

# تغذیه‌گرایی مخازن سدها: مدل‌سازی دو بعدی مخزن کرخه

عباس افشار<sup>۱</sup>

مطهره سعادت‌پور<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۶۷/۱۸ پذیرش ۸۸/۱/۲۷)

## چکیده

هدف از این مطالعه، توسعه مدلی برای مخزن سد کرخه به منظور (۱) شبیه‌سازی دما و پارامترهای کیفی، (۲) کمک در توسعه مدلی برای درک بهتری از دما و پارامترهای کیفی در عمق مخزن و فرایندهای مؤثر بر آن و (۳) آنالیز حساسیت رفتار سیستم به ضرایب انتخاب شده در کالیبراسیون مدل و نیز تغییر در بار آلاینده‌های ورودی به سیستم بود. مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی دما و پارامترهای کیفی در مخزن، در سالهای ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۵ مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های ورودی به سیستم شامل هندسه مخزن، شرایط آب و هوایی، شدت جریان ورودی، دما و غلظت پارامترهای کیفی جریان ورودی به مخزن می‌باشد. پارامترها و ضرایب انتخاب شده در کالیبراسیون مدل، شامل پارامترهای مؤثر بر دما، غلظت ارتوفسفات، آمونیوم، نیترات، کلروفیل آ و اکسیژن محلول بود. از سایر پارامترهای شبیه‌سازی شده می‌توان به مواد آلی محلول معلق، جامدات معلق، جامدات محلول، CBOD و pH اشاره کرد. کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل بر اساس پروفیل‌های قائم دما و غلظت پارامترهای کیفی در چهار مقطع مخزن صورت پذیرفت. کالیبراسیون مدل در دوره اردیبهشت تا آذر ۱۳۸۴ و تأیید آن در طی دی ماه ۱۳۸۴ تا تیر ۱۳۸۵ انجام گردید. نتایج، نشان‌دهنده همخوانی نسبتاً مناسب نتایج حاصل از مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی هستند. پس از ترسیم تصویر کلی از شرایط تغذیه‌گرایی مخزن، آنالیز حساسیت به پارامترهای مؤثر در کالیبراسیون دما و کیفیت آب و همچنین نقش تغییر در بار آلاینده‌های ورودی به سیستم در پیش‌بینی رفتار سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده اهمیت بار فسفر در کنترل روند تغذیه‌گرایی در مخزن کرخه بود.

**واژه‌های کلیدی:** آنالیز حساسیت، تغذیه‌گرایی، شبیه‌سازی کیفی، مخزن کرخه، مدل CE-QUAL-W2.

## Eutrophication in Dam Reservoirs: 2D Modelling of the Karkheh Reservoir

Abbas Afshar<sup>1</sup>

Motahareh Saadatpour<sup>2</sup>

(Received Sep. 9, 2007 Accepted Apr. 16, 2009)

### Abstract

The purpose of this study was to develop a model of the Karkheh Dam Reservoir that can (1) simulate temperature and water quality in the reservoir, (2) aid in developing a more in-depth understanding of reservoir circulation and quality as well as the processes affecting these, and (3) carry out a sensitivity analysis to examine the response of the model to specific parameters and coefficients and tributaries concentration. The two-dimensional model CE-QUAL-W2 was used to simulate the hydrodynamics, temperature, and water quality in the Karkheh Reservoir over the years 2005 through 2006. Input data included Lake Bathymetry, meteorological conditions, inflow rates, inflow temperature, water quality, and lake outflows. The parameters and coefficients affecting model calibration included  $PO_4$ ,  $NH_4$ ,  $NO_3$ , DO, and Chl *a* concentration. Other simulated constituents included dissolved and particulate organic matter, total suspended and dissolved solids, CBOD, and pH. Calibration and validation of water temperature and water quality relied upon vertical profile data taken in the four parts of the lake. Model calibration was accomplished during May to December 2005 and later evaluated during the period from December 22, 2005 to July 22, 2006. The model results show approximately proper convergence to observed data. After considering the eutrophication process in the Karkhe Reservoir, sensitivity analysis was performed on important parameters affecting temperature and water quality simulation. Also, sensitivity analysis was performed on tributaries concentration to predict system reactions. The results show that phosphorus concentration is a limiting factor in the eutrophication process in the Karkhe Reservoir.

**Keywords:** Sensitivity Analysis, Eutrophication, Water Quality Simulation, Karkhe Reservoir, CE-QUAL-W2 Model.

1- Prof. of Water Resources Engineering, Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran  
2- Water Resources Candidate of Water Resources Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 77491209, m\_saadatpour2002@yahoo.com

۱- استاد گروه آب دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
۲- کاندیدای دکترای منابع آب، دانشگاه علم و صنعت ایران، کارشناس گروه برنامه‌ریزی منابع آب و محیط زیست، دفتر فنی شرکت مدیریت منابع آب ایران (نویسنده مسئول) ۰۲۱) ۷۷۴۹۱۲۰۹ m\_saadatpour2002@yahoo.com

منسون<sup>۷</sup> را مورد بررسی قرار دادند. در این کار، پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، نتایج آنالیز حساسیت نشان از تأثیر مهم ضریب پوشش باد، ضریب شزی و ضریب تبادل گرمایی رسوبات در شکل‌گیری لایه‌بندی حرارت داشت. تأثیر دمای آب ورودی نیز در طی سالهای بارش نرمال، بسیار زیاد بوده اما در طی سالهای خشک، تأثیر این پارامتر بسیار کم است [۳]. در سال ۲۰۰۲، اسلومینسکی و همکاران<sup>۸</sup> با کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز سیستم رودخانه و مخزن واقع بر رودخانه اسپوکن<sup>۹</sup> با استفاده از داده‌های سالهای ۱۹۹۱ و ۲۰۰۰، بر روی برخی پارامترهای مؤثر بر رفتار هیدرودینامیکی و کیفی مخزن، آنالیز حساسیت انجام دادند [۴]. در سال ۲۰۰۴، ری-شیان و همکاران<sup>۱۰</sup> با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 و داده‌های سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ به کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل تغذیه‌گرایی مخزن شیمن<sup>۱۱</sup> و سپس به شبیه‌سازی غلظت کلروفیل آ (که به صورت Chl a نمایش داده می‌شود) تحت سناریوهای مختلف تخصیص بار آلاینده پرداختند. بر اساس نتایج کار آنها، کاهش ۹۰ درصد تخصیص بار آلاینده‌ها، منجر به تغییر وضعیت مخزن از حالت تغذیه‌گرا به شاداب گردید. استفاده از این مدل، اطلاعات ارزشمندی در ارزیابی استراتژی‌های مختلف تخصیص بار آلاینده‌های آلی در حوضه آبریز در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار داد [۵]. در سال ۲۰۰۵، سولیوان<sup>۱۲</sup> و رواند<sup>۱۳</sup> پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی در مخزن هنری هاگ<sup>۱۴</sup> با استفاده از داده‌های سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳، به آنالیز حساسیت نسبت به برخی پارامترها پرداختند [۶]. در سال ۲۰۰۶، مک‌کاتجن<sup>۱۵</sup> با استفاده از مدل‌سازی به تخمین محدودیت‌های منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای برای دستیابی به استانداردهای کیفی رودخانه‌ها، خلیجها و مخازن پرداخت. در این کار، وی به بررسی انواع ابزار مدل‌سازی کیفی مخازن، کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز کیفی، آنالیز عدم قطعیت در تعریف حاشیه امنیت در حفاظت از سلامتی انسان و اکوسیستم و نیز آنالیز اقتصادی در راهکارهای حفاظتی توجه کرد [۷]. در سال ۲۰۰۶، جینگ و همکاران<sup>۱۶</sup> به ارائه راهکارهای مدیریتی حوضه آبریز که شامل کنترل آلاینده‌های غیر

به دلیل نبود دیدگاه جامع‌نگر و مبتنی بر توسعه پایدار، بحران کیفی آب تهدیدی جدی به شمار می‌آید. علی‌رغم اینکه زمان طولانی از عمر محدود سدهای در دست بهره‌برداری کشور، به‌خصوص سدهایی که در مناطق مشرف به دشت‌های حاصلخیز احداث شده‌اند نمی‌گذرد، با این وجود، مشکلات کیفی زیادی وجود دارد و شواهد، رشد فزاینده این مشکلات را نشان می‌دهد. امروزه، امکان پیش‌بینی اثرات فرایندهای طبیعی و فعالیتهای انسانی بر روی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پیکره‌های آبی مورد بررسی با استفاده از مدل‌سازی، امکان‌پذیر است. مدل‌ها، در سطح گسترده‌ای در سنجش اثرات بارهای آلاینده‌های تخلیه شده به پیکره‌های آبی از تصفیه‌خانه یا دیگر منابع نقطه‌ای و گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین امکان ارزیابی اثرات اجرای دستورالعمل‌های بهره‌برداری مختلف از مخازن، بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز بر کیفیت آب نیز در ابعاد زمانی و مکانی وجود دارد. در دو دهه گذشته با تلفیق اقدامات پایش و قابلیت مدل‌های کیفی استفاده‌های زیادی در مدیریت کیفی مخازن و حوضه‌های آبریز به عمل آمده است. در سال ۱۹۸۵، ایمیرگر<sup>۱</sup> با استفاده از مدل هیدرودینامیکی DYRESM و اکنش مخزن ولینگتون<sup>۲</sup> را در برابر جریان‌های شور ورودی و اعمال سیاست‌های بهره‌برداری، مطالعه و تأثیر افزایش و یا کاهش شوری جریان‌های ورودی را بر میانگین شوری مخزن بررسی نمود. مطالعات نشان داد که منحرف کردن آب با غلظتهای زیاد شوری یکی از مؤثرترین روشهای کاهش شوری در طرح مورد مطالعه است [۱]. هایز و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۸ تلاش کردند تا با اعمال تغییراتی در بهره‌برداری از سیستم‌های برقابی، سبب ارتقای سطح کیفی آب خروجی از مخزن سد گردند. ذخیره کردن آب در سد اغلب سبب تخریب کیفیت آن می‌شود که شاید اصلی‌ترین علت داخلی آن لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن‌خواهی رسوبات کف باشد. ایشان یک مدل مدیریت یکپارچه کمی و کیفی ارائه دادند که با حفظ اهداف کیفی آب، سعی در پیشینه کردن درآمد خالص بهره‌برداری از نیروگاه داشت. در این بررسی، سیاست رهاسازی بهینه روزانه از مخزن سدی بر روی رودخانه کامبرلند<sup>۴</sup> برای تابستان، با لحاظ کردن کمترین اثر بر تولید انرژی و دیگر اهداف طرح، استخراج شد [۲]. چانگ<sup>۵</sup> و او<sup>۶</sup> اثرات اختلاط جریان در لایه‌بندی مخزن در مخازن واقع در شرایط آب و هوایی

<sup>7</sup> Mansoon

<sup>8</sup> Slominski et al.

<sup>9</sup> Spoken

<sup>10</sup> Ray-Shyan et al.

<sup>11</sup> Shihmen

<sup>12</sup> Sullivan

<sup>13</sup> Round

<sup>14</sup> Henry Hagg

<sup>15</sup> McCutcheon

<sup>16</sup> Jing et al.

<sup>1</sup> Imberger

<sup>2</sup> Wellington Reservoir

<sup>3</sup> Hays et al.

<sup>4</sup> Cumberland

<sup>5</sup> Chung

<sup>6</sup> Oh

نقطه‌ای با به‌کارگیری "بهترین روشهای مدیریتی" (BMP)<sup>۱</sup> بوده، پرداختند. در این کار، ارائه برنامه BMP، مبتنی بر کنترل کیفیت آب مخزن با کنترل منابع آلاینده غیر نقطه‌ای همراه بود، به‌گونه‌ای که سیستم مدل‌سازی شامل مدیریت حوضه آبریز<sup>۲</sup> و مدل شبیه‌ساز کیفی (CE-QUAL-W2) برای ایجاد ارتباط بین اقدامات BMP و کیفیت آب به‌کار گرفته شد. با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، برنامه‌های BMP در سطح حوضه آبریز ارائه گردید. این روش در حوضه آبریز مخزن سویفت کرک<sup>۳</sup> در ویرجینیا<sup>۴</sup> به‌کار گرفته شد. نتایج، نشان‌دهنده این واقعیت است که روشهای پیشنهادی در توسعه برنامه‌های BMP منجر به مقبولیت کاملی در کیفیت آب می‌گردند [۸]. عیسی‌زاده و همکاران در سال ۱۳۸۴، با استفاده از مدل اسندگرس و امیلیا<sup>۵</sup> به شبیه‌سازی تغییرات غلظت فسفر در مخزن سد لتیان پرداخته و همچنین سناریوهای مدیریتی مختلفی را برای کاهش غلظت فسفر در مخزن بررسی نمودند [۹]. در سال ۱۳۸۷ غفوری و همکاران، در بررسی اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سد مخزنی کرخه بر محیط‌زیست منطقه، به تحلیل کیفیت آب در مخزن کرخه و خروجی آن با استفاده از داده‌های میدانی پرداختند [۱۰].

در دهه گذشته محققان زیادی از موتور مدل CE-QUAL-W2 در طرحهای پژوهشی و اجرایی خود استفاده کرده اند که حکایت از کارایی مدل مذکور دارد. ارتقای پیوسته مدل و وجود نسخه‌ها و ویرایش‌های مکرر آن نشان از علاقه وافر محققان به استفاده از مدل فوق دارد. در این میان می‌توان به کار افشار در سال ۱۳۸۵ برای مدل‌سازی و کالیبراسیون دما و پارامترهای کیفی تغذیه‌گرایی برای دوره ژانویه تا اکتبر سال ۲۰۰۰ اشاره کرد که در آن، آزمون موفقیت‌آمیز مدل دو بعدی مذکور برای مخزن سد Long Lake گزارش شده است. سپس کار تأیید مدل با شبیه‌سازی پیوسته رژیم دما و پارامترهای کیفی تغذیه‌گرایی مخزن و کنترل آن با لایه‌بندی حرارتی و کیفی مشاهده شده در سال ۲۰۰۱ انجام شد [۱۱].

هدف اصلی در این مطالعه، بررسی شرایط تغذیه‌گرایی و تهیه مدل پیش‌بینی رفتاری تغذیه‌گرایی در مخزن سد کرخه است که شامل موارد زیر خواهد بود:

۱- ترسیم تصویر کلی از وضعیت تغذیه‌گرایی کنونی مخزن سد کرخه با توجه به داده‌های هیدرولوژیکی و کیفی جمع‌آوری شده در محدوده مورد بررسی؛

۲- کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل؛

۳- آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی رفتار سیستم؛

۴- بررسی رفتار تغذیه‌گرایی مخزن سد تحت بارهای متفاوت ورودی آلاینده.

## ۲- روش تحقیق

با علم به شرایط ویژه حاکم بر سدهای کشور، به‌نظر می‌رسد پرداختن به مسائل زیست‌محیطی در سدها می‌تواند راهکار مناسبی برای کمک به تصمیم‌گیران در پیش‌بینی و پیشگیری از تخریب و زوال آبهای گردد که با صرف هزینه‌های هنگفت، تأمین و ذخیره شده اند. در این کار، با استفاده از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 و با استفاده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی اردیبهشت تا آذر ۱۳۸۴، مدل تغذیه‌گرایی مخزن کرخه شبیه‌سازی و کالیبره شد. در مدل شبیه‌سازی مخزن کرخه ابتدا پارامترهای هیدرودینامیکی (سطح آب)، دما و شرایط کیفی کالیبره شده و سپس در دوره دی ماه ۱۳۸۴ تا تیرماه ۱۳۸۵، صحت‌سنجی مدل انجام شد. به‌عبارتی در فرایند کالیبراسیون، پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی رفتار سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس انتخاب گردیدند. در واقع، انتخاب ضرایب کالیبراسیون مدل بر اساس ضرایب به‌کار گرفته در موارد مشابه در مراجع، استفاده از موارد پیش‌فرض مدل، آنالیز حساسیت و سعی و خطا صورت پذیرفت و سپس شرایط کلی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن سد کرخه تصویر گردید و در دوره صحت‌سنجی مورد تأیید قرار گرفت. پس از تأیید مدل، با هدف روشن نمودن تصویر کلی از حساسیت رفتار سیستم به پارامترهای کالیبراسیون مدل و نیز چگونگی رفتار سیستم با تغییر میزان بار آلاینده ورودی (در اثر تغییر در کاربری اراضی بالادست یا کنترل منابع آلاینده آبی)، آنالیز حساسیت بر روی برخی از پارامترهای کالیبراسیون مدل و نیز تغییر میزان بار ورودی صورت گرفته و رفتار سیستم در اثر تغییر در برخی پارامترهای مؤثر در شکل‌گیری پروفیل‌های دما و شرایط کیفی مخزن و همچنین پیش‌بینی رفتار سیستم در نتیجه تغییر در بار آلاینده‌های ورودی مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به تعدد بسیار زیاد انواع پارامترهای کیفی قابل سنجش و از طرفی هزینه بالای هر نمونه‌گیری و آزمایش آن، انتخاب درست پارامترهای مهم و تعیین نوع آنها بر اساس شرایط زمانی از مهم‌ترین نکات و مسائل هر مطالعه میدانی زیست‌محیطی آبی است. لذا تعیین میزان شدت این پدیده و اهمیت آن و تأثیر بر کیفیت آب پایین‌دست، از اهداف مطرح در این مطالعه بود. پارامترهای کیفی مورد آزمایش شامل TSS، TDS، NO<sub>2</sub>، NO<sub>3</sub>، PO<sub>4</sub>، P، کل، DO، Chl a و pH بودند که در فاصله زمانی ۱ ماهه در سه مقطع مخزن و یک نقطه در بالا دست مخزن مورد پایش قرار گرفتند. در داخل

<sup>1</sup> Best Management Practice (BMP)

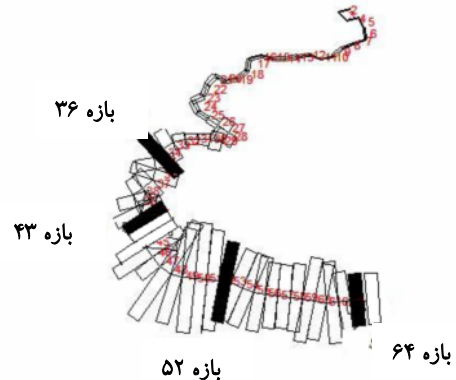
<sup>2</sup> Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF)

<sup>3</sup> Swift Creek

<sup>4</sup> Virginia

<sup>5</sup> Snodgrass-Omelia

مخزن نمونه‌گیری به صورت نیمرخ عمودی، در سه مقطع نمونه‌گیری انجام گردید. اندازه‌گیری در عمق مخزن نیز، در فواصل ۵ متری و بسته به عمق آب در مخزن در هر یک از قسمت‌ها، تا اعماق بین ۳۰ تا ۶۰ متری انجام شد. موقعیت هندسی نقاط پایش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاههای نمونه‌برداری در طول مخزن

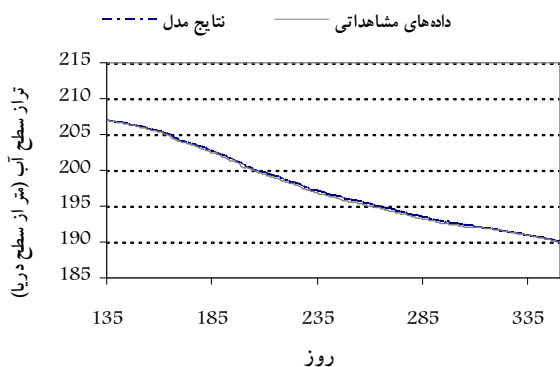
شامل ۶۶ بازه<sup>۱</sup> در طول خواهد بود. همچنین بعد قائم مخزن به ۵۴ لایه تقسیم‌بندی شده که عمق لایه‌ها از ۱/۵ متر در سطح آب مخزن به ۴ متر در کف مخزن افزایش یافت. سپس چیدمان قرارگیری قطعات طولی و زاویه آنها برای مدل تعیین می‌گردد. همچنین در فایل ورودی، تراز اولیه آب در نخستین روز شبیه‌سازی برای مدل تعیین می‌گردد. پارامتر هیدرولیکی زبری کف مخزن نیز برای مقاطع مختلف طولی در مخزن در این فایل ورودی تعریف می‌گردد [۱۲]. سایر اطلاعات ورودی به مدل، شامل اطلاعات هواشناسی، شرایط اولیه مدل، شرایط مرزی مدل، دبی ورودی و خروجی، دمای آب ورودی، غلظت مواد مغذی ورودی و سازه‌های موجود در سیستم می‌باشد.

### ۳-۱-۱- تراز سطح آب

خطاهای کالیبراسیون مدل در تراز آب مخزن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. شکل ۲ تراز سطح آب پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج خطاهای کالیبراسیون تراز سطح آب

دوره مورد بررسی	میانگین خطا (متر)	انحراف معیار (متر)	تعداد روزهای مشاهداتی
۸۴/۲/۲۷ تا ۸۴/۹/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۵	۲۳۰ روز



شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای پروفیل سطح آب داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل

### ۳-۱-۲- دما

شکل ۳، نتایج مقایسه پروفیل دما در عمق مخزن با استفاده از نتایج مدل و داده‌های واقعی و جدول ۲ خطاهای مربوط به کالیبراسیون دما در مخزن را نشان می‌دهد. برای نمونه، همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد در ماه‌های گرم، لایه‌بندی حرارتی

## ۳- کاربرد مدل شبیه‌سازی

### ۳-۱- کالیبراسیون مدل

سد مخزنی کرخه بر روی رودخانه کرخه در بالادست ایستگاه آبرسانی پای پل و در ۱۶۷ کیلومتری شمال اهواز واقع شده است. این سد با هدف اصلی کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی آب رودخانه کرخه برای تأمین و آبیاری اراضی دشت حمیدیه، قدس، دشت آزادگان و دشت عباس واقع در شمال غربی و غرب استان خوزستان به همراه تولید انرژی برق و همچنین کنترل سیلابهای فصلی و جلوگیری از خسارات وارده به پایین دست احداث گردیده است. سد عظیم کرخه یکی از مهم‌ترین و ثمربخش‌ترین طرحهای ملی کشور به‌شمار می‌رود. این سد از نوع خاکی با هسته رسی است که ارتفاع آن از کف رودخانه ۱۲۴ متر، طول تاج ۳۰۳۰ متر، حجم ۵۳۴۶/۸ میلیون متر مکعب و سطح ۱۶۲/۴۷ کیلومتر مربع در تراز نرمال می‌باشد. سازه‌هایی که در این سیستم مدل‌سازی می‌شوند عبارت‌اند از یک سرریز، دو سازه خروجی شامل تخلیه‌کننده تحتانی و نیروگاه و تونل دشت عباس که به‌عنوان یک محل برداشت انتخابی در نظر گرفته شد.

کالیبراسیون مدل شامل کالیبراسیون هندسه مدل، تراز آب مخزن، دما و غلظت مواد مغذی بود. در این کار نتایج کالیبراسیون هندسه مدل از مرجع [۱۲] مورد استفاده قرار گرفت. اولین فایل ورودی به مدل، فایل هندسه مخزن است که لازم است در آن ژئومتری مخزن برای مدل تعریف گردد. در این شبیه‌سازی، طول مخزن به فواصل مساوی ۱۰۰۰ متری تقسیم شده و در مجموع

<sup>1</sup> Segment

قابل توجهی در مخزن شکل می‌گیرد و با سرد شدن هوا (کم شدن دما)، عمق رولایه افزایش و عمق میان لایه کاهش می‌یابد.

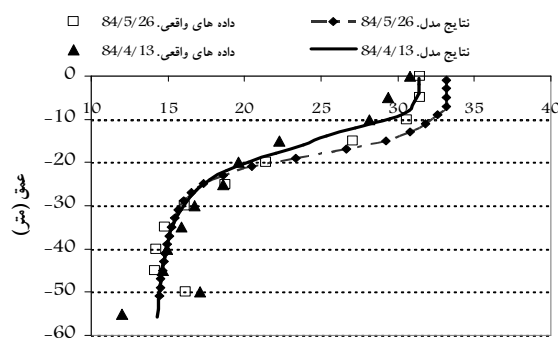
دوره شیشه‌سازی با کاهش دما، میزان لایه‌بندی نیترات در سیستم کاهش می‌یابد. در طول فصول گرم سال، به دلیل گسترده بودن فعالیتهای کشاورزی در بالادست مخزن و مصرف کودهای نیتراتی، غلظت نیترات ورودی به سیستم نسبت به ماههای سرد سال بیشتر است. بار آلاینده گسترده ازت در سیستم، تامین کننده ازت مورد نیاز فعالیتهای جلبکی در سیستم می‌باشد.

جدول ۲- نتایج خطاهای کالیبراسیون دمای آب

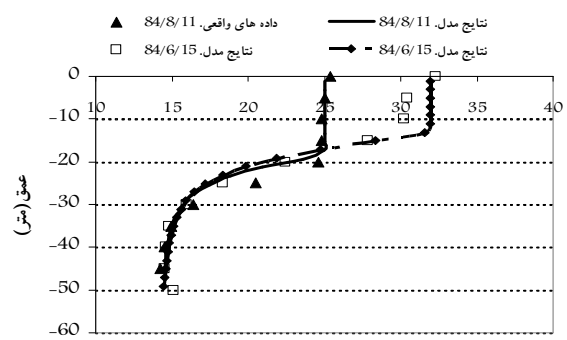
بازه	میانگین خطای		دفعات نمونه برداری
	مطلق (درجه سلسیوس)	درصد خطا	
۳۶	۱/۳	۷	۸
۴۳	۱/۴۱	۶/۸	۸
۵۲	۱/۱۶	۶/۳	۸
۶۴	۱/۳۸	۷	۸

جدول ۳- نتایج خطاهای کالیبراسیون در غلظت ارتوفسفات - فسفر

بازه	میانگین خطای مطلق (mg/L)	انحراف معیار (mg/L)	درصد خطا	دفعات نمونه برداری
۴۳	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰	۸
۵۲	۰/۰۷	۰/۰۶	۲۳	۸
۶۴	۰/۰۶	۰/۰۷	۲۲	۸



دما (درجه سلسیوس)

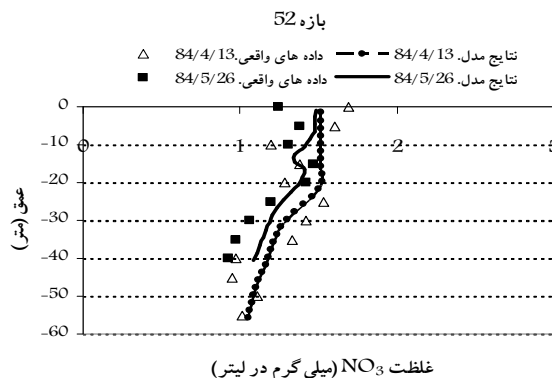
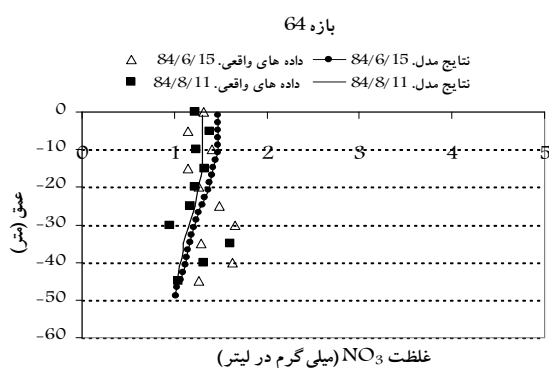


دما (درجه سلسیوس)

شکل ۳- مقایسه نتایج مدل سازی دمای آب مخزن با داده‌های مشاهده‌ای در بازه ۶۴

جدول ۴- نتایج خطاهای کالیبراسیون مدل سازی ازت نیتراتی

شماره بازه	مقدار میانگین خطای مطلق (mg/L)	انحراف معیار (mg/L)	درصد خطا	دفعات نمونه برداری
۳۶	۰/۲۳	۰/۳۱	۱۲	۸
۴۳	۰/۲۹	۰/۳۸	۱۴/۷	۸
۵۲	۰/۲۷	۰/۳۸	۱۵/۹	۸
۶۴	۰/۲۵	۰/۳۵	۱۴/۳	۸



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل سازی غلظت ازت نیتراتی در مخزن با داده‌های مشاهداتی

### ۳-۱-۵- آمونیوم

جلبکها از آمونیوم در طی فرایند فتوسنتز برای تولید پروتئین استفاده می‌کنند. در مواردی نیتروژن به‌عنوان یک عامل محدود کننده در رشد جلبکها محسوب می‌گردد. البته برخی گونه‌های جلبکی قادر به استفاده از نیتروژن اتمسفری برای ایجاد تطابق با شرایط محیطی و ادامه فرایند رشد می‌باشند. در جدول ۵ نیز نتایج خطاهای کالیبراسیون مدل سازی آمونیوم مشاهده می‌شود. گونه‌های جلبکی به نسبت فاکتور ترجیح آمونیوم که بر اساس غلظت آمونیوم و نیترات و ضریب نیمه اشباع ترجیح آمونیوم در سیستم حاصل می‌گردد، از پارامترهای کیفی آمونیوم و نیترات برای جریان رشد و نمو خود استفاده می‌کنند [۱۳]. غلظت آمونیوم مانند ارتوفسفات، با کاهش دما و کند شدن و توقف رشد جلبکها، در سیستم افزایش می‌یابد. میزان لایه بندی غلظت آمونیوم نیز با سرد شدن هوا، کاهش می‌یابد.

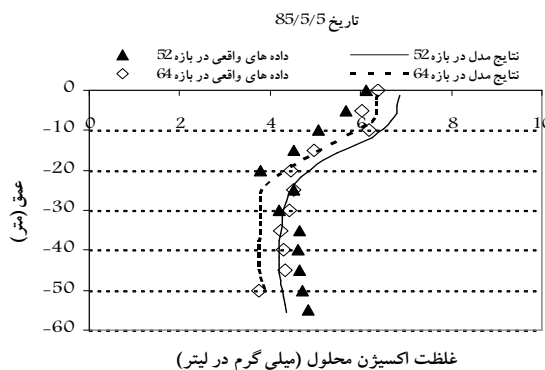
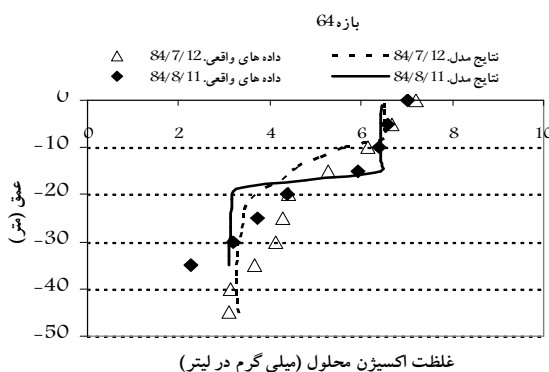
### ۳-۱-۶- اکسیژن محلول

اکسیژن یکی از مهم‌ترین عناصر در یک اکوسیستم آبی است. اکسیژن، ماده‌ای ضروری برای موجودات زنده است. بسیاری از واکنش‌های شیمیایی از طریق اکسیداسیون کنترل می‌شوند. غلظت اکسیژن نشان‌دهنده سلامت اکوسیستم آبی است. در مدل CE-QUAL-W2، امکان مدل سازی فرایند در شرایط هوازای و بی‌هوازی وجود دارد. توانایی مدل سازی شرایط بی‌هوازی بسیار مهم است چراکه اطلاعات مربوط به مشکلات بالقوه کیفیت آب را فراهم می‌نماید.

شکل ۵ غلظت اکسیژن محلول را در بازه‌های ۵۲ و ۶۴ را در مقایسه با داده‌های واقعی نمایش می‌دهند. در جدول ۶ نتایج خطاهای کالیبراسیون مدل سازی اکسیژن محلول ارائه شده است. مدل سازی صحیح اکسیژن محلول تنها با درک صحیح و عمیق از

جدول ۵- نتایج خطاهای کالیبراسیون مدل سازی آمونیوم

بازه	میانگین خطای مطلق (mg/L)	انحراف معیار (mg/L)	درصد خطا	دفعات نمونه برداری
۳۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷	۱۸	۸
۴۳	۰/۰۶	۰/۰۹	۱۷	۸
۵۲	۰/۰۹۶	۰/۰۷	۲۰	۸
۶۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۲۰	۸



شکل ۵- مقایسه نتایج مدل سازی غلظت اکسیژن محلول در مخزن با داده‌های مشاهداتی

جدول ۶- نتایج خطاهای کالیبراسیون مدل‌سازی اکسیژن محلول

بازه	میانگین خطای مطلق (mg/L)	انحراف معیار (mg/L)	درصد خطا	دفعات نمونه برداری
۳۶	۰/۸۹	۱/۱۶	۱۰	۸
۴۳	۰/۸۲	۱/۲۶	۸	۸
۵۲	۱/۰۴	۱/۳۵	۱۲	۸
۶۴	۰/۹۲	۱/۳	۱۱	۸

فصول سرد (روزهای ۳۵۰ تا ۴۳۰)، انتظار می‌رود رشد کلروفیل آ کاهش و سپس با افزایش دما، افزایش یابد و مدل‌سازی نیز مؤید همین موضوع است. با توجه به اینکه در برخی دوره‌های زمانی داده‌های ارائه شده کلیه پارامترهای کیفی موید یکدیگراند، این سری داده‌ها، معیار مدل‌سازی قرار گرفتند.

#### ۴- تأیید مدل

به منظور تأیید مدل از داده‌های دی ۸۴ تا تیر ۸۵ استفاده شد که در ادامه بیان شده است. لازم به ذکر است که نتایج مدل با داده‌های برداشتی در بازه‌هایی که به عنوان نقاط پایش انتخاب گردیدند، مقایسه شدند. شکل‌های ۷ تا ۱۱ نتایج شبیه‌سازی دما، آمونیم، نترات، فسفات و اکسیژن محلول را در طی دوره صحت‌سنجی مدل در نقاط پایش نشان می‌دهند. تطابق نسبی مطلوب بین نتایج مدل و داده‌های میدانی نشان از انتخاب درست ضرایب موثر در کالیبراسیون دارد. البته لازم به یادآوری است که برخی داده‌های مشاهداتی به دلیل اشتباهات اندازه‌گیری، نمی‌توانند معیار مناسبی برای ارزیابی باشند. برای مثال غلظت بالای کلروفیل آ در فصول سرد سال، غلظت بالای فسفر یا آمونیم در لایه‌های بالایی (نزدیک سطح آب) در فصول گرم سال (در شرایطی که بار فوسفور یا ازت ورودی نسبت به ماه‌های قبلی تغییر قابل توجهی نداشته است) به نوعی داده‌های با ارزش پایین را در اختیار قرار می‌دهند.

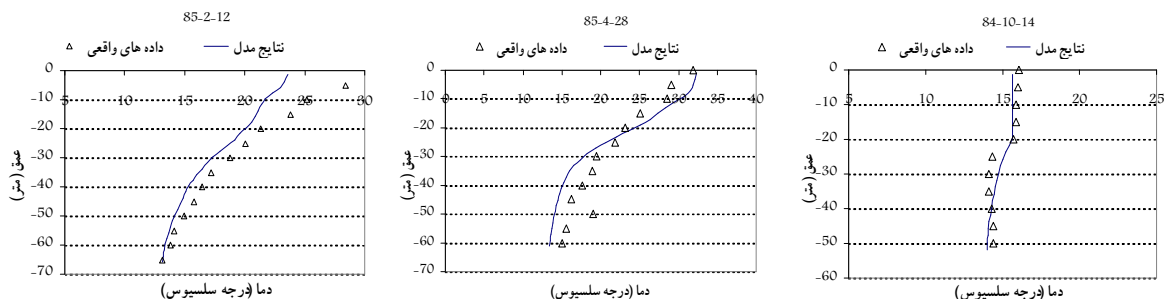
فرایندهای کیفیت آب در مخزن صورت می‌گیرد. در دوره کالیبراسیون تقریباً انطباق مناسبی بین داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل وجود دارد.

#### ۳-۱-۷- کلروفیل آ

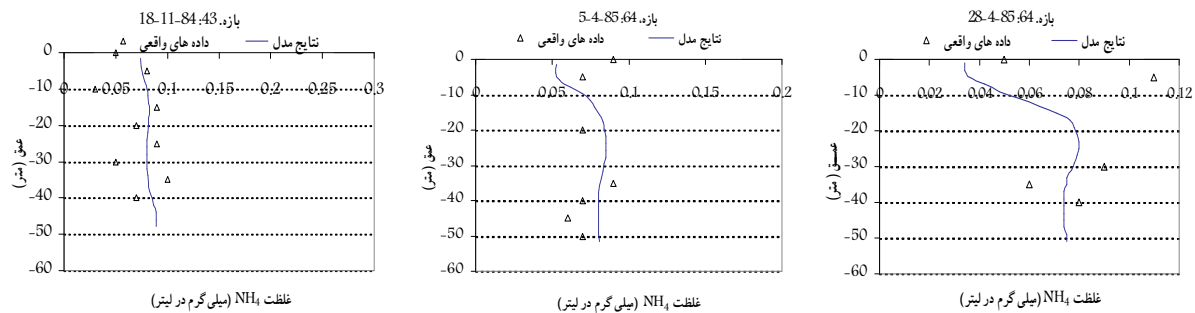
ماده حیاتی جلبک پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های کلروفیل آ با فرض نسبت توده حیاتی جلبک به کلروفیل آ معادل با ۱۳۰ انجام گردید و حداکثر نرخ رشد جلبک در  $0.34 \text{ day}^{-1}$  کالیبره شد. همچنین حداکثر نور اشباع در مقدار  $55 \text{ w/m}^2$  کالیبره شده است. رشد فیتوپلانکتون تحت تأثیر هیدرودینامیک و زمان ماند مخزن است. یکی از پارامترهای موثر بر رشد جلبک‌ها، دما می‌باشد که همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود با توجه به کاهش دما در



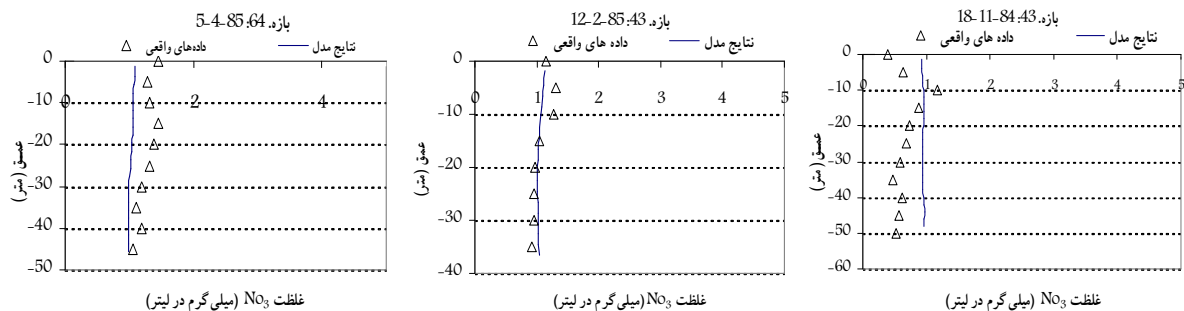
شکل ۶- غلظت کلروفیل در سطح آب در بازه ۶۴ در طی دوره مدل‌سازی



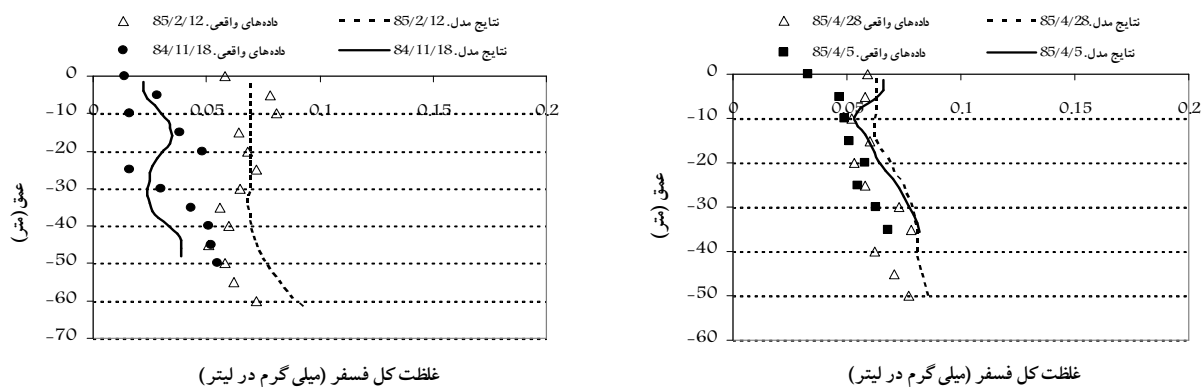
شکل ۷- نمودار شبیه‌سازی دما برای تأیید مدل



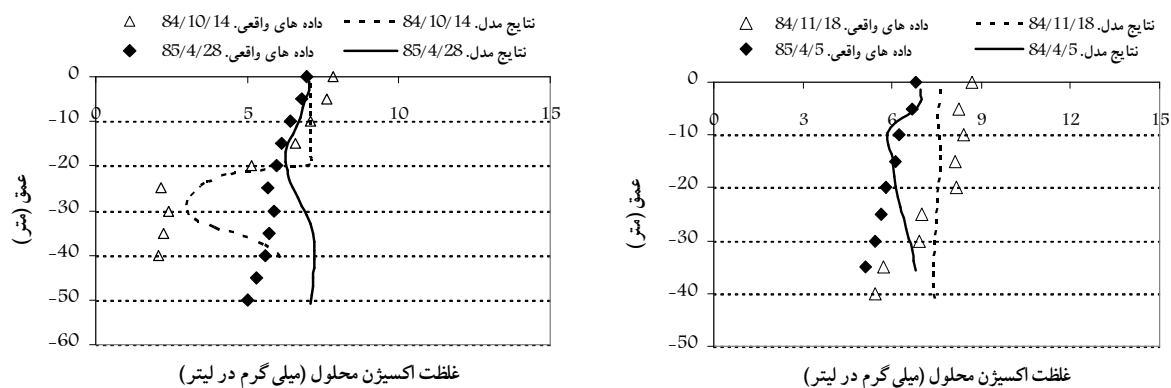
شکل ۸- نمودار شبیه‌سازی آمونیم برای تأیید مدل



شکل ۹- نمودار شبیه‌سازی نیترات برای تأیید مدل



شکل ۱۰- نمودار شبیه‌سازی فسفر کل برای تأیید مدل



شکل ۱۱- نمودار شبیه‌سازی اکسیژن محلول در مخزن کرخه در بازه ۶۴



کلی از رفتار سیستم، به آنالیز حساسیت رفتار مدل به برخی از پارامترها و ضرایب کالیبراسیون پرداخته شد.

#### ۵-۱- حساسیت به ضریب پوشش باد<sup>۱</sup>

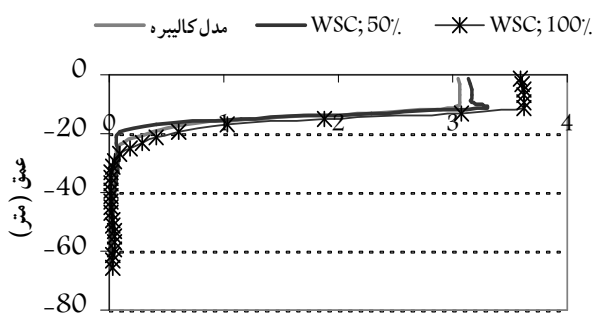
ضریب پوشش باد، شاخصی از شرایط جغرافیایی و توپوگرافی منطقه و مؤثر بر سرعت باد است. هر چه این ضریب عدد بزرگ‌تری باشد، تاثیر موانع در کاهش سرعت باد کمتر می‌شود. با فرض گسترده و انبوه شدن پوشش گیاهی در اطراف مخزن و افت تراز آب در مخزن و یا مغایرت سرعت باد در محل سد و با فرض از بین رفتن همه موانع در اطراف مخزن کرخه، ضریب پوشش باد به ترتیب به مقدار ۰/۵ تا ۱ تغییر داده شد تا تغییرات در دما و غلظت پارامترهای کیفی در مخزن مشاهده گردد. نتایج حاصل از این آنالیز حساسیت و تاثیر آن بر دما، اکسیژن محلول و کلروفیل آ در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ در بازه ۶۴ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Wind Sheltering Coefficient (WSC)

اگرچه نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی دارای انطباق مطلق نسبت به یکدیگر نمی‌باشند، اما روند نتایج مدل‌سازی در دوره‌های زمانی مختلف، تقریباً روندی منطقی را ارائه می‌نماید. عدم انطباق نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی می‌تواند ناشی از خطا در ساختار مدل شامل فرایندها و ارتباط ریاضی بین فرایندها و واکنش‌های سیستم خطای مدل‌سازی شامل انتخاب ضرایب و اکشن، وارد نمودن داده‌ها و یا ناشی از خطای اندازه‌گیری متغیرهای ورودی سیستم یعنی دبی، دما و غلظت و داده‌های پایش سیستم باشد [۱۴]. در هر صورت با توجه به انواع خطاهای ذکر شده نمی‌توان انتظار داشت که انطباق نتایج مدل با واقعیت همواره بسیار مطلوب باشد. یقیناً با تغییر ضرایب کالیبراسیون، چگونگی انطباق داده‌ها ممکن است به نفع داده‌های پراکنده‌تر تغییر یابد. لکن در این صورت ممکن است خطای سایر نقاط بیشتر شود.

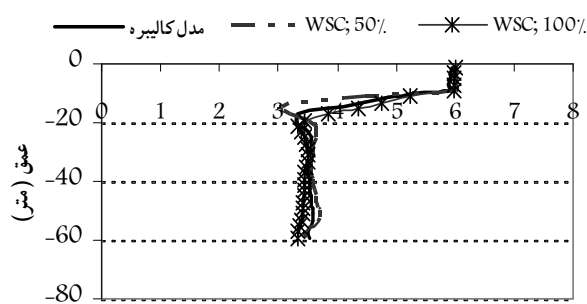
#### ۵- آنالیز حساسیت مدل

پس از کالیبراسیون و تأیید مدل و به عبارتی روشن نمودن تصویر



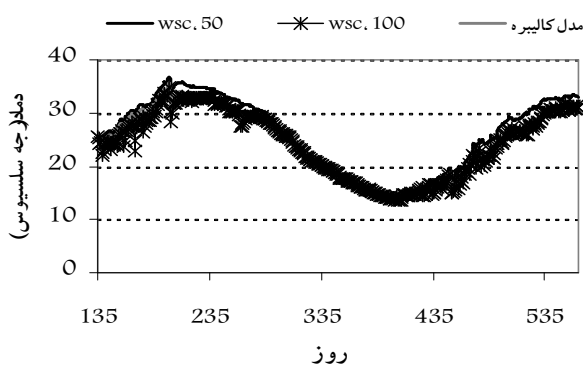
غلظت کلروفیل (میکروگرم در لیتر)

شکل ۱۳- پروفیل غلظت کلروفیل به (میکروگرم در لیتر) در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به پارامتر ضریب پوشش باد

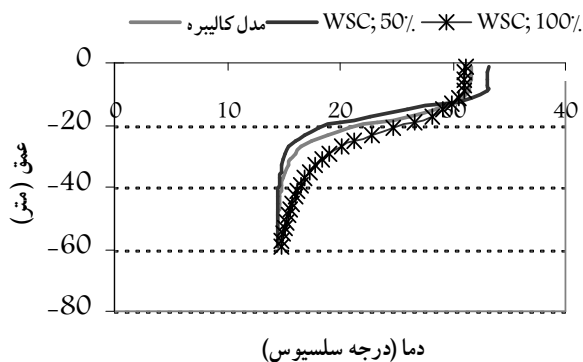


غلظت اکسیژن محلول (میلی گرم در لیتر)

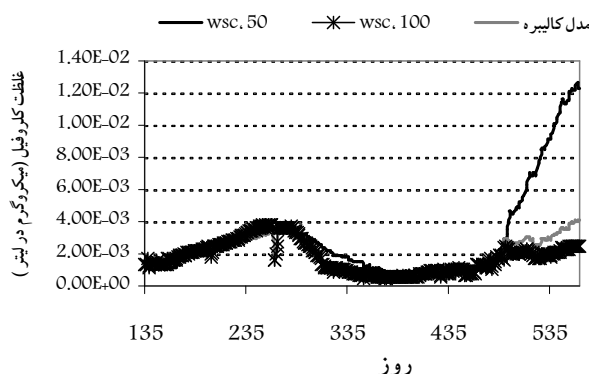
شکل ۱۲- پروفیل غلظت اکسیژن محلول در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به پارامتر ضریب پوشش باد



شکل ۱۵- دمای سطح آب در بازه ۶۴؛ آنالیز حساسیت به ضریب پوشش باد



شکل ۱۴- پروفیل دما در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به پارامتر ضریب پوشش باد

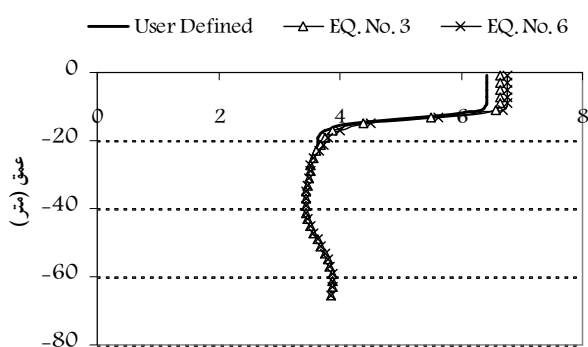


شکل ۱۶- غلظت کلروفیل آ (میکروگرم در لیتر) در سطح آب در بازه ۶۴: آنالیز حساسیت به ضریب پوشش باد

که در این روابط :

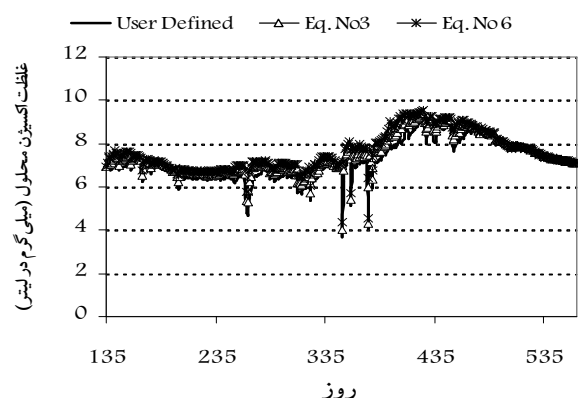
$K_L$  سرعت هواگیری است.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نقش فرمول هواگیری بر غلظت اکسیژن محلول در عمق و در سطح آب نشان داده شده است. بررسی نتایج گویای تاثیر ناچیز فرمول هواگیری بر دما و غلظت کلروفیل آ در قسمتهای مختلف مخزن می‌باشد.



غلظت اکسیژن محلول (میلی گرم در لیتر)

شکل ۱۷- پروفیل غلظت اکسیژن محلول در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به فرمول هواگیری



شکل ۱۸- غلظت اکسیژن در سطح آب در بازه ۶۴: آنالیز حساسیت به فرمول هواگیری

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب پوشش باد، نقش باد در رفتار پیکره آبی موثرتر می‌گردد، به گونه‌ای که با افزایش ضریب پوشش باد، دما در سطح کاهش می‌یابد و با کاهش آن، کاهش ضرایب واکنش و کاهش غلظت کلروفیل آ مشاهده می‌شود. با توجه به نقش ضریب پوشش باد در شکل‌گیری پروفیل دما و نقش مهم دما در فرایندهای موجود در سیستم، نقش و اهمیت این پارامتر در مدل‌سازی و کالیبراسیون مدل، به وضوح روشن می‌گردد. تأثیر این ضریب در ماههای گرم سال که رشد و نمو جلبک‌ها در آن صورت می‌گیرد، بر غلظت کلروفیل آ مشهود می‌گردد.

#### ۲-۵- آنالیز حساسیت به شدت هواگیری

ضرایب فرمول هواگیری که در کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفت توسط کاربر تعریف گردید. این رابطه به شرح زیر است

$$K_a = \frac{C_1 + C_2 W^{C_3}}{H} \quad (1)$$

که در آن:

$K_a$  ضریب هواگیری،  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  ضرایبی که توسط کاربر تعریف می‌شوند،  $W$  سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و  $H$  عمق است. در این تحقیق آنالیز حساسیتی بر روی روابط مورد استفاده برای ضریب هواگیری انجام شد. برای این کار روابط پیشنهاد شده توسط بنک<sup>۱</sup> و هرا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۷ و کل<sup>۳</sup> و بوچاک<sup>۴</sup> به ترتیب به شرح زیر استفاده شد [۱۳]. نتایج حاصل از این آنالیز حساسیت در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

$$K_a = \frac{K_L}{H} = \frac{0.728W^{0.5} - 0.317W + 0.372W^2}{H} \quad (2)$$

$$K_a = \frac{K_L}{H} = \frac{0.5 + 0.05W^2}{H} \quad (3)$$

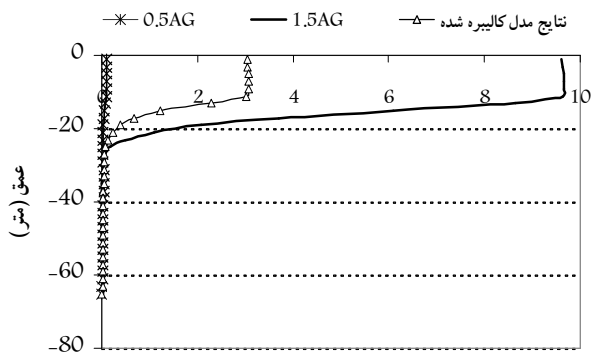
<sup>1</sup> Bank  
<sup>2</sup> Herrera  
<sup>3</sup> Cole  
<sup>4</sup> Buchak

در این کار ضریب رشد جلبک ۵۰ درصد افزایش یا کاهش یافت تا تغییر در غلظت کلروفیل، اکسیژن محلول، دما و مواد مغذی در سیستم مشاهده گردد. نتایج حاصل از این آنالیز حساسیت بر غلظت اکسیژن محلول و کلروفیل آ در شکلهای ۱۹ تا ۲۵ آمده است.

### ۳-۵- آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک

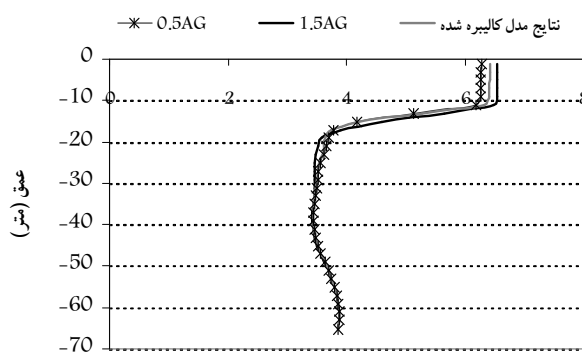
ضریب رشد جلبک<sup>۱</sup> پارامتری است که بر اساس آن، حد رشد جلبک در پیکره آبی معین می‌گردد و به این ترتیب غلظت اکسیژن محلول و مواد آلی در سیستم متأثر می‌گردند.

<sup>۱</sup> Algae Growth (AG)



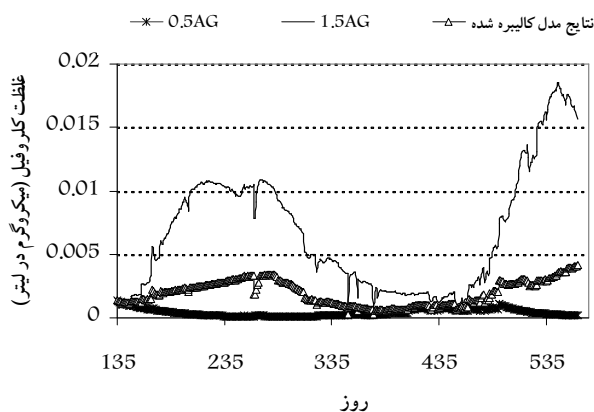
غلظت کلروفیل (میکروگرم در لیتر)

شکل ۲۰- پروفیل غلظت کلروفیل (میکروگرم در لیتر) در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به پارامتر ضریب رشد جلبک

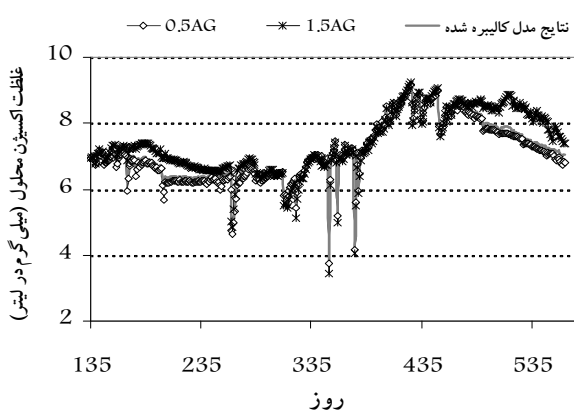


غلظت اکسیژن محلول (میلی گرم در لیتر)

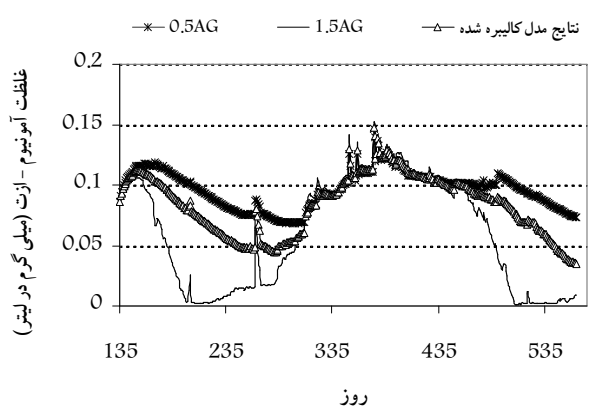
شکل ۱۹- پروفیل غلظت اکسیژن محلول در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به پارامتر ضریب رشد جلبک



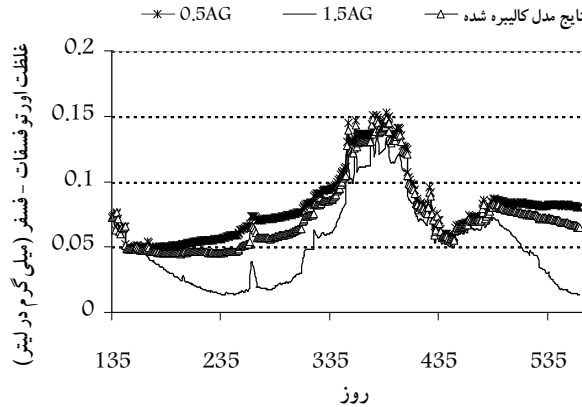
شکل ۲۲- غلظت کلروفیل آ در سطح آب در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک



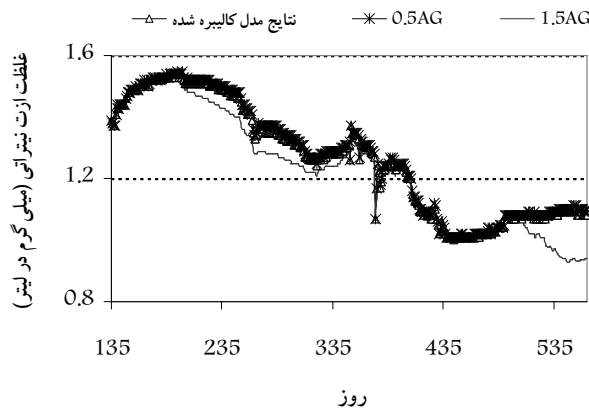
شکل ۲۱- غلظت اکسیژن محلول در سطح آب در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک



شکل ۲۴- غلظت آمونیوم-ازت در سطح آب در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک



شکل ۲۳- غلظت ارتوفسفات-فسفر در سطح آب در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک



شکل ۲۵- غلظت نیترات-ازت در سطح آب در بازه ۶۴، آنالیز حساسیت به ضریب رشد جلبک

فسفات، کلروفیل آ، اکسیژن محلول و ...، بسیار پیچیده و دشوار می باشد و انتخاب بسیاری از ضرایب، ظرافت و دقت لازم در نتایج مدل سازی را می طلبد. آنالیز حساسیت ارائه شده در این کار، نمایش اهمیت انتخاب برخی از پارامترهای بسیار مهم در شبیه سازی فرایند تغذیه گرای در مخزن کرخه بوده و پارامترهای دیگری نیز در شبیه سازی این فرایند، با اهمیت کمتری نسبت به پارامترهای مذکور، دارای نقش می باشند که به دلیل گسترده شدن کار، از ارائه نتایج آنها در این کار صرف نظر گردید.

#### ۶- سناریوی تغییر بار آلاینده های ورودی به سیستم

۶-۱- سناریوی کاهش یا افزایش بار آلاینده های ورودی به سیستم در این قسمت، سناریوی افزایش و کاهش بار آلاینده های ورودی به سیستم شامل  $\text{NH}_4\text{-N}$ ،  $\text{NO}_3\text{-N}$ ،  $\text{PO}_4\text{-P}$  به مقدار دوبرابر و نصف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل، نشان از عدم تغییر قابل توجه در غلظت کلروفیل در مخزن در نتیجه تغییر در بار ازت نیتراتی و آمونیاکی دارد، در حالی که نقش بار فسفر در میزان غلظت کلروفیل در مخزن بسیار قابل توجه است. نتایج حاصل از تغییر در هر یک از مقادیر بار ورودی در شکل ۲۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل، نقش فسفر به عنوان یک ماده مغذی موثر در شکل گیری فرایند تغذیه گرای در مخزن کرخه بسیار مهم و حائز اهمیت است.

#### ۶-۲- سناریوی کاهش یا افزایش مجموع بار آلاینده های ورودی به سیستم

در این قسمت نیز رفتار سیستم در سناریوی کل بار آلاینده های ورودی به سیستم شامل  $\text{NH}_4$ ،  $\text{NO}_3$ ،  $\text{PO}_4$  مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه رفتار سیستم بر غلظت کلروفیل آ در شکل ۲۷ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، سناریوی تغییر در کل بار آلاینده های ورودی به سیستم منجر به تغییر قابل توجهی در

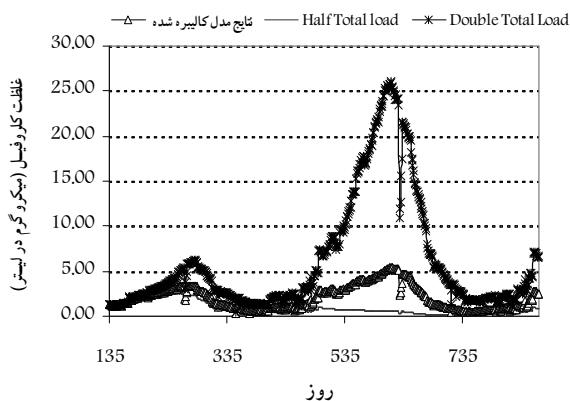
همانگونه که از نتایج بر می آید، ضریب رشد جلبک تأثیری بر دما نداشته ولی غلظت اکسیژن محلول، کلروفیل آ و مواد مغذی را در سیستم تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین انتخاب این ضریب در کالیبراسیون مدل بسیار مهم است. همانگونه که ملاحظه می گردد با افزایش ضریب رشد جلبک، غلظت کلروفیل افزایش و غلظت مواد مغذی در سیستم، (ازت آمونیاکی و نیتراتی و فسفر ارتوفسفات) کاهش می یابد.

#### ۵-۴- آنالیز حساسیت به ضریب نیمه اشباع فسفر

ضریب نیمه اشباع فسفر<sup>۱</sup> نیز یکی از پارامترهای موثر بر رشد جلبکها در مخازن و به تبع آن مصرف مواد مغذی در سیستم است. بررسی نتایج آنالیز حساسیت ضریب نیم اشباع فسفر بر غلظت پارامتر کیفی اکسیژن محلول، کلروفیل، ازت آمونیم و فسفر ارتوفسفات در قطعه ۶۴ در طی سری زمانی گویای اهمیت این پارامتر بر غلظت کلروفیل آ می باشد. به تبع تأثیر بر غلظت کلروفیل آ، غلظت مواد مغذی موجود در سیستم و اکسیژن محلول نیز متأثر از این پارامتر می گردند. با افزایش ضریب نیمه اشباع فسفر، رشد جلبک کاهش و در نتیجه غلظت کلروفیل آ در سیستم کاهش می یابد. کاهش غلظت کلروفیل آ که ناشی از کاهش رشد جلبکی در سیستم می باشد، منجر به افزایش مواد مغذی در سیستم می گردد. به عبارتی روشن تر، کاهش رشد جلبکی منجر به کاهش مصرف مواد مغذی در فصول رشد در سیستم گردیده و در نتیجه غلظت مواد مغذی افزایش می یابد. از طرف دیگر با کاهش ضریب نیمه اشباع فسفر، رشد جلبکی افزایش و در نتیجه غلظت مواد مغذی در سیستم کاهش می یابد.

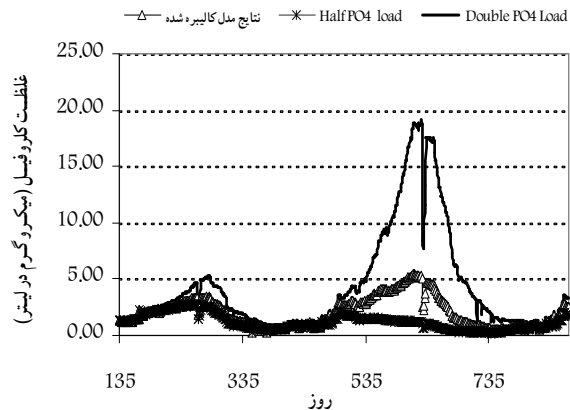
به طور کلی کالیبراسیون مدل کیفیت مخزن به دلیل ارتباط بسیار تنگاتنگ پارامترهای کیفیت نسبت به یکدیگر (آمونیم، نیترات،

<sup>1</sup> Algae Half Saturation Phosphorous (AHSP)



شکل ۲۷- غلظت کلروفیل (میکروگرم بر لیتر) حاصل از تغییر در کل بار آلاینده‌های ورودی به سیستم

شهریور ۸۴ (با افزایش دما) روند افزایشی داشته و پس از آن تا اوایل فروردین ۸۵ با کاهش دما روند کاهشی به خود گرفته و مجدداً با افزایش دما روند افزایشی به خود می‌گیرد. پارامترهای دمای آب ورودی و شرایط آب و هوایی (دمای هوا، سرعت و جهت وزش باد و ...) از پارامترهای بسیار موثر بر دمای آب مخزن می‌باشند. غلظت اکسیژن محلول نیز تحت تاثیر دمای آب مخزن و نیاز اکسیژن خواهی رسوبات کف و با شدت کمتری تحت تاثیر رشد جلبکی می‌باشند. در این پژوهش همچنین آنالیز حساسیتی بر روی برخی از پارامترهای مهم در کالیبراسیون مدل انجام گردید و نتایج آنالیز حساسیت پارامترهایی که نقش مهم‌تر و مشهودتری بر شبیه‌سازی کیفیت مخزن داشتند، ارائه گردید. نتایج حاصل، گویای اهمیت دقت در فرایند کالیبراسیون، پیچیدگی و به هم پیوستگی اجزای مدل‌سازی شده و اندرکنش فرایندهای موجود در سیستم می‌باشند. به عبارتی انتخاب درست و دقیق ضرایب کالیبراسیون نیز به شناخت واکنش‌های موجود در سیستم، اندرکنش پارامترهای موجود، داشتن اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی کافی و درست از پارامترهای کمی و کیفی موجود در حوضه آبریز و مخزن بستگی خواهد داشت. ارائه برخی داده‌های میدانی دارای روند غیر منطقی به نوعی تامل برانگیز بوده و می‌باید دقت‌های لازم در استفاده از داده‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های میدانی صورت پذیرد. عدم انطباق مطلق نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی می‌تواند ناشی از خطا در ساختار مدل شامل فرایندها و چگونگی ارتباط ریاضی بین فرایندها و واکنش‌های سیستم، خطای مدل‌سازی شامل انتخاب ضرایب واکنش و وارد نمودن داده‌ها و یا ناشی از خطای اندازه‌گیری متغیرهای ورودی سیستم (دبی، دما و غلظت) و داده‌های پایش سیستم باشد. در بررسی‌های به عمل آمده، بار آلی ناشی از فسفر در شکل‌گیری



شکل ۲۶- غلظت کلروفیل (میکروگرم بر لیتر) حاصل از تغییر در بار ورودی فسفر و مقایسه آن با نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل

غلظت کلروفیل آ در سیستم می‌گردد. افزایش غلظت کلروفیل آ، منجر به افزایش فتوسنتز و در نتیجه ایجاد تغییر در غلظت اکسیژن محلول، خصوصاً در سطح آب می‌گردد. بررسی‌های استوکیومتری رشد جلبک‌ها (پروتوپلاسم جلبک با فرمول شیمیایی  $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1$ ) نشان می‌دهد که نسبت وزنی بین کربن، نیتروژن و فسفر برابر ۱۰۷:۴۰ می‌باشد. مشاهده می‌شود که در قیاس با کربن و ازت لازم، میزان فسفر مورد نیاز، بسیار اندک است. اگر همان فسفر اندک وجود نداشته باشد، علی‌رغم فراوانی ازت و کربن، رشد جلبک متوقف خواهد شد که در این صورت فسفر عامل تحدیدکننده‌ای خواهد بود. نتایج نیز گویای اهمیت بار ورودی فسفر در کنترل رفتار سیستم و پدیده تغذیه‌گرایی است. با استفاده از این نتایج می‌توان فسفر را به‌عنوان عامل محدود کننده در شکوفایی و رشد جلبکی بر شمرده.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به منظور مدل‌سازی هیدرودینامیک، دما و پارامترهای کیفی در مخزن سد کرخه به کار گرفته شد. هیدرودینامیک سیستم (سطح آب)، دما و پارامترهای کیفی شامل ارتوفسفات، نترات، آمونیوم، اکسیژن محلول و کلروفیل آ با استفاده از داده‌های اردیبهشت تا آذر ۸۴ کالیبره شده و با استفاده از داده‌های دی ماه ۱۳۸۴ تا تیرماه ۱۳۸۵ صحت‌سنجی شده‌اند. تغییرات زمانی و مکانی دما و پارامترهای کیفی نتایج حاصل از مدل‌سازی، تطابق نسبتاً مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. نتایج حاصل از مدل‌سازی گویای رخداد پدیده واژگونی دما در مخزن سد کرخه در بهمن ماه می‌باشد. غلظت کلروفیل آ نیز در طی ماههای گرم روند افزایشی داشته و با کاهش دما، میزان رشد نیز، روند کاهشی به خود می‌گیرد؛ به طوری که از اردیبهشت تا اواخر

ارتباط بین مدل‌های شبیه‌سازی پیکره‌های آبی مثل CE-QUAL-W2 و مدل‌های شبیه‌سازی کاربری حوضه‌های آبریز برای مثال SWAT و ارزیابی تغییرات کیفی آب مخزن با تغییرات کاربری حوضه آبریز، کاهش یا افزایش شدت تصفیه فاضلابهای صنعتی و خانگی و کاهش یا افزایش مصرف کود و سموم شیمیایی می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری و مدیریتی، ابزاری موثر برای تصمیم‌گیران فراهم نماید [۱۵].

## ۸- تشکر و قدردانی

در پایان از تلاشهای شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران که با فراهم نمودن اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی به تکمیل اطلاعات مورد نیاز این مدل شبیه‌سازی کمک شایان توجهی نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

رشد و شکوفایی نقش کلیدی ایفا می‌نمایند. به عبارتی، فسفر به عنوان ماده مغذی کنترل‌کننده در این مهم می‌باشد. کنترل کاربری اراضی بالادست مخزن، اجرای برنامه‌های حداکثر مجموع باز روزانه<sup>۱</sup> و یا برنامه‌های تخصیص بار آلاینده‌های آلی می‌تواند گامی مهم و مثبت در کنترل رویداد تغذیه‌گرایی در مخازن باشد که دستیابی به این امر نیز در صورت داشتن اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی کافی امکان‌پذیر است.

با همه این اوصاف، مدیریت مواد مغذی در حوضه‌های آبریز در کاهش فرایند تغذیه‌گرایی بسیار مهم است. یکی از کمبودهای مدیریت مواد مغذی در حوضه‌های آبریز، فقدان ارتباط بین مدل‌های کاربری حوضه‌های آبریز و مدل‌های شبیه‌سازی رفتار پیکره‌های آبی است تا با استفاده از آنها بتوان به ارزیابی گزینه‌های مدیریت حوضه‌های آبریز بر کیفیت آب مخازن پرداخت. ایجاد

<sup>1</sup> Total Maximum Daily Load (TMDL)

## ۹- مراجع

- 1- Imberger, J. (1985). "The diurnal mixed layer." *Limnol Oceanogr.*, 30 (4), 737-770.
- 2- Hayes, D. F., Labadie, J. W., Sanders, T. G., and Brown, J. K. (1998). "Enhancing water quality in hydropower system operations." *J. of Water Res. Research.*, 34(3), 471-480.
- 3- Chung, S. W., and Oh, J. K. (2006). "Calibration of CE-QUAL-W2 for a monomictic reservoir in a monsoon climate area." *Water Sci. Technol.*, 54 (11-12), 29-37.
- 4- Slominski, S., Annear Jr, R. L., Berger, C. J., and Wells, S. A. (2002). *Upper spokane river model: Boundary conditions and model setup, 2001*, Technical Report, EWR-04-02, port lane state university, Portland.
- 5- Ray-Shyan, W., Wen-Cheng, L., and Wen-Hsiung, H. (2004). "Eutrophication modeling in shihmen reservoir; Taiwan." *J. Environmental Science and Health, Part A*, 39(6), 1455-1477.
- 6- Sullivan, A. B., and Round, S. A. (2005). *Modeling hydrodynamics, temperature, and water quality in Henry Hagg Lake, Oregon, 2000-03*, U.S. Geological Survey, Portland, Oregon.
- 7- McCutcheon, S. C. (2000). *Water quality modeling*, CRC Press, Amazon, Florida.
- 8- Jing, W., Shaw, L. Y., and Rui, Z. (2006). "A water quality based approach for watershed wide BMP strategies." *J. of American water Resources Association*, 45(5), 1193-1204.
- ۹- عیسی‌زاده، س.، تجریشی، م.، ابریشم‌چی، ا. و احمدی، م. (۱۳۸۴)، "کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی فسفر در مخزن سد لتیان." *م. علمی-پژوهشی آب و فاضلاب*، ۵۴، ۳-۱۶.
- ۱۰- غفوری، س.، معاضد، ه. و حسونی‌زاده، ه. (۱۳۸۷)، "بررسی اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سد مخزنی کرخه بر محیط‌زیست منطقه." *مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی برقایی، شرکت آب نیرو، تهران*.
- ۱۱- افشار، ع. (۱۳۸۵). *تغذیه‌گرایی مخازن سدها: مدل‌سازی و مدیریت، مطالعه موردی مخزن سد کرخه، گزارش طرح پژوهشی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران*.
- ۱۲- محمدی، ح. (۱۳۸۳)، "تغذیه‌گرایی مخازن-مدلسازی دویعدی (مطالعه موردی سد کرخه)." *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران*.
- 13- Cole, T. M., and Wells, S. A. (2002). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model*, Version 3.1, User Manual, Washington, DC.
- ۱۴- سعادت‌پور، م. (۱۳۸۴)، "بررسی عدم قطعیت در مدل‌های تخصیص بار آلاینده." *سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران*.
- 15- White, K. L., Chaubey, I., and Haggard, B. E. (2004). "Linking watershed and reservoir models." Paper number 042075, 2004 ASAE Annual Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers.