

## شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن سد مهاباد با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2

بایرامعلی محمدنژاد<sup>۱</sup>، نوید پرچمی<sup>۲</sup> و جواد بهمنش<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

پیشرفت‌های صنعتی و روی آوردن به کشاورزی مدرن ممکن است که به بعضی از مسائل جوامع بشری پاسخگو باشد؛ ولی عدم توجه به اصول بهره‌برداری، پسماندها، فاضلاب‌ها و رهاسازی آن‌ها به داخل منابع آب‌های شیرین می‌تواند نتایج جبران‌ناپذیری داشته باشد. امروزه، تغذیه‌گرایی یکی از مشکلاتی است که مخازن سدها به علت ورود آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی با آن روبرو می‌باشند. تغذیه‌گرایی فرایندی است که به سبب تجمع املاح در اعماق آب دریاچه‌ها باعث پایین آمدن کیفیت آب می‌شود. هدف این تحقیق، شبیه‌سازی دو بعدی تغذیه‌گرایی مخزن سد مهاباد با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 است. به منظور شبیه‌سازی دما و پارامترهای کیفی شامل  $PO_4$ ،  $NO_3$ ، فسفر کل و نیتروژن کل، برای دوره بهمن ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰ واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر اساس دما و پارامترهای کیفی شامل  $PO_4$ ،  $NO_3$ ، فسفر کل و نیتروژن کل، برای دوره بهمن ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰ در سه مقطع مخزن انجام گرفت. طبق تحلیل حساسیت مدل بر پایه دما و پارامترهای کیفی، نتایج نشان دادند که انطباق خوبی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. همچنین نتایج نشان دادند که تغذیه‌گرایی و شرایط خطرناک بر مخزن سد مهاباد حاکم بوده و فسفر تغذیه-گرایی را در مخزن محدود می‌کرد.

**واژگان کلیدی:** تغذیه‌گرایی، CE-QUAL-W2، سد مهاباد، کیفیت آب.

### ۱- مقدمه

می‌گردد تا به تدریج مواد آلی و رسوبات ته‌نشین شده در کف زیاد شده و در هنگام اختلاط مخزن موجب گسترش پدیده تغذیه‌گرایی در مخزن شود. علی‌کبا و همکاران [۳] با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و TDS مخزن سد کرخه طی سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۷۹ پرداختند. پس از کالیبره کردن مدل، عکس‌العمل مدل نسبت به کاهش TDS در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد. تحقیق ایشان نشان داد که با کاهش ۵۰٪ بار TDS در ورودی، غلظت TDS در خروجی به میزان ۴۰٪ کاهش می‌یافت. روزبهانی و ساعدی [۴]، با استفاده از نرم‌افزار HEC-5Q که قابلیت شبیه‌سازی عددی و یک بعدی کیفیت آب مخزن را دارا می‌باشد، به بررسی لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی در مخزن سد مخزنی در دست احداث پیغام چای کلیبر پرداختند، نتایج نشان دادند در یک دوره آب‌دهی خشکسالی (۱۳۷۸) لایه‌بندی حرارتی قوی-تری وجود دارد؛ در حالی که در یک دوره شبیه‌سازی با شاخص دوره آب‌دهی نرمال لایه‌بندی حرارتی کمتر مشاهده می‌شود. دانش و همکاران [۵]، با استفاده از مدل هیدرودینامیکی یک بعدی

مغذی شدن یا اتروفیکاسیون فرایندی است که به خاطر تجمع بیش از حد مواد غذایی در میان رسوبات و پیکره آب مخزن یا دریاچه اتفاق افتاده که سبب فعالیت میکروارگانیسم‌ها و به دنبال آن رشد بی‌رویه گیاهان آبی می‌شود. این پدیده در زمان‌های پیشین یک فرآیند کند بوده ولی در دهه‌های اخیر به خاطر شسته شدن کودهای شیمیایی، مواد پاک‌کننده و رهاسازی فاضلاب‌های صنعتی، روستایی، شهری و کشاورزی (کودها و سموم کشاورزی) به رودخانه‌ها، سبب افزایش پوشش گیاهی به علت افزایش عناصری نظیر ازت، کربن، سیلیسیم و فسفر شده که سلول‌ها جهت رشد به میزان نسبتاً بالایی از آن‌ها نیاز دارند [۱]. روستائی و همکاران [۲] به بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد لتیان توسط مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که مخزن سد لتیان دارای یک دوره لایه‌بندی هفت ماهه می‌باشد که در اواسط فروردین ماه شروع به شکل گرفتن کرده و حدوداً در اوایل آبان ماه از بین رفته و واژگونی یا اختلاط در مخزن رخ می‌دهد. این لایه‌بندی باعث

و فرایندهای بیوشیمیایی در سیستم آب‌های سطحی شامل، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مصب‌ها، مخازن، تالاب‌ها و نواحی ساحلی می‌باشد، ارائه داد.

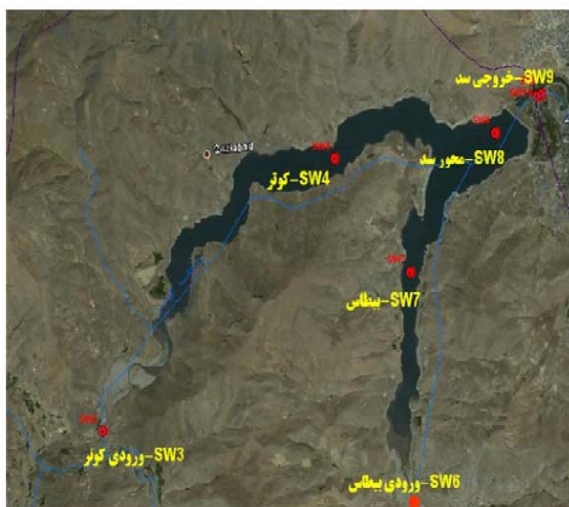
امروزه جایگاه سدها به لحاظ تأمین آب شرب مورد نیاز بر کسی پوشیده نیست. لذا توجه کافی به کیفیت آب استحصالی از سدها را می‌بایست در اولویت برنامه‌های مدیریتی گنجانده. به لحاظ اهمیت سد مهاباد در تأمین آب شرب این شهرستان، هدف از تحقیق حاضر مطالعه تغییرات پارامترهای کیفی آب در مخزن سد و ارائه مدلی مناسب برای شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی در آب مخزن این سد است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی در حوضه رودخانه مهاباد و در یک کیلومتری غرب شهر مهاباد قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این سد در طول شرقی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه و عرض شمالی، ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه جغرافیایی می‌باشد. حجم ذخیره سالانه این سد برای مصارف کشاورزی پائین دست شامل شبکه آبیاری مدرن مهاباد، نیروگاه برق‌آبی و آب شرب شهر مهاباد استفاده می‌گردد.

شکل (۱) موقعیت جغرافیایی سد مهاباد را نشان می‌دهد. این سد بر روی رودخانه مهاباد که از تلاقی دو شاخه به نام‌های کوتر و بیطاس تشکیل می‌شود، احداث گردیده است. همچنین در این شکل موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری داده‌های کیفی مخزن و رودخانه مشخص شده است.



شکل ۱- حوضه آبریز سد مهاباد

YRESM، لایه‌بندی کیفی آب سد طرق در استان خراسان رضوی را به لحاظ حرارتی و شوری در طی یک دوره دو ساله شبیه‌سازی و مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند که نتایج آن حاکی از لایه‌بندی شدید در فصل تابستان و تغییر پارامترهای کیفیت آب در این مدت می‌باشند. Diorgino و Bales [۶] کاربرد موفقیت را از مدل CE-QUAL-W2 بر روی دریاچه رادیس<sup>۱</sup> گزارش کرده‌اند. داده‌های پایش حکایت از مغذی بودن دریاچه داشتند. Gunduz و همکاران [۷] با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی رفتار کیفی آب در مخزن در دست احداث ایزیکلی جهت تأمین آب آشامیدنی آنکارا پرداختند. این مدل جهت تعیین افت بالقوه کیفیت آب در اثر بارهای آلودگی مختلف استفاده و نتایج شبیه‌سازی با استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی مورد مقایسه قرار گرفت تا جهت تعیین راهبردهای مدیریتی کنترل کیفیت آب مخزن و حوضه آبریز اقدام گردد. Deliman و Gerald [۸] مدل CE-QUAL-W2 را برای شبیه‌سازی حرارت، اکسیژن محلول و کل جامدات معلق در مخزن سد کونگووینگو<sup>۲</sup> در ایالات متحده به کار بردند. آن‌ها پس از کالیبراسیون هیدرودینامیکی و حرارت برای مخزن، مدل را برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در یک دوره ۸ ساله (از اول ژانویه ۱۹۸۴ تا ۳۱ دسامبر ۱۹۹۱) به کار بردند. Wu و همکاران [۹] برای شبیه‌سازی حرارت و پارامترهای کیفی در مخزن سد شیمن<sup>۳</sup> در تایوان، مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 را برای شبیه‌سازی غلظت کلروفیل نوع a تحت سناریوهای مختلف اختصاص بار آلاینده به کار بردند. Kim و Kim [۱۰] با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی حرارت و جریان‌های گل آلود در شرایط آب و هوایی منسون در سد مخزنی سویانگ<sup>۴</sup> در کره پرداختند. کالیبراسیون مدل با استفاده از داده‌های موجود بین جولای تا سپتامبر ۱۹۹۶ انجام شد. Choi و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی تأثیر افزایش حجم مخزن بر هیدرودینامیک و پارامترهای کیفی پرداختند. پس از کالیبراسیون و صحت سنجی مدل اثر افزایش حجم مخزن را بر لایه‌بندی توسط مدل مورد پیش‌بینی قرار دادند. نتایج نشان داد که پس از بازسازی سد لایه‌بندی حرارتی شدیدتر شده و دوره آن نیز افزایش می‌یابد. Hamrick [۱۲] مدل EFDC را که یک مدل هیدرودینامیکی برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی، انتقال،

- 1- Rhodiss
- 2- Congowingo dam
- 3- Shihmen dam
- 4- Soyang

جدول ۱- مشخصات عمومی سد مهاباد

نوع سد	سنگریزه‌ای با هسته رسی
حداکثر ارتفاع	۴۷/۵ متر
رقوم تاج	۱۳۶۱/۵ متر بالاتر از سطح دریا
مساحت دریاچه	۱۱ کیلومتر مربع
رقوم نرمال سطح آب	۱۳۵۸/۵ متر بالاتر از سطح دریا
رقوم آبگیری شرب و کشاورزی	۱۲۳۰ متر بالاتر از سطح دریا

شاخه هستند و بالاخره پیکره آبی از یک یا چند شاخه تشکیل می‌شود. سد مهاباد در طول به ۳۵ بخش و در عمق به ۲۵ لایه با عمق‌های یکسان ۲ متر تقسیم‌بندی شد. طبق پیش‌فرض نرم-افزار دو بخش ابتدایی و انتهایی به همراه لایه ابتدایی و انتهایی هر بخش جزء بخش‌ها و لایه‌های مجازی محسوب می‌شوند و عرض آن‌ها در نرم‌افزار صفر معرفی می‌شود. داده‌های هواشناسی ورودی به مدل متشکل از آمار متوسط روزانه درجه حرارت هوا، نقطه شبنم، سرعت و جهت باد و میزان پوشش ابر منطقه در روزهای مختلف می‌باشد. داده‌های مذکور از سازمان هواشناسی برای دوره آماری ۱۳۸۹-۱۳۹۰ اخذ گردیده و به صورت سه ساعته به مدل معرفی شد.

#### ۲-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی بالادست به وسیله دبی روزانه ورودی به مخزن و دمای آب ورودی، غلظت کل جامدات محلول در آب ورودی، غلظت فسفات، نیترات و آمونیاک در آب ورودی و شرایط مرزی پایین دست نیز به وسیله دبی روزانه خروجی از مخزن به مدل معرفی گردید.

#### ۲-۵- داده‌های جنبی

ضریب پوشش گیاهی منطقه در قالب (shd.npt) Shading برای مدل معین شده است. این ضریب به منظور تعریف اثر سایه‌اندازی پوشش گیاهی که در اطراف بدنه آبی باعث کاهش تأثیر نور خورشید در مخزن می‌شود در نظر گرفته می‌شود. مقدار عددی این ضریب بین صفر تا ۱ می‌باشد. عدد ۱ بیانگر عدم وجود آن دسته از پوشش گیاهی است که باعث سایه‌اندازی روی بدنه آبی شود. هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر می‌شود، اثر پوشش گیاهی محسوس‌تر می‌گردد. ضریب اصلاح سرعت باد برای مقاطع مختلف طولی در قالب "Wind sheltering" تعریف می‌شود، از آنجایی که در اطراف مخزن سد مهاباد پوشش درختی آن طوری که باعث کاهش ورود اشعه خورشیدی به مخزن سد شود وجود ندارد بنابراین این ضریب برابر ۱ در نظر گرفته شده است. ضریب اصلاح سرعت باد برای مناطق مختلف طولی در قالب فایل Wind sheltering (wsc.npt) برای مدل مشخص شده است. مقدار عددی این مقدار بین ۰/۵ تا ۰/۹۰ می‌باشد. هر چه این مقدار کمتر در نظر گرفته شود، نشان از تأثیر کم باد در منطقه بر روی تشکیل لایه‌بندی حرارتی در مخزن می‌باشد. برای اولین اجرا، مقدار اولیه برای مقاطع مختلف زمانی ۰/۹ فرض شده است و سپس با توجه به اطلاعات در دسترس از ایستگاه

#### ۲-۲- کاربرد مدل شبیه‌ساز

به منظور بررسی تغذیه‌گرایی مخزن سد مهاباد از مدل CE-QUAL-W2 استفاده گردید. مدل مورد بحث یک مدل دو بعدی (طول و عمق) هیدرودینامیکی و کیفی آب می‌باشد. این مدل می‌تواند بر روی رودخانه‌ها، خورها، دریاچه‌ها، مخازن و همچنین حوضه‌های آبریز رودخانه‌ها اعمال گردد.

CE-QUAL-W2 به مدل‌سازی فرآیندهای اصلی تغذیه-گرایی مانند دما، نیترات، جلبک، اکسیژن محلول، مواد آلی و رسوبات می‌پردازد. محاسبات هیدرودینامیکی شامل پیش‌بینی تراز سطح آب، سرعت و دما می‌باشد. مدل مذکور به دلیل فرض همگن بودن جانی، برای پیکره‌های آبی طویل و باریک مناسب است. توسعه و تکامل این مدل از سه دهه پیش آغاز شده و برای مخازن، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و خورها در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل را می‌توان به ۶ دسته تقسیم کرد: داده‌های هندسی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولیکی، پارامترهای جنبشی و داده‌های کالیبراسیون.

#### ۲-۳- داده‌های هندسه مخزن

اولین داده ورودی به مدل، اطلاعات هندسی مخزن می‌باشد. برای این منظور هندسه مخزن سد مهاباد بر اساس نقشه توپوگرافی آن به مدل معرفی شد. در این شبیه‌سازی، مخزن سد مهاباد به صورت یک پیکره آبی با دو انشعاب (شاخه کوچکتر به عنوان بدنه آبی اصلی به طول ۸/۵ کیلومتر و شاخه بیطاس به عنوان شاخه فرعی به طول ۳/۵ کیلومتر) مدل گردید. شبکه محاسباتی در مدل CE-QUAL-W2 از سلول<sup>۱</sup>، بخش<sup>۲</sup>، شاخه<sup>۳</sup> و پیکره آبی<sup>۴</sup> تشکیل می‌شود. یک سلول، یک لایه عمودی در درون یک بخش می‌باشد. یک یا چند بخش تشکیل دهنده یک

- 1- Cell
- 2- Segment
- 3- Branch
- 4- Waterbody

نیترژن کل، نیترات و فسفات، مدل نسبت به یک دوره ۴ ماهه از بهمن ۸۹ تا اردیبهشت ۹۰ واسنجی شد و صحت‌سنجی آن طی دوره ۴ ماهه دوم (خرداد ۹۰ تا شهریور ۹۰) انجام گرفت. از آنجایی که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در وقوع فرایندهای هیدرودینامیکی و واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی مخازن، دما می‌باشد، لذا به منظور تطبیق کامل نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی، تحلیل حساسیت مدل نسبت به دما صورت گرفت که از بین آن‌ها مدل به ضرایب عنوان شده در جدول (۲) نسبت به دیگر ضرایب حساسیت زیادی نشان می‌داد که با تغییر مقادیر این ضرایب مقدار بهینه آن‌ها تعیین گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آنالیز حساسیت مدل

جدول (۲) مقادیر نهایی ضرایب مؤثر را در سد مهاباد نشان می‌دهد که با تعریف آن‌ها به مدل تطابق قابل قبول بین داده‌های مشاهداتی و نتایج شبیه‌سازی حاصل گردید.

جدول ۲- ارزش نهایی ضرایب مؤثر

عنوان ضریب	ارزش ضریب
پوشش باد (WSC) <sup>۳</sup>	۰/۵
تابش جذبی (BETA)	۰/۴۵
عمق نفوذ نور (EXH2O) <sup>۴</sup>	۰/۳
دمای رسوب (TSED) <sup>۵</sup>	۱۰

#### ۳-۲- واسنجی مدل

واسنجی مدل شامل واسنجی هندسه مخزن، تراز سطح آب، دما و غلظت پارامترهای کیفی شامل فسفات، نیترژن کل و فسفر کل می‌باشد.

#### ۳-۲-۱- دما

نتایج مربوط به واسنجی دما در شکل (۳) و میانگین خطای محاسبه شده در جدول (۳) به خوبی نشان دهنده انطباق قابل قبول بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشند.

سینوپتیک مهاباد که نشان می‌دهد نزدیک به ۷۰٪ از بادهای به وقوع پیوسته در محدوده بادهای آرام می‌باشد، منطقی به نظر می‌رسد که کمترین مقدار برای این پارامتر در نظر گرفته شود لذا مقادیر نهایی آن ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۶- معیارهای ارزیابی

##### ۲-۶-۱- خطای میانگین مطلق (AME)<sup>۱</sup>

این پارامتر طبق توصیه راهنمای مدل یکی از بهترین معیارهای خطا برای ارائه در گزارشات می‌باشد. در واقع این پارامتر مقدار متوسط خطاها را در مجموعه پیش‌بینی‌ها بدون در نظر گرفتن جهت آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند و به صورت رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$AME = \sum (|Pre-Obs - I|) / \text{Number of obs} \quad (1)$$

##### ۲-۶-۲- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۲</sup>

یکی دیگر از پارامترهای آماری که در گزارش‌ها زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه (۲)) می‌باشد که برای بیان تفاوت مابین مقادیر پیش‌بینی شده و شبیه‌سازی شده در مدل به کار می‌رود و معیار مناسبی برای درک کارایی مدل است.

$$RMSE = \left( \sum_{i=1}^N (X_{i,obs} - X_{i,pre})^2 \right)^{0.5} \quad (2)$$

که در آن،  $X_{i,obs}$  داده مشاهده شده و  $X_{i,pre}$  داده شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار کمتر  $RMSE$  حاکی از دقت بالاتر مدل می‌باشد. به منظور ارزیابی بهتر نتایج حاصله از معیار بی‌بعد Research Assessment Exercise (رابطه (۳)) نیز استفاده شده است:

$$RAE = \sum (|Pre-Obs - I|) / \sum obs \quad (3)$$

که در آن،  $Obs$  داده مشاهده شده و  $pre$  داده شبیه‌سازی شده می‌باشد.

با انجام تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای تأثیرگذار بر دما و پارامترهای تغذیه‌گرایی شامل فسفر کل،

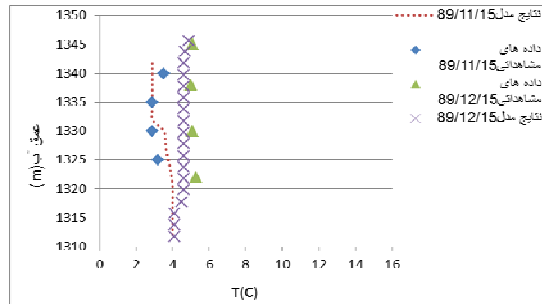
3- Wind sheltering coefficient

4- Extinction for pure water

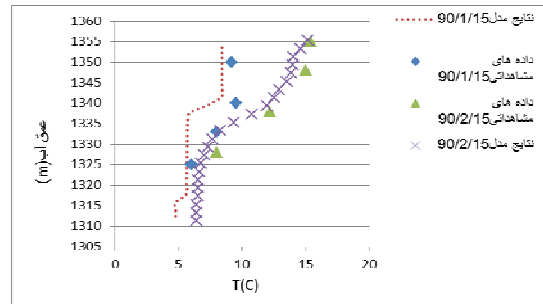
5- Sediment temperature

1- Absolute mean error

2- Root mean squared error



(ب)



(الف)

شکل ۳- واسنجی پروفیل حرارتی در بازه ۲۱: الف) تغییرات پروفیل حرارتی در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰)،  
ب) تغییرات پروفیل حرارتی در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)

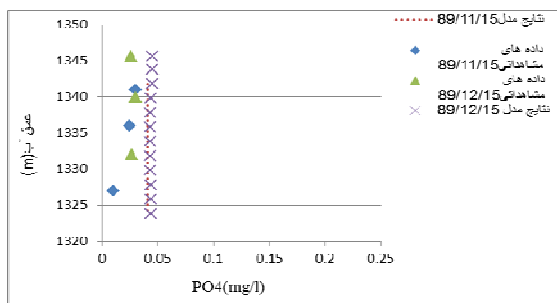
جدول ۳- نتایج خطای واسنجی مدل در شبیه‌سازی دما در بازه ۲۱

بازه ۲۱	بهمن ۸۹	اسفند ۸۹	فروردین ۹۰	اردیبهشت ۹۰
AME (C)	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۹
RMSE (C)	۰/۷۳	۰/۰۹	۰/۹۲	۱/۸۷

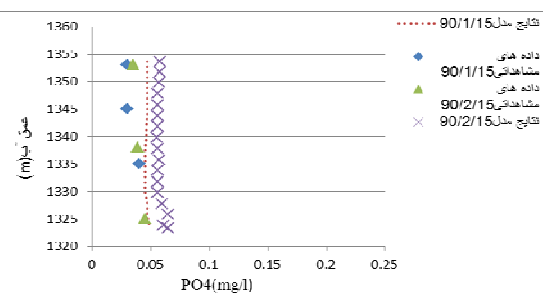
### ۳-۲-۲- فسفات

فسفات یکی از پارامترهای کیفی تأثیرگذار در میزان تغذیه-گرایی مخازن به حساب می‌آید. شکل‌های (۴) و (۵) واسنجی این پارامتر را در دو بازه (۱۲) و (۱۷) نشان می‌دهند و جدول (۴) خطای شبیه‌سازی فسفات را نشان می‌دهد.

شکل (۳- الف) نشان می‌دهد که مخزن با گذر از فصول سرد زمستان به تدریج دچار لایه‌بندی حرارتی می‌شود. در صورتی که طبق شکل (۳- ب) در طول زمستان با اختلاط کامل روبروست و به تدریج با ورود به فصول گرم لایه‌بندی تشکیل می‌گردد.

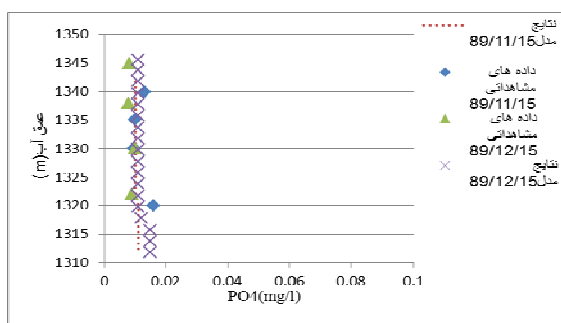


(ب)

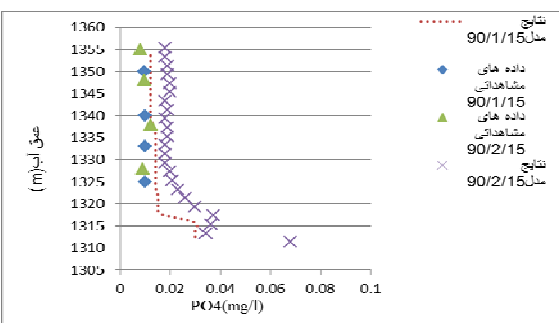


(الف)

شکل ۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی غلظت PO4 با داده‌های مشاهداتی در بازه ۱۷ (شاخه کوتر): الف) پروفیل تغییرات غلظت فسفات در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰)، ب) پروفیل تغییرات غلظت فسفات در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)



(ب)



(الف)

شکل ۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی غلظت PO4 با داده‌های مشاهداتی در بازه ۲۱ (محور سد): الف) پروفیل تغییرات غلظت فسفات در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰) ب) پروفیل تغییرات غلظت فسفات در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)

جدول ۴- نتایج خطای واسنجی مدل در شبه‌سازی فسفات

RAE	AME	RMSE	بازه
۰/۲۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۲۱
۰/۳۶	۰/۰۱۷	۰/۰۰۳	۱۷
۰/۴	۰/۰۳۱	۰/۰۲۴	۳۴

بر اساس نمونه‌برداری‌های صورت گرفته از شاخه‌های کوتاه و بیطاس و محور اصلی سد و واسنجی مدل بر اساس آن‌ها می‌توان بهینه بودن ضرایب مؤثر تعریف شده برای مدل در مورد شبه‌سازی این پارامتر کیفی را نیز به خوبی مشاهده کرد. البته به نظر می‌رسد که بین داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل در اردیبهشت ماه در مقطع ۱۷ از شاخه کوتاه با میانگین خطای مطلق ۱/۸۶ بیشترین اختلاف مشاهده می‌گردد که علت آن نیز وقوع سیلاب می‌باشد که غلظت بالایی از نیتروژن را از زیر حوضه بالادست وارد مخزن کرده است. نتایج حاصل از نمونه‌برداری میدانی و شبه‌سازی مدل نشان می‌دهند که غلظت نیتروژن کل در تمامی ماه‌ها از ۱/۹ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کرده و باعث شده مخزن مغذی محسوب گردد.

### ۳-۲-۴- فسفر کل

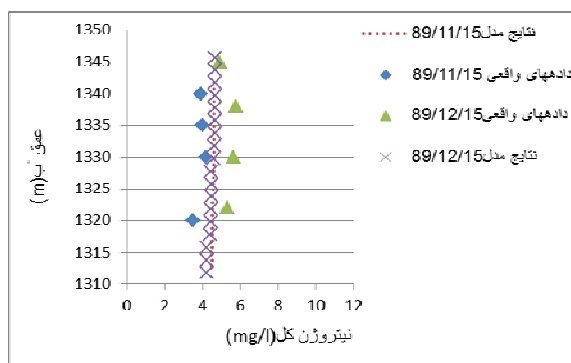
مطابق با مراحل انجام گرفته برای پارامترهای قبلی، مدل برای شبه‌سازی فسفر کل نیز مورد واسنجی قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های (۷) و (۸) و جدول (۶) آورده شده‌اند: داده‌های جمع‌آوری شده از مخزن و داده‌های شبه‌سازی شده از همپوشانی خوبی برخوردار بوده که نتایج مندرج در جدول (۶) نیز حاکی از این واقعیت می‌باشند.

شکل‌ها و جدول مربوط به واسنجی غلظت فسفات نیز نشان دهنده شبه‌سازی موفق این پارامتر کیفی توسط مدل برای مخزن سد مهاباد می‌باشند. حد مجاز فسفات در منابع آب شیرین برای فسفات ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر اعلام شده است. طبق نمودارهای ارائه شده، عموماً غلظت این پارامتر کیفی کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. در شرایط لایه‌بندی مخزن به خصوص در بازه ۲۱ که به علت عمق زیاد آب شرایط لایه‌بندی نیز در آن شدید می‌باشد، با افزایش عمق میزان غلظت فسفات نیز افزایش می‌یابد.

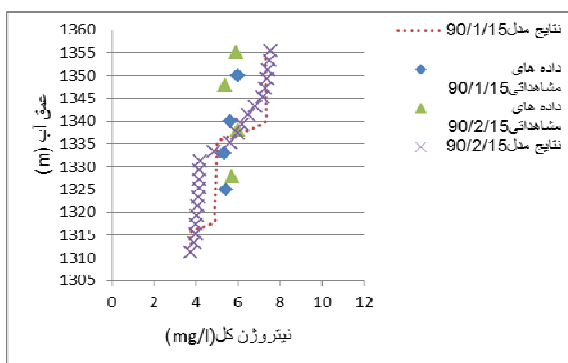
### ۳-۲-۳- نیتروژن کل

نیتروژن کل در صورتی به عنوان شاخص تغذیه‌گرایی و عامل محدود کننده در آب‌های سطحی و مخارن محسوب می‌شوند که نسبت نیتروژن کل بر فسفر کل کمتر از ۱۰ باشد. در غیر این صورت، فسفر به عنوان ماده مغذی محدود کننده تغذیه‌گرایی شناخته می‌شود (EPA, 2000).

با این حال نوسانات غلظت این پارامتر نیز در مخزن سد مهاباد مورد بررسی و شبه‌سازی قرار گرفت که واسنجی آن طی دوره ۴ ماهه (از بهمن ۸۹ تا اردیبهشت ۹۰) به صورت زیر ارائه گردید.



(ب)

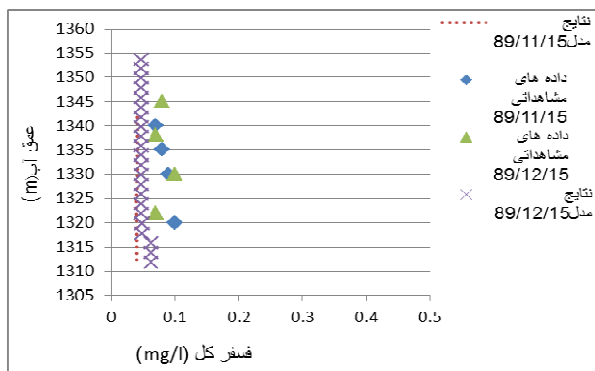


(الف)

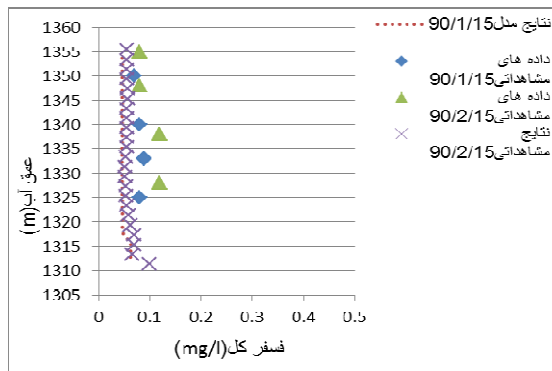
شکل ۶- مقایسه نتایج مدل سازی نیتروژن کل با داده‌های مشاهداتی در بازه ۱۷ (شاخه کوتاه): (الف) پروفیل تغییرات غلظت نیتروژن کل در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰)، (ب) پروفیل تغییرات غلظت نیتروژن کل در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)

جدول ۵- نتایج خطای واسنجی مدل در شبه‌سازی نیتروژن کل

بازه	RMSE	AME	RAE
۲۱	۱/۷۸	۰/۸۹	۰/۱۵
۱۷	۱/۳۱	۱/۸۶	۰/۰۵۴
۳۴	۱/۲۹	۱/۷۷	۰/۱۲

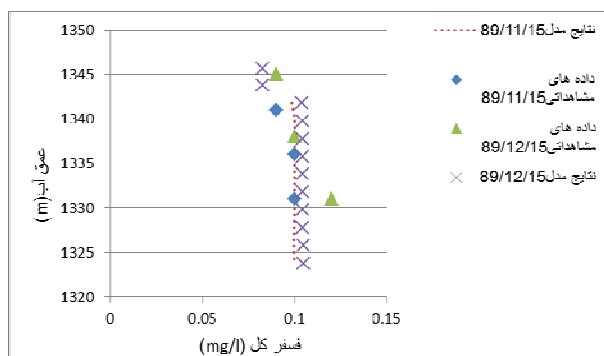


(ب)

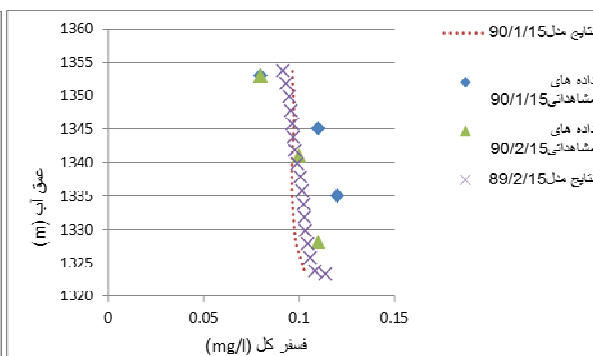


(الف)

شکل ۷- مقایسه نتایج مدل‌سازی فسفر کل با داده‌های مشاهده‌ای در بازه ۲۱ (محور سد): الف) پروفیل تغییرات غلظت فسفر کل در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰)، ب) پروفیل تغییرات غلظت فسفر کل در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)



(ب)



(الف)

شکل ۸- مقایسه نتایج مدل‌سازی فسفر کل با داده‌های مشاهده‌ای در بازه ۳۴ (شاخه بیطاس): الف) پروفیل تغییرات غلظت فسفر کل در عمق (فروردین و اردیبهشت ۹۰)، ب) پروفیل تغییرات غلظت فسفر کل در عمق (بهمن و اسفند ۸۹)

جدول ۶- نتایج خطای واسنجی مدل در شبه‌سازی فسفر کل

بازه	RMSE	AME	RAE
۲۱	۰/۰۵۸	۰/۰۲۱	۰/۸۶
۱۷	۰/۰۲۴	۰/۰۱۴	۰/۴۴
۳۴	۰/۰۲۲	۰/۰۱۶	۰/۰۴۶

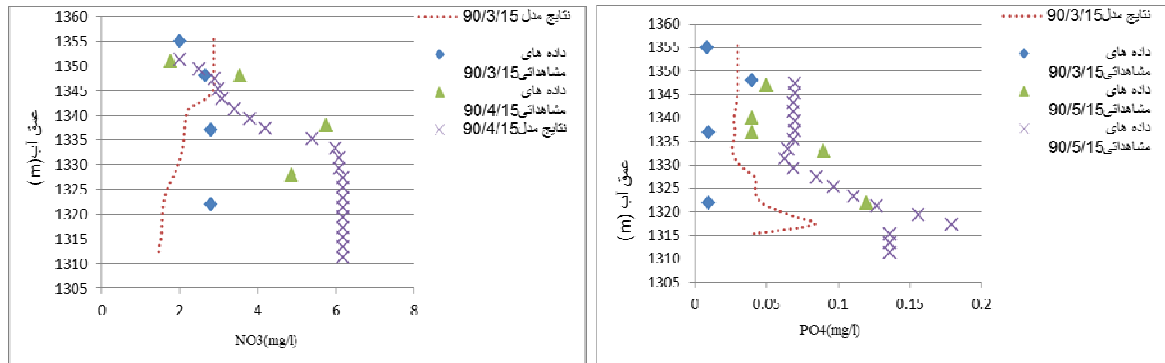
مقدار مجاز تغذیه‌گرایی برای مخزن در طول سال شبه‌سازی می‌کند. لذا فسفر کل مخزن سد مهاباد را در شرایط تغذیه‌گرایی شدید قرار می‌دهد.

در این واسنجی تعادل استوکیومتری بین توده حیاتی و فسفر در ۰/۰۰۵ تنظیم گردید. حد مجاز غلظت فسفر کل در مخزن ۰/۰۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. در صورتی که در مخزن سد مهاباد مطابق با داده‌های تجربی، مدل نیز غلظتی بیش از

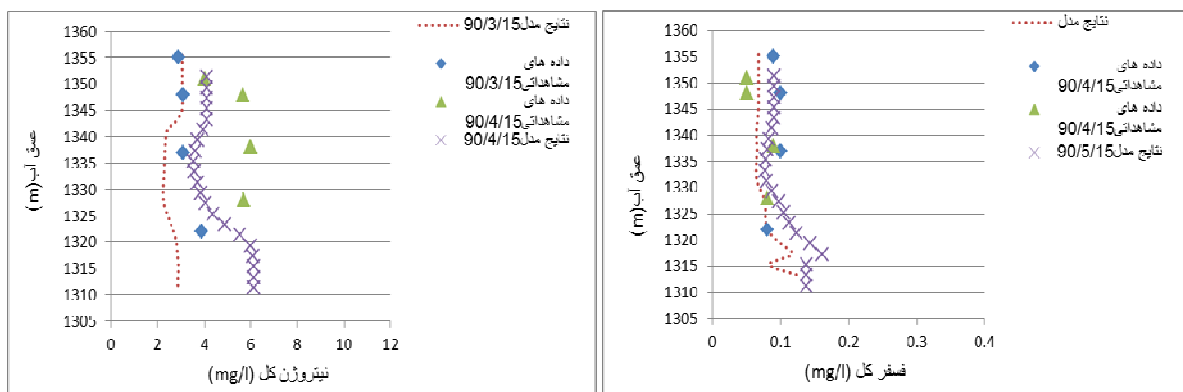
## ۳-۳- صحت‌سنجی مدل

گردید که نتایج مربوط به ماه‌های خرداد و تیر برای دما، نیترات، فسفات، نیتروژن کل و فسفر کل در مقطع ۲۱ از مخزن به صورت شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند.

با انجام واسنجی مدل و تعیین مقادیر مناسب برای ضرایب مؤثر بر نوسانات دمایی و غلظت پارامترهای کیفی مخزن سد مهاباد، مدل برای ماه‌های خرداد ۹۰ تا شهریور ۹۰ صحت‌سنجی



شکل ۹- تأیید مدل در شبه‌سازی غلظت  $NO_3$  و  $PO_4$  در مقطع ۲۱ (محور سد)



شکل ۱۰- تأیید مدل در شبه‌سازی غلظت نیتروژن کل و فسفر کل در مقطع ۲۱ (محور سد)

برای شرب حدود  $0/2$  میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. بنابر این غلظت نیترات و فسفات در مخزن مشکلی از نظر تغذیه‌گرایی ایجاد نمی‌کنند. غلظت فسفر در صورتی باعث تغذیه‌گرایی مخزن می‌شود که از  $0/2$  میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کند. مان طور که از نمودارها پیداست، غلظت این پارامتر در طول سال بیشتر از  $0/5$  میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. غلظت فسفر با افزایش عمق، روند افزایشی به خود می‌گیرد که علت آن می‌تواند رهاسازی فسفر از رسوبات منتقل شده توسط جریان‌ات سیلابی در فصول پر آب باشد. بنابر این مخزن از این نظر در یک شرایط کاملاً مغذی قرار دارد. همچنین نتایج حاصل از نمونه‌برداری میدانی و شبه‌سازی مدل نشان می‌دهند که غلظت نیتروژن کل در تمامی

## ۳-۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار گرفت. واسنجی مدل بر اساس داده‌های میدانی از سد برای سه مقطع ۱۷، ۲۱ و ۳۴ صورت گرفت. برای این منظور از داده‌های بهمن ۸۹ تا اردیبهشت ۹۰ برای دما و پارامترهای تغذیه‌گرایی مخزن شامل فسفات، فسفر کل و نیتروژن کل استفاده گردید. صحت‌سنجی آن نیز به ازای پارامترها و مقاطع مذکور با داده‌های میدانی خرداد ۹۰ تا شهریور ۹۰ صورت گرفت که نهایتاً تطابق مناسبی بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج مدل حاصل گردید. پروفیل دمایی مخزن نشان از رخداد پدیده لایه‌بندی حرارتی تابستانه در مخزن دارد. غلظت فسفات در مخزن از  $0/1$  میلی‌گرم بر لیتر تجاوز نمی‌کند. این درحالی است حد بیشینه مجاز آن



- [8] Deliman, P. N., Gerald, J. A., "Application of Two-Dimensional Hydrothermal and Water Quality Model, CE-QUAL-W2, to the Chesapeake bay-Congowingo Reservoir", Lake and Reservoir Management, 2002, 18 (1), 10-19.
- [9] Wu, R. S., Liu, W. C., Hsieh, W. H., "Eutrophication Modeling in Shihmen Reservoir, Taiwan", Journal of Environmental Science and Health, Part A, Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering, 2004, 39 (6), 1455-1477.
- [10] Kim, Y., Kim, B., "Application of a 2-Dimensional Water Quality Model (CEQUAL- W2) to the Turbidity Interflow in a Deep Reservoir (Lake Soyang, Korea)", Lake and Reservoir Management, 2006, 22 (3), 213-222.
- [11] Choi, J. H., Jeong, S. A., Park, S. S., "Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Turbidity Simulations for Prediction of Dam Reconstruction Effects in Asian Monsoon Area", Journal of the American Water Resource Association, 2007, 43 (6), 1444-1454.
- [12] Hamrick, J. M., "A three-dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects", Special Report 317, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992.
- [۱۳] نظری‌ها، م.، دانایی، ع.، هاشمی، س. ح.، ایزد دوستدار، ا. ح.، "پیش‌بینی لایه‌بندی حرارتی سد در دست احداث بختیاری با استفاده از مدل CE-QUAL-W2"، مجله محیط‌شناسی، ۱۳۸۹، ۵۴، ۱۱-۱۸.
- ماه‌ها از ۱/۹ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کرده و باعث شده مخزن مغذی محسوب گردد.
- ۴- مراجع**
- [۱] کرمانی، م.، نصری، س.، "اثرات احداث سد بر کیفیت آب"، مجله آب و محیط زیست، ۱۳۸۱، ۵۱، ۶-۱۱.
- [۲] روستائی، ج.، فاضلی، م.، هاشمی، س. ح.، عطاری، ج.، یمینی، و. ا.، "بررسی روش‌های جلوگیری از لایه‌بندی حرارتی در دریاچه سد لتیان (مطالعات مرحله امکان‌سنجی)"، پروژه پژوهشی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران، ۱۳۸۹.
- [۳] علی‌کیا، ه.، افشار، ع.، شهیدی، ا. ا.، "مدل‌سازی سیستم رودخانه و مخزن سد کرخه"، اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، تهران، ۱۳۸۳.
- [۴] روزبهبانی، ع.، ساعدی، ع.، "شبیه‌سازی کیفی مخزن سد از منظر لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی در شرایط خشکسالی (مطالعه موردی: سد مخزنی پیغام چای کلیبر)"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۵] دانش، ش.، خیامی، م.، خداشناس، س. ر.، داوری، ک.، "شبیه‌سازی شرایط کیفی مخازن سدها (مطالعه موردی- مخزن سد طرق)"، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۸۸، ۲۳ (۱)، ۱۷-۲۹.
- [6] Bales, J. D., Diorgino, M. J., "Dynamic Modeling of Water Supply Reservoir Physical and Chemical Process", The First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, 19-23 April, 1998, pp 2-67.
- [7] Gunduz, O., Soyupak, S., Yurteri, C., "Development of Water Quality Management strategies for the proposed Isikli Reservoir" Journal of Water Science Technology, 1998, 37 (2), 369-376.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Eutrophication Simulation of Mahabad Dam Reservoir by Using CE-QUAL-W2 Two Dimensional Model**

Bayram Ali Mohammadnejhad <sup>a</sup>, Navid Parchami <sup>b</sup>, Javad Behmanesh <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

<sup>b</sup> Department of Water Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

**Received:** 29 May 2014 ; **Accepted:** 17 January 2015

---

**Keywords:**

Eutrophication, CE-QUAL-W2, Mahabad Dam, Water Quality.

---

### **1. Introduction**

Eutrophication is one of the most important environmental problems of the enrichment in surface freshwater bodies due to organic compounds originating from agricultural activities and industrial effluents. Eutrophication causes the reduction of water quality in eutrophic lakes and reservoirs. The purpose of this study was two dimensional simulation of eutrophication in Mahabad Reservoir by using of CE-QUAL-W2 model. Eutrophication is a process that forms due to excessive accumulation of nutrients in the body of water in the reservoir or lake sediments. It can lead to the activity of microorganisms and be followed by the uncontrolled growth of aquatic plants [1]. One of the important studies on the use of CE-QUAL-W2 model in the reservoir can be mentioned by Choi et al. [2]. They used this model for the investigation of possible impacts of enlarged water body according to dam reconstruction on the hydrodynamics and water quality of the reservoir. For calibration and validation of the model, field-collected data were compared with model predictions for water level fluctuations and water temperature and the model results showed a good agreement with field measurements.

Demand for water is steadily increasing throughout the world. Water quality has become increasingly more important in reservoir management. Reservoir managers and the public have come to the realization that water quality affects other environmental interests, such as fish and wildlife, and can impact or impair water use. The Mahabad dam has great importance in the supply of drinking water in Mahabad city. In the present research, changes of water quality in this reservoir were studied and provide an appropriate model to simulation of eutrophication in Mahabad Reservoir.

### **2. Materials and methods**

Mahabad storage dam is an embankment dam on the Mahabad River, west of Mahabad city in the West Azerbaijan province. Mahabad Dam has a nominal capacity of 197 million cubic meters and 172 million cubic meters of useful capacity which in addition to supplying drinking water to Mahabad, brings under its coverage over 12 thousand hectares of agricultural land in the city. The dam also has a hydroelectric power station. Construction began in 1968 and the dam was completed in 1970.

The two dimensional model CE-QUAL-W2 was used to simulate the eutrophication in the Mahabad dam reservoir. This model is a water quality and hydrodynamic model in 2D (longitudinal-vertical) for rivers, estuaries, lakes, reservoirs and river basin systems. W2 models basic eutrophication processes such as temperature-nutrient-algae-dissolved oxygen-organic matter and sediment relationships. Because the model assumes lateral homogeneity, it is best suited for relatively long and narrow water bodies exhibiting longitudinal and vertical water quality gradients.

CE-QUAL-W2 has been under continuous development since 1975. The original model was known as LARM (Laterally Averaged Reservoir Model) developed by Edinger and Buchak in 1975. The latest version 3.7 was a

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mohammadnejhad@yahoo.com (Bayram Ali Mohammadnejhad), navidparchami07@gmail.com (Navidparchami), j.behmanesh@urmia.ac.ir (Javad Behmanesh)

result of major modifications and improvements in the model development. The model has been applied to different rivers, lakes, reservoirs, estuaries, and combinations around the world [3].

The input data required for the model run can be divided into 6 categories: geometric data, initial conditions, boundary conditions, hydraulic parameters, kinetic parameters, and calibration data.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Sensitivity analysis of the model

Table 1 shows the final calibrated values of the effective coefficients in Mahabad dam. Using these values for the model showed a good agreement between the observed data and simulation results.

**Table 1.** The final value of the effective coefficients

Coefficient	Value
Wind sheltering coefficient (WSC)	0.50
Solar radiation absorbed in surface layer (BETA)	0.45
Extinction coefficient for pure water (EXH2O)	0.30
Sediment temperature (TSED)	10

#### 3.2. Calibration of the model

The next step, after preparing the model setup, is to begin calibration runs. Much of the literature refers to this step as calibration and verification in which model coefficients are adjusted to match an observed data set (calibration) and then the model is run on another “independent” data set without adjusting model coefficients to see if the model reproduces observed data in the prototype. The calibration data of the model includes reservoir geometry, water level, temperature and water quality parameters such as phosphate, total nitrogen and total phosphorus.

The usual sequence for the calibration is to first calibrate the water budget (or water surface elevation), then calibrate temperature (preferably salinity for estuarine applications), and finally water quality, keeping in mind that water quality calibration can affect temperature/salinity calibration.

The model was calibrated based on the temperature. According to the data in Table 2, it can be concluded that a good agreement between the observed and simulated data has been obtained.

Table 3 shows the water quality parameters calibration error in Mahabad dam reservoir modelling.

**Table 2.** Temperature calibration error in model simulations

Reach 21	Bahman 1389	Esfand 1389	Farvardin 1390	Ordibehesht 1390
AME (C)	0.16	0.06	0.41	0.90
RMSE (C)	0.73	0.09	0.92	1.87

**Table 3.** Water quality parameters calibration error

Reach No.	Parameter	RMSE	AME	RAE
17	po4 (phosphate)	0.03	0.017	0.36
	Total nitrogen	1.31	1.86	0.054
	Total phosphorus	0.024	0.014	0.44
21	po4 (phosphate)	0.008	0.004	0.28
	Total nitrogen	1.78	0.89	0.15
	Total phosphorus	0.058	0.021	0.86
34	po4 (phosphate)	0.024	0.031	0.4
	Total nitrogen	1.29	1.77	0.12
	Total phosphorus	0.022	0.016	0.046

### 3.3. Verification of the model

After the model calibration and obtaining effective coefficients for Mahabad Reservoir, the model was verified on data set of months Khordad to Shahrivar 1390. The results showed good agreement between the simulation and observed data.

### 4. Conclusions

In this study, the CE-QUAL-W2 model was used to simulate the eutrophication in Mahabad Reservoir. For the model calibration, the existing field data set from Bahman 1389 to Ordibehesht 1390 for temperature and eutrophication parameters including phosphate, total phosphorus and total nitrogen was used in three reach of reservoir, 17, 21 and 34. The model was verified on the other data set from Khordad to Sharivar 1390 for same parameters and reaches. Finally a good match between the observed data and model results were obtained. Temperature profiles showed that the summer stratification is occurred in Mahabad reservoir. Phosphate concentration in reservoir does not exceed 0.1 mg per liter. However, the maximum allowable limit for drinking water is 0.2 mg per liter. Therefore, nitrate and phosphate concentrations do not cause any problems in terms of nutrition policies in reservoir. If the phosphorus concentration exceeds 0.02 mg per liter, then it causes the reservoir eutrophication. The model results showed that the phosphorus concentration in Mahabad reservoir was greater than 0.05 mg/l, and therefore, the reservoir was in an eutrophication form conditions. Also, results from field sampling and model simulations showed that the total nitrogen concentration in all months exceeded 1.9 milligrams per liter and it led to the occurrence of the eutrophication in reservoir.

### 5. References

- [1] Kermani, M., Naseri, S., "The Effects of Dam Construction on Water Quality", Journal of Water and Environment, 2002, 51, 6-11.
- [2] Choi, J. H., Jeong, S. A., Park, S. S., "Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Turbidity Simulations for Prediction of Dam Reconstruction Effects in Asian Monsoon Area", Journal of the American Water Resource Association (JAWRA), 2007, 43 (6), 1444-1454.
- [3] Nazariha, M., Danaee, A., Hashemi, S. H., Izaddoostar, A. H., "Prediction of Thermal Stratification in Bakhtiari Dam using CE-QUAL-W2", Journal of Ecology, 2010, 54, 11-18.