

# Simulation of Emergency Spill of MTBE into Surface Water Reservoir and Remediation Techniques using Modified CE-QUAL-W2 Model: A Case Study for Gheshlagh Reservoir

M. Saadatpour<sup>1</sup>, A. Yousefi Moghadam<sup>2</sup>, M. Kolahdouzan<sup>3</sup>

1. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) msaadatpur@iust.ac.ir
2. Former Graduate Student of Civil and Environmental Engineering, College of Environment, Karaj, Alborz, Iran
3. Assist. Prof., School of Civil and Environmental Engineering, Amir Kabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran

(Received July 31, 2016 Accepted Jan. 18, 2017)

#### To cite this article :

Saadatpour, M., Yousefi Moghadam, A., Kolahdouzan, M., 2018, "Simulation of emergency spill of MTBE into surface water reservoir and remediation techniques using Modified CE-QUAL-W2 Model: A Case Study for Gheshlagh Reservoir." Journal of Water and Wastewater, 29(3), 17-30. Doi: 10.22093/wwj. 2017. 58499.2229 (In Persian)

#### Abstract

Due to the importance and widespread applications of oil products as well as their threats to surface water bodies in Iran, it is inevitable to apply suitable simulation models to develop management plans, actions, and appropriate scenarios. There are two modified versions of CE-QUAL-W2 and both can be used for simulations of emergency spills of toxic waste in transportation roadways. In this research, both modified versions were employed to simulate the fate of Methyl tert-butyl ether (MTBE) (a gasoline oxygenated additive) during an emergency spill. As a case study, the application of both models was used to evaluate the MTBE emergency spill that occurred on March 2003 near Khalifeh Torkhan river. Several remediation techniques including artificial turbulent, mixing, and aeration were used during the simulation study. Results showed that the modified version of the model (CE-QUAL-W2) depicted a better temporal and spatial distribution of MTBE pollution in reservoir compared to the first version of the model. Multiple scenarios were simulated in this study under various meteorological, hydrological, and MTBE loading for Gheshlagh reservoir. The simulation results showed that lower air temperature and higher wind speed are among the factors that reduce the reservoir recovery time. In addition, another parameter that found to decrease the recovery time of Gheshlagh reservoir is an increase in reservoir inflow and/or outflow rate.

**Keywords:** 2D Hydrodynamic and Water Quality Model, Gheshlagh Reservoir, Modified CE-QUAL-W2 Model (Ver. 1), MTBE, Volatile Organic Compound.



# شبیه‌سازی سرریز ناگهانی آلودگی MTBE و اقدامات بهسازی مخزن آب سطحی با استفاده از مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2: مطالعه موردی مخزن سد قشلاق

مطهره سعادت‌پور<sup>۱</sup>، آمنه یوسفی مقدم<sup>۲</sup>، مرتضی کلاهدوزان<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
msaadatpur@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده محیط زیست کرج، البرز، ایران

۳- استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت ۹۵/۵/۱۰ پذیرش ۹۵/۱۰/۲۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

سعادت‌پور، م.، یوسفی مقدم، ا.، کلاهدوزان، م.، ۱۳۹۷، "شبیه‌سازی سرریز ناگهانی آلودگی MTBE و اقدامات بهسازی مخزن آب سطحی با استفاده از مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2: مطالعه موردی مخزن سد قشلاق"  
مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۳)، ۱۷-۲۰. Doi: 10.22093/wwj.2017.58499.2229

## چکیده

با توجه به اهمیت و کاربرد گسترده فراورده‌های نفتی و نیز خطرات ناشی از این فراورده‌ها بر منابع آبهای سطحی در کشور، به‌کارگیری مدل‌های مناسب به منظور ارائه اقدامات و برنامه‌های مدیریتی مهم و ضروری است. در این پژوهش دو نسخه از مدل اصلاح شده CE-QUAL-W2 به منظور شبیه‌سازی رویداد سقوط تانکر حاوی سوخت ماده فرار آلی MTBE در مجاورت رودخانه خلیفه ترخان در اسفند ۱۳۸۱ مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل، روش‌های بهسازی شامل استفاده از ابزارها و تجهیزات مکانیکی به منظور ایجاد آشفستگی، اختلاط و هوادهی مصنوعی به کار گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل شده، نسخه دو مدل CE-QUAL-W2 در مقایسه با نسخه یک مدل، قادر به ترسیم مناسب‌تری از توزیع زمانی و مکانی شرایط کیفی آلودگی در رابطه با داده‌های میدانی ثبت شده برای MTBE است. علاوه بر این، محاسبه زمان پاک‌سازی مخزن سد قشلاق در سناریوهای متعدد هواشناسی و هیدرولوژیکی، مقدار بار MTBE و نحوه بهره‌برداری از مخزن سد نسبت به سناریوی پایه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این قسمت پژوهش نشان داد که کاهش دمای هوا و افزایش سرعت باد، سبب کاهش زمان پاک‌سازی مخزن سد می‌شود. همچنین، عامل دیگری که سبب کاهش زمان پاک‌سازی مخزن سد قشلاق می‌شود عبارت است از افزایش جریان دبی ورودی و یا دبی خروجی.

**واژه‌های کلیدی:** ماده آلی فرار، مخزن سد قشلاق، مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب، نسخه یک مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2، MTBE

## ۱- مقدمه

قایقرانی و نیز زیستگاهی برای گونه‌های آبی هستند. با توجه به منافع حاصل از این منابع با ارزش برای انسان، لازم است مباحث کمیت و کیفیت این منابع آبی به صورت توأم مورد توجه قرار گیرد. در دهه‌های اخیر، هم‌زمان با توسعه صنعتی، آلودگی‌های محیط زیست به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است و یکی از تهدیدات قابل توجه برای منابع آبی محسوب می‌شوند (Camp, 2009). از این‌رو

حدود سه درصد از آب موجود در جهان، آب شیرین است. بدون دسترسی به منابع آب شیرین با کمیت و کیفیت مناسب و مورد قبول، توسعه پایدار ناممکن خواهد بود (Bartram and Balance, 1996). مخازن آبهای سطحی، تأمین‌کننده منابع آبی مورد نیاز بشر در فعالیتهای کشاورزی، صنعتی، شرب، فعالیت‌های تفریحی،

سیستم با ترسیم تصویر روشن و دقیق‌تر برای مدیران و تصمیم‌گیران و نیز امکان ارزیابی سناریوهای مدیریتی قبل از به‌کارگیری آن را به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل نموده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته در این زمینه مدل‌های محدودی قابلیت شبیه‌سازی آلاینده‌های نفتی در پیکره آبهای سطحی را دارند و دسترسی به این مدل‌های اندک نیز به دلیل ویژگی‌های انحصاری و/یا تجاری آنان، محدود است (Moghaddam, 2015). در مقایسه با مدل‌های مرور شده در پژوهش اخیر، مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 با توجه به قابلیت شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیکی و ترکیبات آلی فرار مانند MTBE و بنزن در پیکره‌های آبی سطحی همچون رودخانه‌ها و مخازن و نیز قابلیت دسترسی آسان به منظور شبیه‌سازی آلودگی‌های مواد فرار نفتی، مناسب است (Feizi et al., 2015).

پس از انتخاب و تشخیص مناسب بودن "نسخه یک مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2" برای شبیه‌سازی مواد آلی فرار در مخازن و رودخانه‌ها، به منظور ترسیم تغییرات مکانی و زمانی، پاسخ‌های کیفی مخزن در ورود بار آلودگی ناشی از ترکیبات آلی فرار و قابلیت ارائه نتایج ارزیابی سناریوهای مدیریتی قبل از به‌کارگیری آن، از این مدل به منظور شبیه‌سازی یک رویداد واقعی در کشور استفاده می‌شود. با توجه به استفاده از روش‌هایی به منظور ایجاد تلاطم و آشفتگی و هوادهی مصنوعی در مخزن (با استفاده از حرکت سریع قایق‌های موتوری بر سطح آب، دستگاه‌های جت هوا<sup>1</sup> و دستگاه‌های دمنده هوا<sup>2</sup>) در رویداد آلودگی MTBE پیکره آبی، در این پژوهش قابلیت شبیه‌سازی این اقدامات به‌سازی به "نسخه یک مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2" افزوده می‌شود (Feizi et al., 2015).

رویداد منتخب، رویداد آلودگی ناگهانی مخزن سد قشلاق در اثر واژگونی تانکر حاوی MTBE در اسفند ماه ۱۳۸۱ بود که به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از این آلودگی، از تجهیزات ابزار مکانیکی به منظور کاهش زمان پاک‌سازی مخزن استفاده شده است. در این پژوهش رویداد آلودگی مورد اشاره و روش‌های مدیریتی مواجهه با این رویداد، در نسخه اصلاح شده این پژوهش شبیه‌سازی و عملکرد این نسخه، با نسخه قبلی مدل اصلاح یافته

همواره پایش و بررسی آلودگی‌ها در رودخانه‌ها و مخازن، همچنین شناخت ویژگی پیکره‌های آبی به منظور مقابله با آلودگی‌ها ضروری است. این شناخت شامل مقدار، نوع آلودگی ورودی و همچنین چگونگی پاسخ پیکره آبی به عوامل محیطی و انسانی است (Feizi, 2012).

مدل، ابزاری است که امکان پیش بینی اثرات فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی را بر روی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب در پیکره‌های مورد بررسی، فراهم می‌آورد. از مدل‌ها در سطح گسترده‌ای برای سنجش اثرات بارهای آلاینده‌های تخلیه شده به پیکره‌های آبی، اثرات سناریوهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Chapra, 1997). علاوه بر این، مدل‌های شبیه‌سازی، قادر هستند پاسخ پیکره‌های آبی را در اثر اتخاذ تصمیمات مختلف، در ارزیابی سناریوهای تصمیم‌گیری، فراهم نمایند. البته استفاده از مدل باید توأم با برنامه‌های پایش و بررسی آلودگی در رودخانه‌ها و مخازن، همچنین شناخت پیکره‌های آبی به منظور مقابله با آلودگی باشد (Camp, 2009).

در چند دهه اخیر، با توجه به اتفاقات ناگهانی آلودگی‌های نفتی منابع آبی رودخانه‌ها و مخازن در دنیا و نیز ایران، ناشی از نقص شبکه‌ها و سیستم‌های حمل و نقل مواد نفتی و/یا تصادم ناگهانی آنها، لزوم دسترسی به مدل‌هایی که قابلیت شبیه‌سازی این نوع از آلاینده‌ها را دارا می‌باشند، بیش از پیش ضروری است. به عبارتی فراهم بودن امکان پیش‌بینی چگونگی توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های نفتی در پیکره‌های آبی، برای اعمال شیوه‌های مدیریتی مطلوب و قابل اعتماد بسیار حائز اهمیت است (Camp, 2009). در سیستم‌های بزرگ و نامنظمی که رفتار دو بعدی داشته و چگونگی پخش و جابجایی آلاینده در پیکره آبی، تابعی از زمان وقوع رویداد، آورد رودخانه، حجم آب موجود در مخزن و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی و ضرایب و پارامترهای مؤثر در معادلات پخشیدگی-فرارفت-واکنش است، پیش‌بینی زمانی و مکانی توزیع آلاینده ابزار مناسبی برای مدیریت سیستم در اختیار قرار می‌دهد. مهم‌تر از آن پیش‌بینی و تعیین زمان لازم برای بازیابی مخزن و بازگشت به حالت عادی قبل از وقوع رویداد است (Saadatpour and Afshar, 2013).

رویدادهای چند دهه اخیر در کشور لزوم بررسی تأثیر اقدامات و راهکارهای مدیریتی در بهبود کیفیت منابع آبی و پاک‌سازی

<sup>1</sup> Air Jet  
<sup>2</sup> Blower

معادلات بر مدل سازی فرایند مبادله جرم ماده آلی فرار میان محیط هوا و آب و بر اساس رابطه موازنه جرمی به شرح معادله استوار شد (Feizi, 2012)

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_{OL} A (C_S - C)}{V} \quad (1)$$

که در این معادله

$C_S$  غلظت آلاینده در حال اشباع در آب بر حسب گرم بر مترمکعب،  $C$  غلظت آلاینده در سطح آب بر حسب گرم بر مترمکعب،  $K_{OL}$  سرعت انتقال کل بر حسب متر بر ثانیه،  $A$  سطح مقطع بر حسب مترمربع و  $V$  حجم بر حسب مترمکعب است. بر اساس قانون هنری و وجود موازنه جرمی در لایه سطحی تبادل، معادله زیر برقرار است (Feizi, 2012)

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_L} + \frac{RT_W}{HK_g} \quad (2)$$

که در این معادله

$K_L$  سرعت انتقال برای فاز مایع بر حسب متر بر ثانیه،  $K_g$  سرعت انتقال هوا بر حسب متر بر ثانیه،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T_W$  دمای آب بر حسب درجه کلوین و  $H$  ضریب هنری مربوط به MTBE بر حسب  $m^3 \cdot atm / mole$  است.

معادلات واکنش‌ها و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده در این زیربرنامه با هدف شبیه‌سازی سرنوشت مواد آلی فرار و با مراجعه به منابع علمی معتبر انتخاب شدند. زیربرنامه شبیه‌سازی ترکیبات آلی فرار، فرایندهای زوال مواد آلاینده آلی فرار مانند تبخیر (فراریت)، هیدرولیز و/یا اکسیداسیون را همراه با زوال بیولوژیکی (گنجانده شده در کد اصلی برنامه‌نویسی CE-QUAL-W2) شبیه‌سازی می‌نماید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ماده آلی فرار و ضرایب واکنش‌ها نیز در قالب فایل داده‌های ورودی به زیر برنامه شبیه‌سازی ماده آلی فرار ارائه می‌شود (Feizi et al., 2015). جزئیات بیشتر در مورد معادلات مورد استفاده و نحوه توسعه مدل CE-QUAL-W2 در پژوهش فیضی در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است.

در مدل CE-QUAL-W2، پارامترهای مدل انتقال (ضریب ویسکوزیته گردابی افقی<sup>۱</sup>، ضریب پخشیدگی افقی<sup>۲</sup> و ضریب

CE-QUAL-W2 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Feizi et al., 2015).

همچنین تأثیر سناریوهای آب و هوایی و نیز عوامل انسانی (نحوه بهره‌برداری از مخزن، حجم آلودگی ورودی و محل ورود آلودگی) به دلیل تأثیر بر فرایندهای چرخش جرم و انرژی در مخزن و در نتیجه بر پاسخ‌های کیفی مخزن سد قشلاق و زمان پاک‌سازی آن مورد بررسی و نتایج آن ارائه می‌شود.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2 (نسخه دو)

مدل CE-QUAL-W2 مدلی دوبعدی است که برای حل معادلات مومنتم افقی، انتقال جرم، تراز سطح آزاد آب، فشار هیدرواستاتیکی، پیوستگی و چگالی از روش عددی تفاضل محدود بهره می‌برد. این مدل قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای عمومی کیفی با آهنگ میراثی مرتبه صفر و یا یک و یا سرعت ترسیب مشخص یا ضریب آرینیوس مختلف برای تعریف پارامترهای کیفی ردیاب پایستار، زمان ماند هیدرولیکی یا عمر آب، باکتری‌های کلیفرم و آلاینده‌ها به هر تعداد از گروه‌های جامدات معلق معدنی، فیتوپلانکتون، اپیفیتون، CBOD، آمونیاک، نیترات، ارتوفسفات، مواد آلی محلول و دانه‌ای ناپایدار/پایدار، کل کربن غیر آلی، قلیابیت، آهن، اکسیژن محلول، رسوبات آلی، حلالیت گازها، هر تعداد از گروه‌های ماکروفیت، زئوپلانکتون، مواد معدنی محلول و ذره‌ای ناپایدار/پایدار فسفری و نیتروژنی را دارد. اضافه بر موارد فوق حدود ۶۰ متغیر حالت شامل pH، TOC، DOC، TON، TOP، DOP و غیره توسط این مدل محاسبه می‌شود. به لحاظ بررسی‌های کیفیت آب عملاً هر ترکیبی از پارامترهای کیفی را می‌توان در شبیه‌سازی منظور و یا از مرحله شبیه‌سازی حذف نمود (Cole and Wells, 2006).

در مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2، سرنوشت و انتقال مواد آلی فرار در پیکره‌های آبی به صورت انتقال جرم ماده‌ای پایستار تعریف شده است. در پژوهش فیضی و همکاران در سال ۲۰۱۵، زیر برنامه شبیه‌سازی ترکیبات آلی فرار به کد برنامه نویسی اصلی مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 نسخه ۳/۵ افزوده شد تا امکان شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر سرنوشت مواد آلی فرار توسط مدل فراهم شود. اساس این

<sup>1</sup> Hor. Eddy Viscosity (AX)

<sup>2</sup> Hor. Eddy Diffusivity (DX)

سنندج - دیواندره در حاشیه رودخانه خلیفه‌ترخان، بر اثر واژگون شدن یک دستگاه تانکر حاوی ۳۰۴۰۰ لیتر ماده مکمل بنزین با نام اختصاری MTBE، از محموله تانکر وارد جریان رودخانه خلیفه ترخان شد و با طی مسیر کوتاهی با ورود به مخزن سد قشلاق موجب آلودگی آن شد (Iran Ministry of Energy, 2003). ستاد مدیریت بحران طرح قشلاق، به منظور کاهش زمان پاک‌سازی مخزن، عملیات هوادهی با استفاده از ایجاد آشفتگی از طریق حرکت سریع قایق‌های موتوری بر سطح دریاچه سد، استفاده از دستگاه دمنده هوا و جت هوا را از تاریخ ۱۳۸۱/۱۲/۱۸ در دستور کار خود قرار داد. در تاریخ ۱۳۸۱/۱۲/۲۱، ۶ دستگاه قایق موتوری و سه دستگاه جت هوا به منظور ایجاد آشفتگی در آب و عملیات هوادهی شروع به کار نموده و در تاریخ ۱۳۸۱/۱۲/۲۴، دو دستگاه دمنده هوا نیز به مجموعه سایر تجهیزات هوادهی افزوده شد. استفاده از این تجهیزات به منظور مقابله با بحران تا تاریخ ۱۳۸۲/۱/۱۶ ادامه یافت (Iran Ministry of Energy, 2003).

### ۲-۳- اثرات مخرب MTBE

نتایج پژوهش بر روی انسان و حیوان نشان می‌دهد که MTBE به سرعت از طریق استنشاق وارد جریان خون می‌شود. در حیوانات این ماده در کبد، کلیه و مغز توزیع می‌شود. از دیگر اثرات MTBE و محصولات آن موارد افزایش آسم، قابلیت تخدیر اعصاب، اثر بر باروری (به ویژه در حیوانات)، سرطان‌زایی، ناراحتی تنفسی و حساسیت پوستی است.

ارزیابی ریسک اکولوژیکی<sup>۲</sup> نشان می‌دهد که MTBE و ترکیبات آن در ایجاد مشکلات اکولوژیکی به‌ویژه برای اکوسیستم‌های آبی مختلف نقش دارند (Major Planning Office of Iran Electricity and Energy, 2000).

### ۲-۴- کاربرد مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 در یک

#### مورد مطالعاتی واقعی

#### ۲-۴-۱- اطلاعات هندسی مخزن قشلاق

داده‌های هندسی و ژرفاشناسی سیستم مخزن سد قشلاق با رسم پروفیل‌های عمودی بر نقشه توپوگرافی مخزن که از نقشه‌های اتوکد با مقیاس ۱:۲۰۰۰ از شرکت مهندسی مشاور دریا نقشه تهیه شده

و اسکوزیته گردابی عمودی<sup>۱</sup> و واکنش ضریب واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی (آلودگی، به صورت ضرایب ثابت توسط کاربر تنظیم می‌شوند و با تغییر در سرعت جریان و دما در دوره شبیه‌سازی توسط مدل اصلاح می‌شوند. این در حالی است که در صورت به‌کارگیری اقدامات بهسازی با استفاده از دستگاه‌های جت هوا، دستگاه‌های دمنده هوا و حرکت قایق‌های موتوری به منظور هوادهی مصنوعی و ایجاد تلاطم و اغتشاش در پیکره آبی با هدف حذف سریع‌تر آلودگی ماده فرار نفتی، ضرایب انتقال و واکنش در مدت زمان به‌کارگیری این روش‌ها متغیر خواهند شد. از این رو در این پژوهش با تغییر در کد برنامه "نسخه یک مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2" (Feizi, 2012)، امکان تعریف تغییرات زمانی این ضرایب در مدل CE-QUAL-W2 فراهم شد تا تأثیر به‌کارگیری اقدامات مدیریتی بر نتایج مدل شبیه‌سازی و پاسخ‌های پیکره آبی بر ورود ماده فرار نفتی، مطالعه شود.

### ۲-۲- مورد مطالعاتی

#### ۲-۲-۱- سد قشلاق

سد قشلاق واقع در ۱۲ کیلومتری شمال غربی شهر سنندج، منبع اصلی تأمین آب شرب شهر سنندج و حدود ۴۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی پایاب است. حجم مخزن سد ۲۲۴ میلیون مترمکعب و آب قابل تنظیم آن ۱۰۵ میلیون متر مکعب است. این سد خاکی سنگریزه‌ای دارای طول تاج ۳۳۰ متر و دارای سرریز از نوع آزاد است. متوسط بارش سالانه منطقه ۴۶۴/۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴/۲ درجه سلسیوس است. متوسط رطوبت نسبی ۵۳ درصد و متوسط سرعت باد ۲ متر در ثانیه است (Iran Ministry of Energy, 2003). ورودی‌های سد قشلاق شامل رودخانه‌های خلیفه ترخان و چهل‌گزی بوده و مساحت حوضه آبریز هر یک به ترتیب ۶۸۷ و ۲۸۰ کیلومتر مربع و دبی متوسط سالانه رودخانه‌های مزبور نیز به ترتیب ۲/۷۷ و ۱/۶۹ مترمکعب در ثانیه است. ۷۳ درصد از حجم جریان‌ات سطحی طی سه ماهه اسفند، فروردین و اردیبهشت از رودخانه گذر و به مخزن سد قشلاق وارد می‌شوند (Iran Ministry of Energy, 2003).

در روز چهارشنبه مورخ ۱۳۸۱/۱۲/۱۴ در کیلومتر ۳۵ جاده

<sup>2</sup> Ecological Risk Assessment (ERA)

<sup>1</sup> Max Vertical Eddy Viscosity (AZMAX)

جهت باد و پوشش ابر از ایستگاه سینوپتیک سنندج در مقیاس زمانی ۶ ساعته استخراج شد.

#### ۲-۴-۴- داده‌های دمای آب

بر اساس معادله توازن گرمایی در یک واحد حجم محدود و برای یک سیستم فرضی با اختلاط کامل:

(۳) میزان تبادل گرمای سطحی  $\pm$  جریان گرمای خروجی - جریان گرمای ورودی = میزان تجمع گرما

جریان گرمای ورودی، میزان جریان گرمایی ورودی از دبی جریان‌های ورودی به پیکره آبی است، همچنین جریان دمایی خروجی، جریان گرمایی خروجی از طریق جریان خروجی رودخانه، برداشت آب از آبگیرها، جریان نفوذی به منابع آب زیرزمینی و غیره است. تبادل گرمایی، گرمای تبادل شده میان محیط هوا و آب است که بر اساس موقعیت پیکره آبی و حالت اتمسفر می‌تواند به‌عنوان منبع وارد کننده یا برداشت گرما تلقی شود. میزان تجمع گرما از معادله زیر حاصل می‌شود

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = Q_{in} \rho C_p T_{in}(t) - Q_{out} \rho C_p T(t) + A_s J \quad (4)$$

که در این معادله

$J$ ،  $T$ ،  $T_{in}(t)$  و  $A_s$  دمای آب ورودی در زمان  $t$ ، دمای المان محاسباتی، شدت جریان گرمایی و سطح آن واحد محاسباتی می‌باشند. مجموع جریان‌های انتقال گرما را می‌توان به‌صورت معادله ۵ نشان داد

$$J = J_{sn} + J_{an} - (J_{br} + J_c + J_e) \quad (5)$$

که در آن

$J_{sn}$ ،  $J_{an}$ ،  $J_{br}$ ،  $J_c$  و  $J_e$  به ترتیب تابش خالص امواج خورشیدی با طول موج کوتاه، تابش خالص امواج اتمسفری با طول موج بلند، تابش بازگشتی امواج با طول موج بلند، فرارفت و تبخیر هستند. در این پژوهش معادلات مربوط به هر ترم از مراجع معتبر استخراج و در فرمول‌بندی محاسبه دمای آب بر اساس اطلاعات هواشناسی گنجانده شد (Chapra, 1997). این روابط در نرم‌افزار VB

بود، استخراج شد (شکل ۱). مخزن قشلاق از دو شاخه جریان رودخانه‌های چهل‌گزی و خلیفه ترخان تغذیه می‌شود. شاخه سمت راست شاخه خلیفه ترخان و شاخه سمت چپ آن، شاخه چهل‌گزی است. با استفاده از نقشه توپوگرافی مخزن قشلاق، ۲۹ بازه محاسباتی با متوسط طولی ۳۵۰ متر در شاخه خلیفه ترخان و ۶ بازه محاسباتی در شاخه چهل‌گزی با متوسط طولی ۵۴۰ متر تعریف شد. متوسط عرض بازه‌ها نیز از ۲ متر تا ۲۲۰۰ متر در بازه‌های محاسباتی مختلف بر اساس نقشه‌های توپوگرافی مخزن قشلاق برای مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 تعریف شد. ۴۷ لایه محاسباتی با مقدار متوسط ۲ متر، برای تعریف عمق مخزن در فایل هندسه مدل وارد شد. این مخزن به‌صورت دو شاخه در مدل CE-QUAL-W2 تعریف شد که شاخه اول از بازه ۱ تا ۳۱ و شاخه دوم از بازه ۳۲ تا ۳۹ به مدل معرفی شد. سازه‌های هیدرولیکی تعریف شده برای مدل، آبگیر و سرریز به ترتیب در رقوم ارتفاعی ۱۵۵۴ و ۱۵۷۰ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشند (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2014).

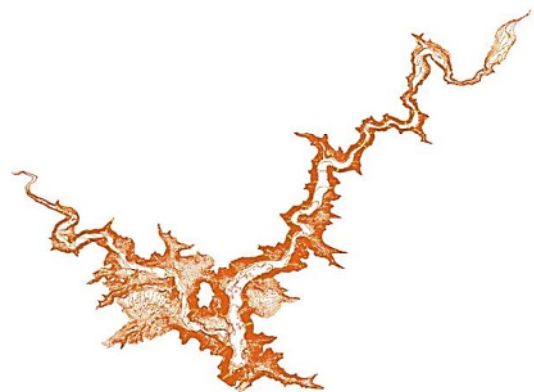


Fig. 1. Topographic Map of Reservoir

شکل ۱- نقشه توپوگرافی مخزن سد

#### ۲-۴-۲- داده‌های آب‌سنجی؛ دبی آب ورودی به مخزن قشلاق

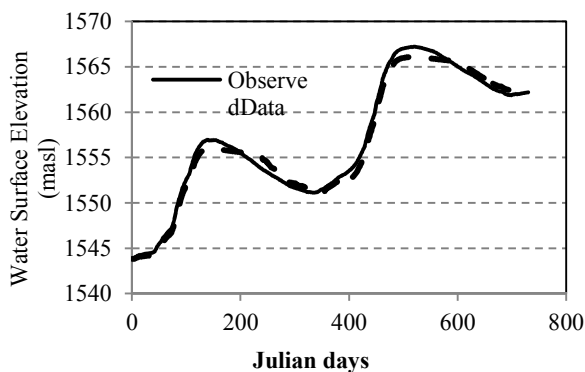
اطلاعات مربوط به دبی جریان ورودی به مخزن قشلاق از سایت Irandams تهیه شد. همچنین بر اساس مطالعات هیدرولوژیکی طرح از گزارش وزارت نیرو، مقادیر دبی شاخه‌های خلیفه ترخان و چهل‌گزی استخراج شد (Iran Ministry of Energy, 2003).

#### ۲-۴-۳- داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت و



دسترس، نسبتاً مناسب و قابل قبول است. پارامترهای کنترل کننده تبخیر و سرعت وزش باد در فایل‌های ورودی مدل با سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب شدند که حداکثر تطابق میان داده‌های میدانی و نتایج شبیه‌سازی به منظور کالیبراسیون تراز سطح آب ایجاد شود (جدول ۱).



**Fig. 3.** Comparison of observed and simulated water surface elevation resulted from CE-QUAL-W2 and observed data

شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی تراز سطح آب مخزن توسط مدل CE-QUAL-W2 و داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی

جدول ۱- پارامترهای کنترل کننده دما و تبخیر در مدل

CE-QUAL-W2

**Table 1.** Calibrated parameters used in CE-QUAL-W2 model affecting water temperature and evaporation

Parameter	AFW*	BFW*	CFW*
Default Value	9.2	0.46	2
Calibrated Value	9.5	0.6	3

\* CE-QUAL-W2 Model Parameter name

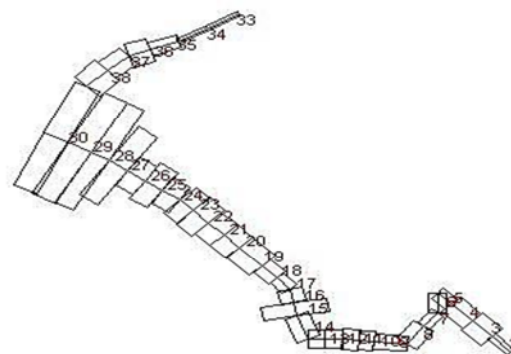
به منظور کالیبراسیون دمای آب مخزن، دسترسی به پروفیل داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده در عمق مخزن در دوره مشخصی، میسر نبوده است. اما با توجه به کالیبراسیون ضرایب مؤثر در تبخیر در مدل CE-QUAL-W2 و نیز نزدیکی میان مقادیر متوسط ثبت شده از دمای آب در سطح مخزن در دوره‌های زمانی ماهانه و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل، می‌توان با تقریب قابل قبولی نتایج شبیه‌سازی دما توسط مدل را پذیرفت. در شکل ۴ پروفیل عمودی دما در ماه‌های مختلف سال در مخزن قشلاق نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دمای آب در ماه‌های آبان، دی و اسفند از دمای هوا بیشتر و در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور از دمای هوا کمتر است. همچنین لابه‌بندی حرارتی قابل توجهی در

برنامه‌نویسی و بر اساس اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه (ایستگاه سینوپتیک سنندج) دمای آب جریان ورودی به مخزن قشلاق محاسبه شد (Moghaddam, 2015).

### ۳- مدل‌سازی

#### ۳-۱- کالیبراسیون هندسه مخزن

شکل ۲ المان‌های محاسباتی تعریف شده از مخزن سد قشلاق را که بر اساس اطلاعات فایل هندسه مخزن و سایر داده‌های ورودی به مدل CE-QUAL-W2، ایجاد شد، نمایش می‌دهد. مخزن سد قشلاق به صورت یک پیکره آبی و دو شاخه برای مدل تعریف شده است. یکی از روش‌های حصول اطمینان در کالیبراسیون هندسه مدل مخزن، تطابق نمودار سطح-حجم-ارتفاع حاصل از مدل‌سازی با داده‌های استخراج شده نقشه‌برداری است که در این پژوهش تطابق بسیار مناسبی میان داده‌های حجم-ارتفاع مدل و واقعی (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2014) وجود داشته است.



**Fig. 2.** Segmentation of Gheslgh Reservoir used in CE-QUAL-W2 Mode

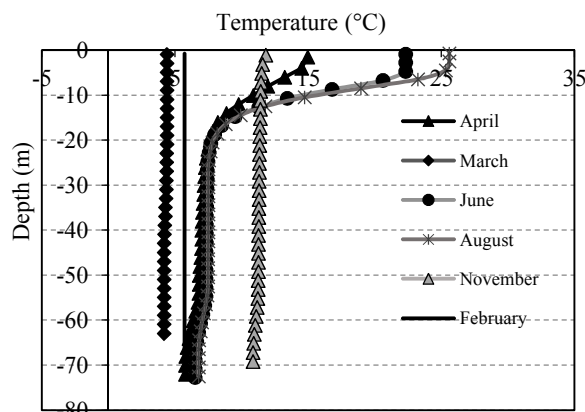
شکل ۲- شبکه‌بندی مخزن سد قشلاق در مدل CE-QUAL-W2

#### ۳-۲- کالیبراسیون هیدرودینامیک مخزن

به منظور کالیبراسیون تراز سطح آب در مخزن، نتایج شبیه‌سازی تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 با داده‌های آماری موجود بین ۱۳ دی ماه ۱۳۸۰ (۱ ژانویه ۲۰۰۴) مقایسه شد (شکل ۳). متوسط خطا در طول دوره شبیه‌سازی دو ساله، ۴۰ سانتی‌متر بود که با توجه به عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های در

داده‌های محدود ارائه شده از نقاط مختلف مخزن در روز اول شبیه‌سازی، در روز اول شبیه‌سازی طولی از مخزن به‌ویژه در لایه‌های سطحی خود با جرمی از آلودگی مواجه شده بود و دارای غلظت اولیه بود. اطلاعات ورودی مدل توسعه یافته بر اساس داده‌های ثبت شده از رخدادهای جریان ورودی به مخزن قشلاق از روز ۱۵ تا ۲۲ اسفندماه سال ۱۳۸۱ حاوی جرم و غلظت آلاینده MTBE است و از روز ۲۳ اسفند میزان غلظت MTBE جریان ورودی در گزارش صفر ارائه شده است (Iran Ministry of Energy, 2003).

به‌منظور کالیبراسیون غلظت MTBE در سطح و عمق مخزن، لازم است برخی پارامترهای مدل مانند ضریب ویسکوزیته گردابی افقی، ضریب پخشیدگی افقی و ضریب ویسکوزیته گردابی عمودی طی فرایند سعی و خطا کالیبره شوند. ضریب ویسکوزیته گردابی افقی، انتشار مومنتم در راستای x را نمایش می‌دهد و ضریب پخشیدگی افقی در انتقال گرما و کیفیت آب مؤثر است. بیشینه ضریب ویسکوزیته گردابی عمودی نیز در انتقال گرما و جرم به لایه‌های عمقی جریان نقش دارد. آنالیز حساسیت‌هایی نیز بر روی الگوریتم محاسبه شد و ویسکوزیته گردابی عمودی (توابع W2، RNG، W2N، NICK، RNG، TKE) در معادله مومنتم افقی و روش‌های صریح یا ضمنی انتقال عمودی مومنتم افقی<sup>۱</sup> صورت پذیرفت که تأثیر قابل توجهی در بهبود نتایج کالیبراسیون غلظت MTBE در مخزن قشلاق نداشت. با توجه به استفاده از روش‌های مدیریتی در کاهش زمان پاک‌سازی مخزن سد قشلاق و نیز محدودیت‌های "نسخه یک مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2"، در این پژوهش قابلیت مدل‌سازی این اقدامات مدیریتی از طریق اصلاح در کدنویسی برنامه CE-QUAL-W2 ایجاد شد و نتایج دو نسخه مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2 با یکدیگر مقایسه شدند. در جداول ۲ و ۳ ضرایب کالیبره شده پارامترهای مورد نظر در دو نسخه اصلاح شده CE-QUAL-W2 ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، در "نسخه دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2" به‌منظور گنجانیدن اثرگذاری اقدامات مدیریتی بر فرایندهای انتقال و واکنش آلودگی ماده فرار نفتی در طی دوره زمانی مشخص، این ضرایب به دو صورت متغیر با زمان و



**Fig. 4.** Temperature profile in various months based on the results of 2D hydrodynamic and water quality model  
شکل ۴- پروفیل عمودی دما در مخزن قشلاق در ماه‌های مختلف بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب

ماه‌های گرم سال وجود دارد؛ اردیبهشت با لایه‌بندی ضعیف شروع می‌شود و در شهریور به اوج خود می‌رسد و در ماه‌های آبان به بعد، شروع واژگونی و یکنواختی دما در لایه‌های مختلف مخزن مشاهده می‌شود.

### ۳-۳- شبیه‌سازی کیفیت آب پس از رویداد سقوط تانکر حاوی MTBE در مخزن قشلاق

به‌منظور شبیه‌سازی رویداد واژگونی تانکر حاوی MTBE، ابتدا شرایط هیدرودینامیکی مدل‌سازی و کالیبره شد و سپس شبیه‌سازی این رویداد صورت پذیرفت. این رویداد در فاصله زمانی بین ۱۴ اسفندماه ۱۳۸۱ (۴ مارس ۲۰۰۳) تا ۲۰ فروردین ۱۳۸۲ (۹ آوریل ۲۰۰۳) گزارش شده است. برای این منظور، داده‌های دبی ورودی و خروجی و اطلاعات هواشناسی این دوره به مدل هیدرودینامیک کالیبره شده مخزن قشلاق در محیط CE-QUAL-W2 توسعه داده شده، وارد شد و مدل‌سازی هیدرودینامیک انجام شد. در گام نخست، تراز سطح آب مدل‌سازی شده با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده مقایسه شد که تطابق مناسبی نیز وجود داشت (Iran Ministry of Energy, 2003).

شبیه‌سازی این رویداد، یک روز پس از سقوط تانکر حاوی MTBE بود و در نتیجه بخشی از این آلودگی مسیری را طی نموده و طول و عمق محدودی از مخزن متأثر از این رویداد بود (Iran Ministry of Energy, 2003). با توجه به این مسئله و نیز

<sup>1</sup> Vertical Transport of Horizontal Momentum



بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵، تطابق بیشتری میان داده‌های مشاهداتی و نتایج شبیه‌سازی مدل به‌ویژه در روزهای نخست پس از رویداد سرریز آلودگی MTBE، در "نسخه دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2" مشاهده می‌شود. به عبارتی در نسخه یک، امکان تعریف ضرایب AX، DX، AZMAX و ضریب واکنش (در اثر فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی) در طی زمان شبیه‌سازی به صورت اعداد ثابتی به مدل امکان‌پذیر است. این در حالی است که این ضرایب در اثر تغییر در آشفتگی جریان سیال و ورود اکسیژن به درون آب در اثر دستگاه‌های مختلف در طی دوره مشخصی از زمان، باید مقادیر متفاوتی در طول زمان داشته باشند. با توجه به عدم توانایی مدل CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی روش‌های هوادهی و آشفتگی مصنوعی، به‌کارگیری این روش‌ها از طریق امکان معرفی تغییرات زمانی ضرایب انتقال و واکنش در "نسخه دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2" برای مدل فراهم شد. بر اساس نتایج ارائه شده، هر دو نسخه مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2 در روزهای اول شبیه‌سازی قادر به شبیه‌سازی با دقت مناسب از غلظت MTBE در سطح نیست. در حالی که عملکرد مدل اصلاح یافته نسخه دو، به مراتب بهتر است. دلیل این رویداد ممکن است به عدم توانایی CE-QUAL-W2 توسعه یافته در شبیه‌سازی تأخیر زمانی میان تبخیر و انحلال مرتبط باشد. بر اساس آنچه در مورد ترکیبات نفتی مطرح است، فرایند انحلال با تأخیر زمانی نسبت به تبخیر به‌وقوع می‌پیوندد. به عبارتی در روزهای نخست، انحلال MTBE و ورود به لایه‌های عمقی جریان ناچیز است و در نتیجه غلظت بیشتری در سطح باقی می‌ماند. این در حالی است که در مدل CE-QUAL-W2 انحلال از لحظه نخست و هم‌زمان با تبخیر آغاز می‌شود. به عبارتی در مدل CE-QUAL-W2، ماده MTBE ریخته شده در سطح در طی زمان در اثر انحلال و تحت تأثیر فرایند پخشیدگی به لایه‌های زیرین وارد می‌شود و نیز به‌طور هم‌زمان در اثر تبخیر از سطح حذف می‌شود. با همه این موارد، در مجموع از نتایج شبیه‌سازی MTBE در طی کل دوره توسط مدل CE-QUAL-W2 توسعه یافته رضایت نسبی وجود دارد. مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی MTBE در عمق مخزن قشلاق در دو نسخه اصلاح یافته و داده‌های اندازه‌گیری شده (میدانی) در سطح و نیز عمق ۱۰ متری از سطح آب به شرح شکل ۶ است. همچنین مقایسه غلظت MTBE در سطح مخزن در

جدول ۲- پارامترهای کنترل‌کننده انتقال جرم (کیفیت) در "نسخه یک مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2"

**Table 2.** Calibrated parameters used in modified CE-QUAL-W2 model affecting the transport of constituent

Parameter	K(20°C)	AX*	DX*	AZMAX*
Default Value	0.045	0.001	0.001	0.0001
Calibrated Value	----	1	1	1

\* CE-QUAL-W2 Model Parameter name

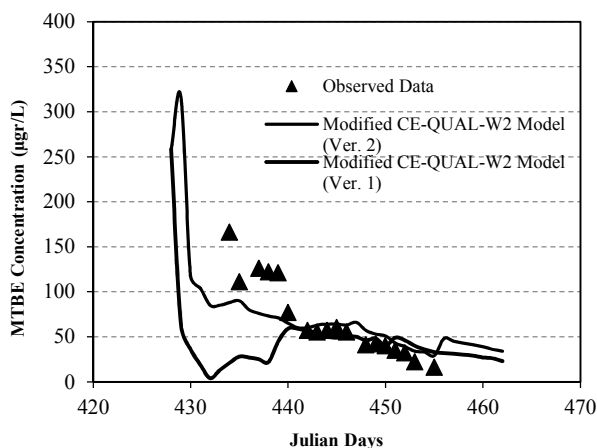
جدول ۳- پارامترهای کنترل‌کننده انتقال جرم (کیفیت) در "نسخه دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2"

**Table 3.** Calibrated parameters used in modified CE-QUAL-W2 model affecting constituent transportation

Parameters/Time	K(20°C)	AX*	DX*	AZMAX*
March 5 to 12	0.0003	0.0005	0.0001	0.00001
March 12 to 15	0.095	0.001	0.04	0.02
March 15 to April 5	0.1	0.001	0.04	0.02
April 5 to the end of Simulation	0.0003	0.0005	0.0001	0.00001

\* CE-QUAL-W2 Model Parameter name

متناسب با زمان به‌کارگیری این اقدامات، تعریف شدند. نتایج شبیه‌سازی MTBE در سطح مخزن در موقعیت ۶ کیلومتری فاصله از تاج سد با استفاده از نسخه‌های یک و دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2 در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده این رویداد در شکل ۵ نمایش داده شده است.



**Fig. 5.** MTBE concentration at 6 km distance from dam structure during March 05, 2003 to April 9, 2003; comparing the performance of two versions of modified CE-QUAL-W2 model with observed data

شکل ۵- غلظت MTBE در ۶ کیلومتری بدنه سد از تاریخ ۸۱/۱۲/۱۴ تا ۸۲/۱/۲۰؛ مقایسه عملکرد نسخه‌های مدل اصلاح شده CE-QUAL-W2 با داده‌های میدانی

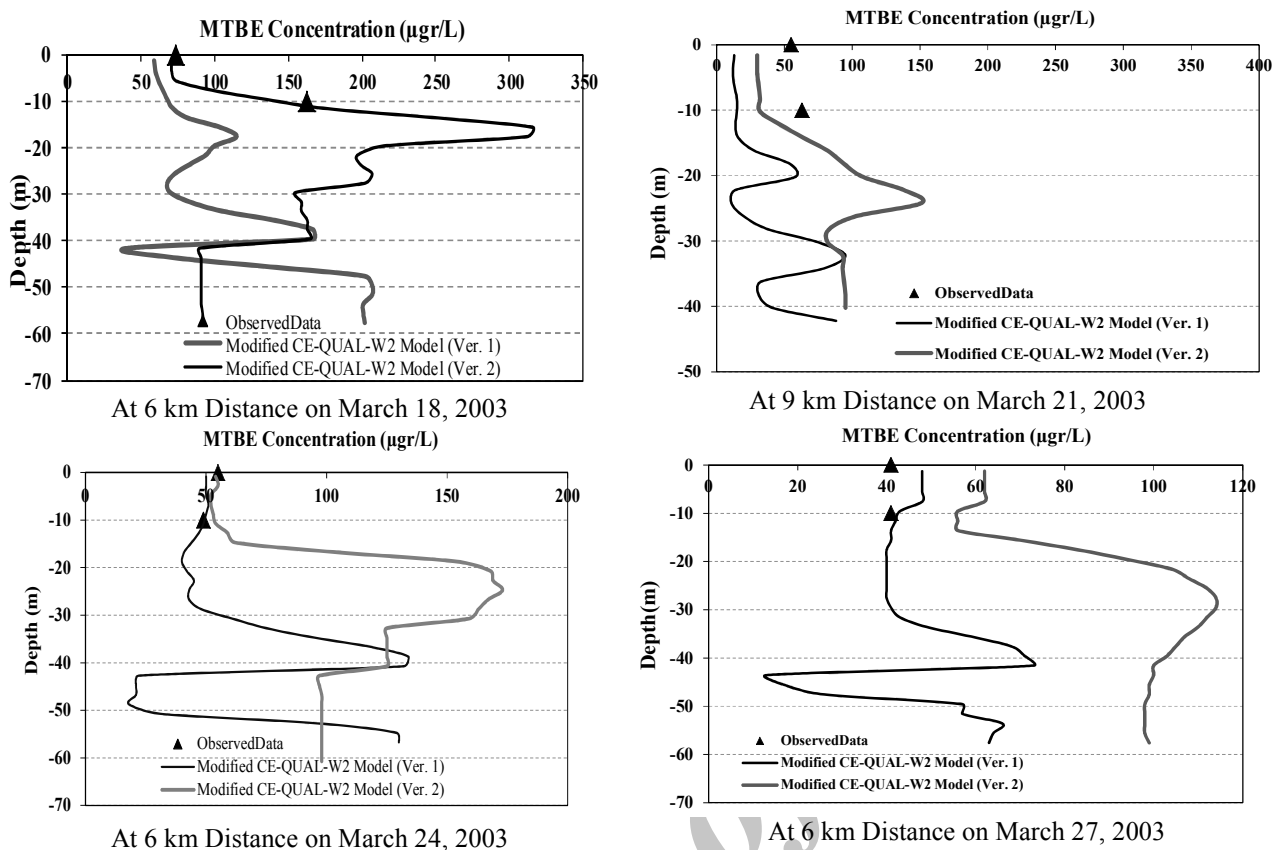


Fig. 6. Comparing the performance of two versions of modified CE-QUAL-W2 model with observed data; depth profile of MTBE concentration at MTBE spill event in different temporal and spatial monitoring situations

شکل ۶- مقایسه نتایج عملکرد شبیه‌سازی نسخه‌های یک و دو مدل اصلاح یافته CE-QUAL-W2 و داده‌های میدانی؛ پروفیل عمقی MTBE در مخزن قشلاق در رویداد سقوط تانکر حاوی MTBE در موقعیت‌های مکانی و زمانی مختلف پایش

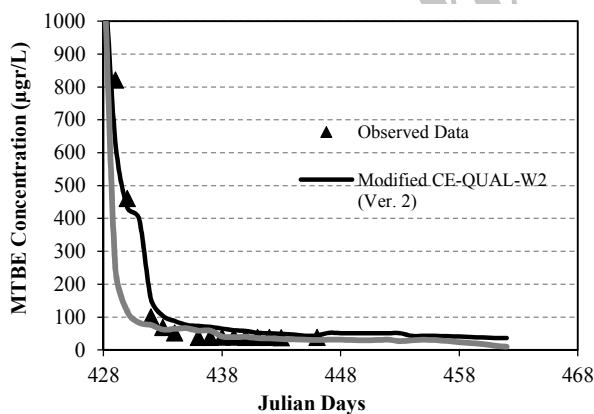


Fig. 7. Comparing the performance of two versions of modified CE-QUAL-W2 model with observed data at water surface elevation; 9 km from dam structure

شکل ۷- مقایسه عملکرد نسخه‌های یک و دو مدل اصلاح شده CE-QUAL-W2 با داده‌های میدانی در سطح آب مخزن قشلاق؛ ۹ کیلومتر از بدنه سد قشلاق

کیلومتر ۹ از تاج سد در دوره‌ای از روزهای شبیه‌سازی در شکل ۷ ارائه شده است.

### ۳-۴- مقایسه زمان پاک‌سازی مخزن قشلاق پس از رویداد سقوط تانکر حاوی MTBE

پس از شبیه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی و کیفی مخزن قشلاق در اثر این رویداد، ارائه زمان پاک‌سازی مخزن برای مدیران و برنامه ریزان بسیار حائز اهمیت است. برای تعیین این زمان، در مدل توسعه یافته توسط فیضی و همکاران در سال ۲۰۱۵، بیشترین غلظت MTBE از میان المان‌های محاسباتی مخزن در بازه‌های زمانی شبیه‌سازی در فایلی ثبت شد. همچنین متوسط غلظت نیز در مخزن مورد محاسبه در فایلی ذخیره شد (Feizi et al., 2015).

### ۳-۶- بررسی تأثیر دمای هوا بر نتایج رویداد

دمای هوا با تأثیر بر مقدار تبادل گرمایی سطح آب و هوا بر دمای پیکره‌های آبی تأثیر می‌گذارد و با تغییر دمای سیستم مورد بررسی، نرخ واکنش‌های موجود در سیستم تغییر می‌کند. همچنین دمای آب ورودی نیز نقش قابل توجهی بر دمای آب مخزن و در نتیجه نرخ ضرائب واکنش‌های بیولوژیکی و شیمیایی خواهد داشت.

برای بررسی اثر دما بر غلظت آلودگی پارامتر کیفی MTBE، دمای هوا ۰/۸ و ۱/۲ برابر شده و به تبع آن دمای آب ورودی نیز تغییر یافته است. نتایج این تغییر در شرایط آب و هوایی در مخزن قشلاق آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج مشاهده شده، کاهش دمای هوا و به تبع آن کاهش دمای آب ورودی به مخزن و نیز دمای آب مخزن سبب کاهش زمان پاک‌سازی مخزن از ۱۱۲ روز به ۱۰۵ روز می‌شود. افزایش دمای هوا، سبب افزایش زمان پاک‌سازی مخزن از ۱۱۲ روز به ۱۳۲ روز می‌شود. اگرچه افزایش دمای هوا و دمای آب سبب افزایش ضریب هنری، ضریب انتقال از فاز گازی و ضریب انتقال تبادل سطحی همراه است، اما افزایش دما، سبب افزایش انحلال ماده نفتی و ورود آن به لایه‌های زیرین مخزن می‌شود و در نتیجه جرم کمتری در سطح باقی مانده و همراه با آن، جرم کمتری امکان حذف از طریق فرایند تبخیر را می‌یابد. بررسی پروفیل عمقی غلظت MTBE نیز مؤید ورود جرم بیشتری به اعماق مخزن در طی رویداد شبیه‌سازی سناریوهای دمایی تعریف شده است (Moghaddam, 2015).

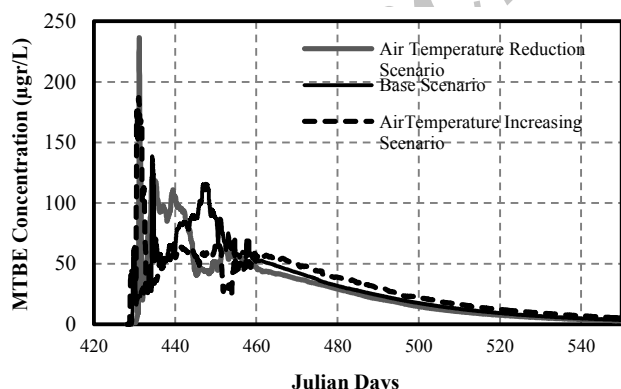


Fig. 9. Time series of maximum MTBE concentration in various air temperature scenarios during simulation period

شکل ۹- بیشینه غلظت MTBE در مخزن قشلاق در طی روزهای شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف تغییرات دمای هوا

در شکل ۸ سری زمانی بیشترین غلظت MTBE در مخزن قشلاق نمایش داده شده است. غلظت مجاز MTBE در منابع آب برای مصارف شرب، ۵ میکروگرم در لیتر است که بر اساس این معیار، پاک‌سازی کامل مخزن قشلاق از آلودگی MTBE در روز پانصد و چهلم، یعنی ۱۱۲ روز بعد از رویداد به وقوع پیوسته است. متأسفانه به دلیل عدم اندازه‌گیری این پارامتر کیفی در اعماق بیش از ۱۰ متر در مخزن قشلاق در زمان رویداد این حادثه، زمان پاک‌سازی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در گزارش حدود ۴۰ روز تخمین زده می‌شود.

لازم به ذکر است هیچ‌گونه برداشت جریان در سال ۱۳۸۲ از مخزن صورت نگرفته و دبی خروجی از مخزن قشلاق در سایت Irandams در این سال، صفر گزارش شده است.

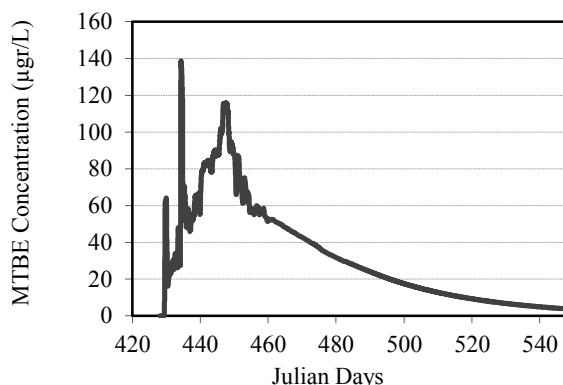


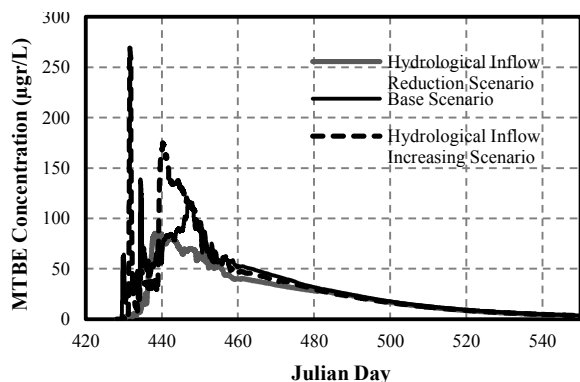
Fig. 8. Time series of maximum MTBE concentration in base scenario during simulation period

شکل ۸- سری زمانی بیشینه غلظت MTBE در مخزن قشلاق در

سناریوی پایه در طی روزهای شبیه‌سازی

### ۳-۵- بررسی تأثیر سناریوهای مختلف بر پاسخ پیکره آبی

در این قسمت برای بررسی عوامل مختلف بر روی توزیع زمانی و مکانی آلودگی MTBE، سناریوهایی بر اساس شرایط آب و هوایی یا عوامل انسانی تعریف شد. توزیع زمانی و مکانی پاسخ‌های سامانه مخزن با تعریف سناریوهای هواشناسی و هیدرولوژیکی متفاوتی چون شرایط دمای هوا، سرعت وزش باد و جریان دبی ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین سناریوهایی بر اساس تأثیر عوامل انسانی مانند مقادیر جرم آلودگی ورودی و الگوهای بهره‌برداری از مخزن تعریف و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفت.



**Fig. 10.** Time series of maximum MTBE concentration under various hydrological scenarios during simulation period

شکل ۱۰- سری زمانی تغییرات بیشینه غلظت MTBE در مخزن قشلاق در سناریوهای هیدرولوژیکی تعریف شده

ورودی سبب کاهش زمان پاک‌سازی از ۱۱۲ روز به ۱۱۱ روز می‌شود و کاهش دبی ورودی سبب افزایش زمان پاک‌سازی به ۱۱۴ روز می‌شود. به عبارتی افزایش یا کاهش دبی ورودی (تغییر شرایط هیدرولوژیکی به صورت سال پرآبی/کم‌آبی) به میزان ۴۰ درصد به ترتیب سبب کاهش و افزایش زمان پاک‌سازی به میزان ۱ و ۲ روز می‌شود. افزایش دبی با تأثیر بر فرایندهای انتقال، سبب گسترده شدن جرم در حجم بیشتری شده و به این ترتیب زمان پاک‌سازی مخزن کاسته می‌شود. علاوه بر این با افزایش دبی ورودی، حجم آب بیشتری در مخزن تجمع می‌شود و جرم آلودگی در حجم بیشتری توزیع می‌شود و در نتیجه غلظت کاهش می‌یابد. اگر چه زمان‌های محاسبه شده به نظر ناچیز می‌آیند، اما قطعاً از نظر مدیران و برنامه‌ریزانی که مدیریت پیکره آبی با تأمین شرب را به عهده دارند، این زمان به دلیل مباحث اجتماعی، سیاسی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

۳-۹- بررسی پاسخ سیستم در صورت تغییر مقدار بار آلودگی برای بررسی اثرات مقدار آلودگی وارد شده بر توزیع زمانی و مکانی غلظت آلاینده و نیز زمان پاک‌سازی مخزن، یکی از سناریوهای مورد بررسی مقدار آلودگی ورودی است. با در نظر گرفتن این نکته، فرض ورود نصف و دو برابر بار آلودگی MTBE (سقوط تانکری با نصف ظرفیت و یا سقوط دو تانکر حاوی MTBE) برای بررسی پاسخ سیستم در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد زمان پاک‌سازی مخزن در صورت سقوطی با

### ۳-۷- بررسی تأثیر کاهش و افزایش سرعت باد بر نتایج رویداد

برای بررسی اثر سرعت وزش باد بر غلظت آلودگی پارامتر کیفی MTBE، سرعت وزش باد ۰/۸ و ۱/۲ برابر شده است. با تغییر در سرعت وزش باد، دمای آب ورودی به مخزن و نیز دمای آب مخزن تغییر خواهد یافت. بر اساس نتایج مشاهده شده، افزایش سرعت باد و به تبع آن کاهش دمای آب ورودی به مخزن و نیز دمای آب مخزن سبب کاهش زمان پاک‌سازی مخزن از ۱۱۲ روز به ۹۴ روز می‌شود و کاهش سرعت وزش باد، سبب افزایش زمان پاک‌سازی مخزن از ۱۱۲ روز به ۱۱۸ روز می‌شود. افزایش سرعت باد سبب کاهش دمای هوا و به تبع آن کاهش ضریب هنری می‌شود. همچنین پارامترهای سرعت باد و دمای آب بر ضریب انتقال از فاز مایع تأثیرگذار هستند. با توجه به تأثیر معکوس دمای آب از سرعت وزش باد و نیز تغییرات ضریب انتقال از فاز مایع در اثر افزایش سرعت باد، افزایش ضریب تبادل آلاینده MTBE در سطح مشاهده می‌شود. به عبارتی در محاسبه ضریب انتقال تبدالی سطح، نقش سرعت وزش باد و ضریب انتقال از فاز مایع و دمای آب غالب بوده و سبب افزایش تبادل در سطح و در نتیجه افزایش تبخیر MTBE در لایه سطحی می‌شود. علاوه بر این با افزایش سرعت باد، دمای آب ورودی به مخزن و در نتیجه دمای آب مخزن کاهش می‌یابد. با کاهش دما، فرایند انحلال و ورود به لایه‌های زیرین کاهش یافته و در نتیجه جرم بیشتری از طریق تبخیر از لایه‌های سطحی حذف می‌شود. به این ترتیب زمان پاک‌سازی مخزن در سناریوی افزایش سرعت وزش باد نسبت به بقیه سناریوها کمتر است.

### ۳-۸- بررسی تأثیر کاهش و افزایش دبی ورودی بر نتایج رویداد

دبی جریان ورودی و نیز حجم آب درون مخزن بر زمان پاک‌سازی مخزن بسیار تأثیرگذار است. به منظور بررسی این تأثیر، با ثابت نگه داشتن جرم آلودگی MTBE ورودی به مخزن، میزان دبی ورودی به مخزن ۴۰ درصد افزایش و کاهش داده شد. سری زمانی بیشینه غلظت MTBE در مخزن قشلاق در سناریوهای هیدرولوژیکی تعریف شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. با بررسی‌های صورت گرفته بر نتایج مدل‌سازی، افزایش دبی

CE-QUAL-W2 می‌توان به در نظر نگرفتن تأخیر زمانی میان تبخیر و انحلال اشاره نمود؛ زیرا بر اساس مرور منابع علمی، در ساعات اول رخداد حادثه انحلال صورت نمی‌گیرد (یا با نرخ بسیار ناچیز صورت می‌پذیرد)، و تنها تبخیر فرایند مؤثر بر استهلاک است. اما این قابلیت در مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 وجود ندارد و این قابلیت را دارد که یکی از زمینه‌های پژوهش‌های آتی برای تکمیل قابلیت‌های این مدل باشد.

با استفاده از مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 زمان پاک‌سازی مخزن از کل آلودگی MTBE (غلظت ۵ میکروگرم بر لیتر)، سری زمانی بیشینه و متوسط غلظت MTBE در مخزن قشلاق استخراج شد تا اطلاعات لازم برای مدیران و برنامه‌ریزان فراهم شود. همچنین تأثیر سناریوهای مختلف هواشناسی (دمای هوا و سرعت وزش باد)، هیدرولوژیکی، نحوه بهره‌برداری از مخزن، ورود جرم‌های متغیر آلودگی بر زمان پاک‌سازی مخزن قشلاق مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در این پژوهش در بخش‌های مورد نظر ارائه شد. بر اساس نتایج حاصل سناریوهای هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند کاهش دمای هوا، افزایش سرعت باد و افزایش دبی جریان ورودی به مخزن، سبب کاهش زمان پاک‌سازی مخزن می‌شود. علاوه بر این، برداشت آب از آبیگری سد قشلاق تا میزان ۰/۷۵ مترمکعب بر ثانیه تأثیر قابل توجهی بر زمان پاک‌سازی مخزن نخواهد داشت ضمن اینکه آب آلوده به پایین دست نیز منتقل می‌شود. اگرچه همواره این انتظار می‌رود که با افزایش دبی خروجی جریان، ضرایب انتقال طولی نیز افزایش یابد و زمان پاک‌سازی را تسریع بخشد، اما تأثیر مقادیر دبی برداشت شده از مخزن قشلاق بسیار ناچیز است و منجر به تغییر زمان پاک‌سازی به حدود فقط یک روز می‌شود. اما در مجموع می‌توان گفت میزان و نحوه بهره‌برداری از مخزن بر روی غلظت آلودگی خروجی از مخزن و زمان پاک‌سازی مخزن تأثیرگذار است. با افزایش میزان خروجی از مخزن، سرعت انتقال طولی و در نتیجه انتقال طولی افزایش می‌یابد و در نتیجه جرم آلودگی در بازه زمانی کوتاه‌تری به نقطه خروجی مخزن رسیده و غلظت خروجی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر خروج جرم بیشتر آلودگی از مخزن، منجر به کاهش زمان بازپروری مخزن شده و نیز فرصت فرایند تبخیر برای جرم آلودگی نیز کاهش می‌یابد.

با توجه به عملکرد موفق مدل CE-QUAL-W2 در این پژوهش،

نصف ظرفیت حاوی MTBE، ۱۰۸ روز و در صورت سقوط دو تانکر ۱۱۹ روز به طول خواهد انجامید.

### ۳-۱۰- بررسی تأثیر نحوه بهره‌برداری از مخزن

تنظیم میزان رهاسازی از مخزن ممکن است در زمان پاک‌سازی مخزن و نیز غلظت جریان خروجی از مخزن تأثیرگذار باشد. بهره‌برداری از مخزن می‌تواند بر اساس تعداد و رقوم مختلف دریاچه‌های خروجی سد، میزان رهاسازی از دریاچه‌ها را به منظور اهداف سد شامل شود. در سد قشلاق تنها یک آبیگر خروجی تعریف شده است و در نتیجه امکان بررسی برداشت انتخابی مطرح نبوده است. لذا در این پژوهش برای بررسی تأثیر نحوه بهره‌برداری از مخزن، دو سناریو بر میزان برداشت آب خروجی از مخزن شامل ۰/۷۵ و ۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه تعریف شده است. لازم به یادآوری است در سناریوی پایه، در طول رویداد، با توجه به حساسیت‌های سلامت انسان و اکوسیستم در پایین دست رودخانه، هیچگونه برداشتی از آبیگرهای مخزن صورت نپذیرفت. بر اساس بررسی‌های انجام شده، خارج نمودن آب در هر دو سناریوی تعریف شده تأثیر قابل توجهی بر زمان پاک‌سازی نسبت به سناریوی پایه نداشته است. به عبارتی تأثیر این سناریوها بر زمان پاک‌سازی حدود یک روز است، این در حالی است که با تعریف این سناریوها، آب آلوده نیز به پایین دست منتقل می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مخزن قشلاق، بیشینه غلظت MTBE در مخزن در صورت برداشت آب از مخزن نسبت به سناریوی پایه یا عدم برداشت از آبیگرهای مخزن، بیشتر است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در نسخه دو مدل اصلاح شده CE-QUAL-W2، اثر به‌کارگیری روش‌های ایجاد آشفتگی، اختلاط و هوادهی مصنوعی در مخزن، بر ضرایب معادلات انتقال و واکنش ماده فرار نفتی نیز به قابلیت‌های نسخه قبلی مدل افزوده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط این نسخه با نسخه یک مدل توسعه یافته CE-QUAL-W2 در مقایسه با داده‌های میدانی رخداد سرریز MTBE در مخزن قشلاق، بیانگر قابلیت بهتر نسخه توسعه یافته این پژوهش در مقایسه با نسخه یک، به‌ویژه در روزهای نخست پس از رخداد سرریز آلودگی ماده فرار نفتی بود. از جمله کاستی‌های مدل توسعه یافته



شسیه‌سازی CE-QUAL-W2، افزودن قابلیت شبیه‌سازی آلاینده‌های دیگری مانند مواد سمی، فلزات سنگین و غیره برای پژوهش‌های آینده در زمینه مباحث مدل‌سازی کیفیت آب در مخازن و رودخانه‌ها توصیه می‌شود. همچنین می‌توان تغییرات مکانی به‌کارگیری این روش‌های مدیریتی در رویدادهای آلودگی مواد فرار نفتی به‌ویژه در مخازن و پیکره‌های آبی طولی را علاوه بر تغییرات زمانی منظور نمود.

امکان ایجاد ارتباط این مدل با مدل‌های بهینه‌سازی با هدف بهینه نمودن راهکارهای مدیریتی از جمله تعیین ظرفیت بهینه سیستم انحراف جریان‌های متعدد ورودی به مخزن و تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی، در رودخانه‌هایی که حساسیت در پایین دست به لحاظ مباحث سلامتی انسان و اکوسیستم جدی نباشد، در کاهش زمان پاک‌سازی مخزن وجود خواهد داشت. با توجه به دسترسی آزاد کدهای برنامه‌نویسی مدل

## References

- Bartram, J. & Balance, R. 1996. *Water quality monitoring*, 5<sup>th</sup> Ed., New York: Van Nostrand Reinhold.
- Camp, J.V.S. 2009. Design and implementation of an advanced spill management information system for surface water. PhD. Thesis, USA: Vanderbilt University.
- Chapra, S.D. 1997. *Surface water quality modeling*, 1<sup>st</sup> Ed., New York: Mc Graw-Hill.
- Cole, M.T. & Wells, S.A. 2006. *CE-Qual-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5, user manual*, Washington, DC: U.S Army Corps of Engineers.
- Feizi, F. 2012. Reservoir operation under accidental or intentional pollution spill (Karkhe river-reservoir case study)", MSc Thesis, Tehran, Iran: Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- Feizi, F., Afshar, A., Saadatpour, M. & Faraji, E. 2015. "CE-QUAL-W2 model modification to simulate volatile organic compounds in river-reservoir systems" *Journal of Water and Wastewater*, 26(5), 35-47. (In Persian)
- Iran Ministry of Energy. 2003. *Pollution removal in Gheshlagh reservoir*, Kordestan Regional Water Company: Iranian Water Resources Management Company. (In Persian)
- Moghadam, A.Y. 2015. Oil pollution modeling and management in reservoir systems. MSc Thesis, Karaj, Alborz, Iran: College of Environment. (In Persian)
- Major Planning Office of Iran Electricity and Energy. 2000. *Energy balance sheet, global development in energy sector*, Tehran, Iran: Iran Ministry of Energy. (In Persian)
- Mahab Ghodss Consulting Engineering Company. 2014. *Updating water resources studies in garmsiri watershed*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Saadatpour, M. & Afshar, A. 2013. Multiobjective simulation-optimization approach in pollution spill response management model in reservoirs. *Water Resource Management*, 27, 1851-1865.