسط مدل شبیه‌ساز AQUATOX به آزمون گزارده شده‌اند. نتایج گویای آن هستند که بیش‌ترین غلظت فسفر و نامطلوب‌ترین شرایط تغذیه‌گرایی دریاچه (بر اساس نتایج شاخص کارلسون) در سناریوی آب‌گیری در ماه‌های بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت رخ می‌دهد. مطلوب‌ترین شرایط نیز در حالتی رخ می‌دهد که آب‌گیری دریاچه

مطابق با الگوی آب‌گیری در ماه‌های دی، فروردین، اردیبهشت و خرداد صورت پذیرد. با توجه به این که احتمالاً ماه خرداد به دلیل آورد بسیار اندک رودخانه‌ی کن در این ماه و نیازهای فراوان کشاورزی و زیست‌محیطی در پایین دست، زمان مناسبی برای آب‌گیری نیست، لذا در صورت حذف این گزینه، بهترین شرایط آب‌گیری هنگامی خواهد بود که برداشت آب از رودخانه‌ی کن با الگوی آب‌گیری در ماه‌های دی، اسفند، فروردین و اردیبهشت انجام شود. تغییر الگوی آب‌گیری می‌تواند غلظت حداکثر فسفر در دریاچه در سال پنجم شبیه‌سازی را ۲۶٪ تا ۳۰٪ کاهش دهد.

در سناریوهایی که شامل آب‌گیری در ماه بهمن هستند، وضعیت دریاچه به لحاظ غلظت فسفر کل، به مراتب بدتر از سناریوهایی است که در ماه بهمن آب‌گیری ندارند. می‌توان گفت که حضور ماه بهمن در دوره‌ی آب‌گیری موجب می‌شود تا به طور متوسط غلظت حداکثر فسفر در دریاچه ۳۱٪ افزایش یابد، لذا به عنوان یک الگوی بهره‌برداری از دریاچه، پیش‌نهاد می‌شود که تا حد امکان از ورود آب در ماه بهمن به دریاچه خودداری نموده و به جای آن از آب‌گیری در سایر ماه‌ها استفاده شود. در تمامی این حالت‌ها، به لحاظ شاخص تغذیه‌گرایی، دریاچه در حالت Eutrophic قرار داشته و در آستانه‌ی Hypereutrophic شدن است (شاخص کارلسون در حدود عدد ۶۰ تغییر می‌کند) و عملاً تغییر الگوی آب‌گیری نمی‌تواند از تغذیه‌گرا شدن دریاچه جلوگیری کند و تنها شدت بروز آن را کاهش می‌دهد. نمودار جعبه‌ای نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر در دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر در سال پنجم مدل‌سازی، برای سناریوهای پیش‌گفته در شکل ۴ نمایش داده شده است.



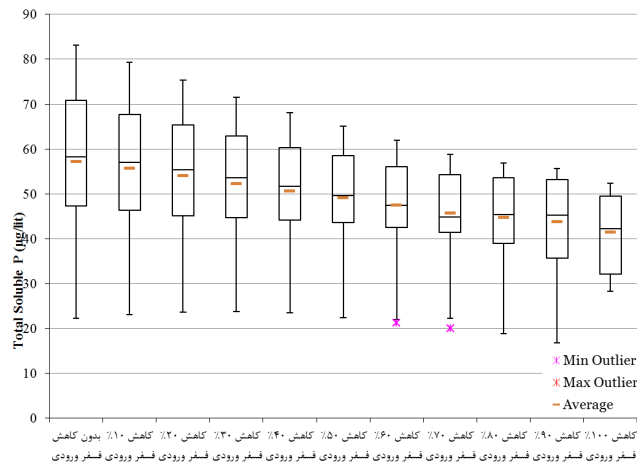
شکل ۴ - نمودار جعبه‌ای نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر در دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر در سال پنجم مدل‌سازی برای سناریوهای دارای کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت

بررسی اثر تغییر مقدار آب‌گیری دریاچه نشان می‌دهد که در صورت کم بودن آب در دسترس از رودخانه‌ی کن جهت ورود به دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر (به دلیل خشکسالی یا تخصیص به سایر مصرف‌کنندگان آب رودخانه‌ی کن) می‌توان درصد جایگزینی آب تبخیر شده را کاهش داد، زیرا این کاهش آب ورودی تأثیر اندکی (حدود ۶٪) بر روی غلظت میانگین فسفر در دوره‌ی ۵ ساله‌ی بهره‌برداری از دریاچه دارد. البته تأکید می‌شود که این کاهش جایگزینی نباید به اندازه‌ای باشد که کاربری‌های تعریف شده برای دریاچه را مختل کند یا این که اثرات سوء بر بوم‌سازگان دریاچه داشته باشد.

۷. بررسی تغییرات غلظت مواد مغذی و شرایط تغذیه‌گرایی در اثر تغییر غلظت فسفر در آب ورودی به دریاچه

یکی از راه‌کارهایی که جهت کاهش میزان غلظت فسفر در دریاچه در دوره‌ی بهره‌برداری پنج ساله به ذهن می‌رسد، این است که با استفاده از اقدامات مختلف مدیریتی یا سازه‌ای میزان فسفر آب رودخانه‌ی کن را پیش از ورود به دریاچه کاهش دهیم. این شبیه‌سازی‌ها برای درصد‌های مختلف کاهش فسفر (از صفر تا ۱۰۰٪ با گام‌های ۱۰٪) در سناریوی آب‌گیری در ماه‌های بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت صورت پذیرفته است و نمودار جعبه‌ای نتایج آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که حذف کامل آلاینده‌ی فسفر از آب ورودی به دریاچه (آب رودخانه‌ی کن) در دوره‌ی پنج ساله‌ی شبیه‌سازی می‌تواند میانگین غلظت فسفر در دریاچه در سال پنجم شبیه‌سازی را به اندازه‌ی ۲۸٪ کاهش دهد (از ۵۷ میکروگرم بر لیتر به ۴۱ میکروگرم بر لیتر). حداکثر غلظت فسفر در سال پنجم نیز به اندازه‌ی ۲۷٪ کاهش خواهد یافت (از ۸۳ میکروگرم بر لیتر به ۵۲ میکروگرم بر لیتر). ضمناً به عنوان یک روند کلی، با افزایش میزان درصد کاهش فسفر در آب ورودی به دریاچه، پراکندگی داده‌های غلظت فسفر در دریاچه کاهش می‌یابد؛ این مطلب از کاهش طول جعبه‌های رسم شده برای هر سری از داده‌های شبیه‌سازی شده قابل استخراج است. توجه شود که کاهش فسفر با درصد‌های

بالا غالباً نیازمند تجهیزات و دانش پیشرفته و صرف هزینه‌های هنگفت است، لذا تعیین این که انجام این تصفیه‌های شیمیایی برای دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر کارا هستند یا نه، نیازمند ارزیابی اقتصادی دقیقی از گزینه‌های مختلف و مقایسه‌ی نتایج آن با سایر اقداماتی است که می‌توان برای بهبود شرایط کیفی دریاچه انجام داد.



شکل ۵ - نمودار جعبه‌ای نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفر در دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر در سال پنجم مدل‌سازی با کاهش فسفر ورودی ۰٪ تا ۱۰۰٪.

۸. بررسی تغییرات غلظت مواد مغذی و شرایط تغذیه‌گرایی در اثر تغییر مقدار و الکوی خروج آب از دریاچه

در این قسمت از مطالعه، به بررسی حالت‌هایی می‌پردازیم که در آن‌ها در ایام آب‌گیری، بیش از مقدار نیاز دریاچه آب وارد آن گردد و در مقابل مقداری از آب درون دریاچه از طریق خروجی تعبیه شده در قسمت جنوبی آن از سیستم دریاچه خارج شود. این شرایط را اصطلاحاً سناریوی Bypass می‌نامیم. استفاده از سناریوی Bypass برای سناریوهای شامل آب‌گیری در ماه بهمن چندان مناسب نیست و با توجه به افزایش قابل توجه غلظت حداکثر فسفر در دریاچه، موجب تشدید شرایط بحرانی تغذیه‌گرایی در دریاچه می‌گردد. اما در مورد سناریوهایی که در ماه بهمن آب‌گیری ندارند، نظر به قابل توجه بودن درصد کاهش غلظت فسفر در دریاچه، استفاده از سناریوی Bypass مناسب است؛ البته باید توجه داشت که پیاده‌سازی این سناریو در دریاچه نیازمند آن است که هم آب کافی در دسترس داشته باشیم و هم اقدامات سازه‌ای لازم برای انتقال آب از دریاچه به پایین دست فراهم باشد. ضمناً در تعیین الکوی Bypass بهتر است تا حد امکان از دریاچه به عنوان محلی برای ذخیره‌ی آب برای کشاورزی پایین دست استفاده نکنیم و خروج آب از سیستم دریاچه را مطابق با برنامه‌ی آب‌گیری آن انجام دهیم.

۹. بررسی تغییرات غلظت مواد مغذی و شرایط تغذیه‌گرایی در اثر تغییر بوم‌سازگان درون دریاچه (با رهاسازی ماهی)

در کنار روش‌های متنوع مدیریتی، فیزیکی و شیمیایی برای کنترل آلاینده‌ی فسفر در پیکره‌های آبی، روش‌های بیولوژیکی نیز در موارد متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌های بیولوژیکی، دست‌کاری زنجیره‌های غذایی حاکم بر بوم‌سازگان دریاچه است. به عنوان نمونه‌ای از اقدامات بیولوژیکی، رهاسازی و رشد ماهی به تنهایی نمی‌تواند تأثیر زیادی بر کنترل میزان فسفر دریاچه در بلندمدت داشته باشد و از این حیث نیازمند برنامه‌ای مدون برای مدیریت ماهی‌ها هستیم. ماهی‌هایی که تأثیرشان نسبتاً زیاد است (نظیر ماهی زالون با ۱۳/۲٪ کاهش فسفر) مزیت اقتصادی زیادی ندارند و به همین دلیل تمایل برای رهاسازی آن‌ها در دریاچه اندک است. شکل‌گیری بوم‌سازگان مناسب و پایدار برای ماهی‌های سازگار با شرایط دریاچه زمان‌بر است و این فرایند حداقل سه سال به طول می‌انجامد. طبیعی است در صورتی که افزون بر ظرفیت دریاچه ماهی وارد آن نماییم، ماهی‌ها دچار مرگ و میر شدید می‌شوند.



۱۰. نتیجه‌گیری

- مدل شبیه‌ساز AQUATOX به عنوان یکی از مدل‌های کارا برای بررسی وضعیت تغییرات فسفر در دوره‌ی بهره‌برداری دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر، مورد استفاده قرار گرفته است و به لحاظ اعتبارسنجی، عملکرد مدل در شبیه‌سازی فسفر کُل، بهتر از عملکرد آن در شبیه‌سازی نیتروژن کُل ارزیابی می‌شود.
- حضور ماه بهمن در دوره‌ی آب‌گیری موجب می‌شود تا به طور متوسط غلظت حداکثر فسفر در دریاچه ۳۱٪ افزایش یابد، لذا به عنوان یک الگوی بهره‌برداری از دریاچه، پیش‌نهاد می‌شود که تا حد امکان از ورود آب در ماه بهمن به دریاچه خودداری نموده و به جای آن از آب‌گیری در سایر ماه‌ها استفاده شود.
- در صورت کم بودن آب در دسترس از رودخانه‌ی کن جهت ورود به دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر (به دلیل خشکسالی یا تخصیص به سایر مصرف‌کنندگان آب رودخانه‌ی کن) می‌توان درصد جایگزینی آب تبخیر شده را کاهش داد (تا ۲۰٪ حجم آب مورد نیاز)، زیرا این کاهش آب ورودی تأثیر اندکی (حدود ۶٪) بر روی غلظت میانگین فسفر در دوره‌ی ۵ ساله‌ی بهره‌برداری از دریاچه دارد.
- کاهش فسفر با درصدهای بالا غالباً نیازمند تجهیزات و دانش پیشرفته و صرف هزینه‌های هنگفت است، لذا استفاده از این روش به عنوان راه‌کاری بلندمدت توجیه اقتصادی چندانی ندارد.
- بهتر است تا حد امکان از دریاچه به عنوان محلی برای ذخیره‌ی آب برای کشاورزی پایین‌دست استفاده نکنیم و خروج آب از سیستم دریاچه را مطابق با برنامه‌ی آب‌گیری آن انجام دهیم.

۱۱. مراجع

1. Dr, M.G. (2003), "Design guidelines for developers", <http://www.melbournewater.com.au>.
2. Wetzel, R.G. (2001), "Limnology: Lakes and river ecosystems", Academic Press, USA.
3. Welch, E.B. (1992), "Ecological effects of wastewater: applied limnology and pollutant effects", Chapman & Hall, London, UK.
4. Makynen, A. (2009), "AQUATOX - ecological risk assessment model – A tool for impact assessment for waters", Master's Thesis, University of Jyväskylä, Finland.
5. Kianirad, E., Bedoya, D., Ghosh, I., McGravey, K. and Novotny, V. (2006), "Technical report No.7: Review of watershed ecological models", Center for Urban Environmental Studies, Northeastern University.
6. Ruley, J.E. and Rusch, K.A. (2004), "Development of simplified phosphorus management model for a shallow, subtropical urban Hypereutrophic lake", Ecological Engineering, **22**, pp 77–98.
۷. شرکت مهندسی سد تونل پارس. (۱۳۹۱)، "مطالعات مرحله‌ی اول دریاچه‌ی مصنوعی چیتگر (شامل بند انحرافی، سیستم انتقال، سد و سازه‌های وابسته): گزارش مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی (جلد اول - وضعیت موجود)"، شماره‌ی مدرک: CAL-STP-R-GEN-EN-BD-001B، تهران.
8. Park, R.A., Clough, J.S. and Wellman, M.C. (2008), "AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems", Ecological Modeling, **213**, pp 1–15.
9. Hargreaves, J. and Brunson, M. (1996), "Carbon Dioxide in fish ponds", Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 468.
10. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007), "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation", Transactions of the ASABE, **50**, pp 885–900.