

حمید طاهری شهرآئینی<sup>۱</sup>علی‌اکبر حسنی الیگودارزی<sup>۲</sup>حسین گنجی‌دوست<sup>۳</sup>

(دریافت ۸۹/۸/۹)

پذیرش ۹۰/۷/۳۰)

## چکیده

در این تحقیق تراز سطح آب و دمای آب در لایه‌های مختلف مخزن سد سپیدرود توسط نرم افزار CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی شد. داده‌های استفاده شده در مرحله کالیبراسیون، دما و تراز سطح آب مخزن سد مربوط به ۸۴/۳/۱۱ تا ۸۵/۱/۲۰ بود. با انجام آنالیز حساسیت، پارامترهای مؤثر شناسایی شد و در مرحله کالیبراسیون مدل، این پارامترها که شامل ضریب ممانعت باد، ضریب سایه و ضرایب تجربی تابع سرعت باد بودند، کالیبره شدند. در دوره صحت‌سنجی از داده‌های دما و تراز سطح آب مربوط به ۸۵/۱/۲۰ تا ۸۵/۷/۱۶ استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که CE-QUAL-W2 می‌تواند به ترتیب با درصد خطای ۰/۳ و ۴/۶، تراز سطح آب و دمای مخزن را شبیه‌سازی کند که حاکی از انجام مدل‌سازی مناسب می‌باشد. نتایج مدل‌سازی بیانگر عدم وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود بود. بررسی عوامل مؤثر بر دمای آب نشان داد عواملی که باعث عدم وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود می‌شوند، شامل سرعت بسیار بالای باد و زمان ماند کوتاه مخزن سد است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که دمای هوا و محل برداشت آب از سد، بر روی لایه‌بندی حرارتی سد سپیدرود تأثیر چندانی ندارند.

**واژه‌های کلیدی:** مخزن سد سپیدرود، لایه‌بندی حرارتی، شبیه‌سازی دما، شبیه‌سازی تراز سطح آب، CE-QUAL-W2

## Simulation of Water Level and Temperature in the Sepidrood Reservoir

H. Taheri Shahraini<sup>1</sup>A.A. Hassani Aligoodarzi<sup>2</sup>H. Ganjidoust<sup>3</sup>

(Received Oct. 31, 2010 Accepted Oct. 22, 2011)

## Abstract

In this study, the water level and temperature in the Sepidrood reservoir were simulated using CE-QUAL-W2 software. The utilized data for the calibration of water level and temperature models were the in-situ data from 1/6/2005 to 9/4/2006. Sensitivity analysis was used for determination of the influenced parameters on the water level and temperature in the Sepidrood reservoir. The results showed that wind sheltering coefficient, shading coefficient and empirical coefficients in the wind speed function are the most important parameters, hence these parameters were calibrated in the calibration step. In the validation step, the data from 9/4/2006 to 8/10/2006 were utilized. The results of model validation showed that CE-QUAL-W2 can simulate the water level and temperature with 0.3 and 3.6 % error, respectively. The results imply that the model has appropriate performance for water level and temperature simulation. The results demonstrated that Sepidrood reservoir is a completely mixed reservoir. The influences of different parameters on the reservoir stratification were investigated. The results demonstrated that the high wind speed and low retention time are the main factors on complete mixing of Sepidrood reservoir. In addition, the air temperature and the position of reservoir withdraw have no significant effects on the reservoir stratification.

**Keywords:** Sepidrood Reservoir, Thermal Stratification, Water Level Simulation, Temperature Simulation, CE-QUAL-W2.

1- Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Shahrood University, Shahrood  
(Corresponding Author) (+98 273) 3396007  
hamid.taheri@shahroodut.ac.ir

2- Grad. M.Sc. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat  
Modares University, Tehran

3- Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University,  
Tehran

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود  
(نویسنده مسئول) ۳۳۹۶۰۰۷ (۰۲۷۳) hamid.taheri@shahroodut.ac.ir

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،  
دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

## ۱- مقدمه

تراز سطح آب مخزن سد بیانگر کمیت آب موجود است. یکی از پدیده‌هایی که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت آب مخازن دارد، دمای آب و لایه‌بندی آن است. مطالعه بر روی لایه‌بندی حرارتی و وضعیت دمایی آب مخازن و پارامترهای مؤثر بر آن از سالها قبل آغاز شده و تاکنون مدل‌های ریاضی متنوعی که قابلیت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی، دمایی و لایه‌بندی حرارتی مخزن را دارند، توسعه یافته و استفاده شده‌اند [۸-۱]. مدل CE-QUAL-W2 یک مدل دو بعدی توانمند در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی مخازن است که توسط USACE<sup>۱</sup> توسعه یافته است [۹]. از این مدل برای مدل‌سازی دما و لایه‌بندی حرارتی در مخازن به وفور استفاده شده است و نتایج حاکی از قابلیت این مدل در شبیه‌سازی دمایی مخازن آب بوده است [۱۰-۱۴]. تحقیقات زیادی در رابطه با مدل‌سازی تراز سطح آب و دمای مخازن در ایران با استفاده از مدل‌های مختلف انجام شده است که می‌توان به برخی از مطالعات انجام شده مثل مدل‌سازی دمایی و لایه‌بندی حرارتی مخزن سد لتیان، سد بوکان و سد طرق اشاره کرد [۱۵-۱۷]. همچنین از مدل CE-QUAL-W2 در مطالعه و مدل‌سازی دمایی مخازن مختلف در ایران استفاده شده است که از این جمله می‌توان به مدل‌سازی دمایی و لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد کرخه و مخزن در دست احداث بختیاری اشاره کرد [۱۸ و ۱۹]. نظر به اینکه تاکنون شبیه‌سازی دمایی مخزن سد سپیدرود با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 انجام نشده است، لذا در این تحقیق اقدام به شبیه‌سازی تراز سطح آب و دمای مخزن سد سپیدرود با استفاده از مدل مذکور شد و

<sup>۱</sup>U. S. Army Corps of Engineers

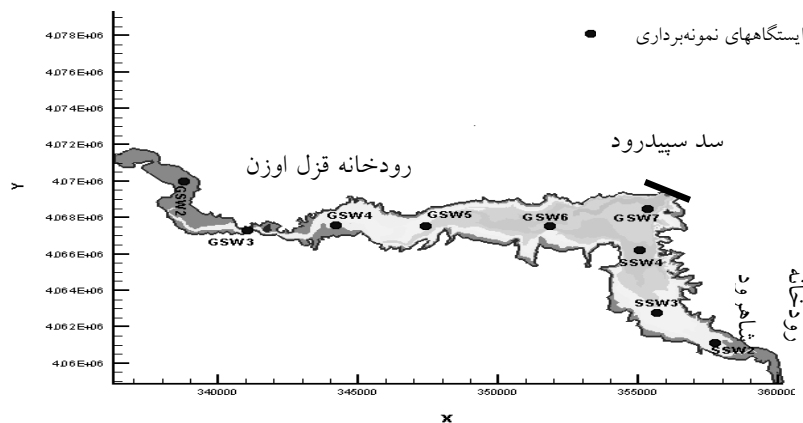
اثرات پارامترهای مختلف روی تراز سطح آب و دمای آب پشت سد، مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

نمای شماتیکی از سد سپیدرود در شکل ۱ ارائه شده است. سد سپیدرود در ۲۰۰ کیلومتری شمال غربی تهران و ۱۰۰ کیلومتری دریای مازندران کمی پایین‌تر از شهر منجیل در محل تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود قرار گرفته است. شاخه قزل‌اوزن از کوههای کردستان و آذربایجان سرچشمه گرفته و با دبی حداکثر ۲۰۰ و حداقل ۴ مترمکعب بر ثانیه پس از طی مسافت ۵۰۰ کیلومتر وارد دریاچه سد می‌شود. شاخه شاهرود از کوههای الموت و طالقان سرچشمه گرفته و با دبی حداکثر ۸۰۰ و حداقل ۶ مترمکعب بر ثانیه پس از طی مسافت ۱۸۰ کیلومتر وارد دریاچه سد می‌شود. در مخزن سد، برای کنترل کیفی آب، ۹ ایستگاه نمونه‌گیری وجود دارد که شش ایستگاه بر روی رودخانه قزل اوزن و سه ایستگاه بر روی رودخانه شاهرود می‌باشد (شکل ۱). ارتفاع، طول تاج، عمق متوسط، عمق حداکثر، عرض متوسط، مساحت دریاچه در رقوم حداکثر، حجم اولیه مخزن و زمان ماند مخزن سد به ترتیب ۱۰۶ متر، ۴۲۵ متر، ۲۴ متر، ۷۲ متر، ۱۵۷ متر، ۵۶ کیلومترمربع ۱۸۰۰ میلیون مترمکعب و ۱۶۲ روز است.

## ۳- روش تحقیق و داده‌های ورودی مدل

در این مطالعه از نسخه 3.6 مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی تراز سطح آب مخزن سد و لایه‌بندی حرارتی مخزن سد سپیدرود استفاده شد. روش عددی به‌کار گرفته شده در این مدل، روش تفاضل محدود است.



شکل ۱- نمای شماتیکی از مخزن سد سپیدرود و ایستگاه‌های نمونه‌برداری مورد استفاده (مختصات: UTM)

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- کالیبراسیون مدل

با توجه به وجود داده‌های تراز-حجم واقعی مخزن سد، ابتدا مقاطع مختلف مخزن سد که در شکل ۲ ارائه شده است به نحوی تصحیح شدند که داده‌های تراز-حجم واقعی بر داده‌های تراز-حجم مدل تا حد امکان منطبق شود و به این ترتیب، هندسه مخزن کالیبره شد. تفاوت بین حجم واقعی و حجم کالیبره شده مخزن سد حدود ۱/۴ درصد بود.

پارامترهایی که روی دما تأثیرگذار هستند شامل لزجت گردابه‌ای طولی، ضریب پخش طولی، ضریب مانینگ، ضرایب کاهش نور<sup>۱</sup>، ضریب جذب نور در لایه سطحی، ضریب ممانعت باد<sup>۲</sup>، ضریب سایه<sup>۳</sup> می‌باشند [۹]. در این مطالعه، تبخیر به صورت تابعی از سرعت باد  $(f(u)=a+bu^c)$  در نظر گرفته شد (a، b و c ضرایب تجربی و u سرعت باد است). آنالیز حساسیت روی پارامترهای مذکور نشان داد که پارامترهای اصلی مؤثر بر دما شامل WSC، shd و a و ضرایب b می‌باشند. با توجه به اینکه تبخیر بر دما و تراز تأثیرگذار است، لذا لازم است، تراز و دما به طور همزمان مورد کالیبراسیون قرار گیرند. مقادیر این چهار پارامتر با حدس و خطا مورد کالیبراسیون قرار گرفت که مقادیر کالیبره شده این پارامترها به صورت  $WSC=0.85$ ،  $shd=1$ ،  $a=5$  و  $b=2.0$  محاسبه شدند. برای بقیه پارامترها که حساسیت مدل به آنها کم بود، مقادیر پیش فرض مدل مورد استفاده قرار گرفت. تراز و دمای مخزن سد سپید رود با استفاده از داده‌های مربوط به تاریخ ۸۴/۳/۱۱ تا ۸۵/۰۱/۲۰ کالیبره شدند.

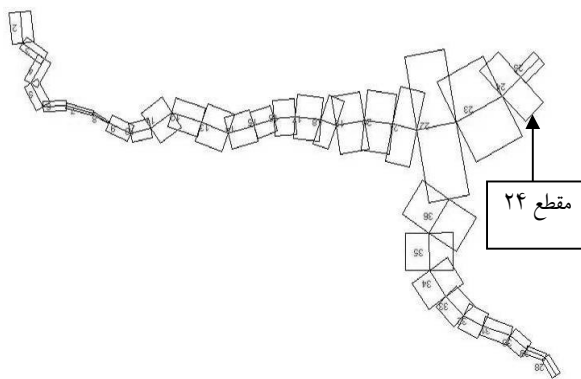
مقادیر میانگین درصد خطای مطلق، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین مدل کالیبره شده در تخمین تراز سطح آب به ترتیب برابر با  $R^2=0.99$ ،  $RMSE=1.15$ ،  $MPAE^4=0.37\%$  و در تخمین دما برابر با  $RMSE=0.39$ ،  $MPAE=3.1\%$  و  $R^2=0.88$  می‌باشند. نتایج بیانگر دقت مناسب مرحله کالیبراسیون است.

##### ۴-۲- صحت سنجی مدل

از داده‌های مربوط به ۸۵/۱/۲۰ تا ۸۵/۷/۱۶ برای صحت سنجی مدل استفاده شد. نتایج آماری مرحله صحت سنجی تراز مخزن سد به صورت  $R^2=0.994$ ،  $RMSE=0.9$ ،  $MPAE=0.3\%$  بود. شکل ۳ تراز سطح آب مخزن را در دوره

در اولین قدم، هندسه مخزن مورد کالیبراسیون قرار گرفت و هندسه مناسبی از مخزن برآورد شد. در ادامه، با استفاده از داده‌های خردادماه ۱۳۸۴ تا فروردین ۱۳۸۵، تراز و دمای مخزن سد سپیدرود مورد کالیبراسیون قرار گرفت. به منظور کالیبراسیون مدل، ابتدا آنالیز حساسیت روی پارامترهای مدل انجام شد و سپس پارامترهایی که تأثیر زیادی روی خروجی مدل دارند، مشخص شدند و عملیات کالیبراسیون روی آن پارامترها انجام شد. مدل کالیبره شده با استفاده از داده‌های فروردین تا مهرماه ۱۳۸۵، صحت سنجی شد. در نهایت با استفاده از مدل، به بررسی نقش و اثر عوامل مؤثر بر لایه بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود پرداخته شد و پارامترهای مؤثر در محو لایه بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود تعیین شدند.

ورودی‌های مورد نیاز مدل برای انجام شبیه‌سازی‌های مذکور، شامل اطلاعات هندسه مخزن، اطلاعات هواشناسی، شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل بود. هندسه مخزن سد سپیدرود دارای یک شکل دوشاخه‌ای است که به ۳۷ مقطع طولی در سطح هر مقطع طولی به لایه‌هایی به ارتفاع یک متر تقسیم شده است (شکل ۲).



شکل ۲- نمایشی از پلان شبکه بندی مخزن سد سپیدرود (صفحه X-Y)

داده‌های هواشناسی استفاده شده در این تحقیق، شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت و جهت باد، فشاربخار و پوشش ابر بودند که از ایستگاه هواشناسی منجیل دریافت شدند. داده‌های شرایط اولیه مدل شامل مقادیر تراز و پروفیل دمایی اولیه مخزن سد بود. داده‌های شرایط مرزی مدل شامل دبی و دمای آب خروجی مخزن سد و همچنین دبی و دمای آب ورودی به مخزن از طریق رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود بود که داده‌های دبی ورودی از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری و داده‌های دمای آب ورودی از رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود از ایستگاه‌های GSW2 و SSW2 دریافت شد (شکل ۱).

<sup>1</sup> Extinction Coefficients

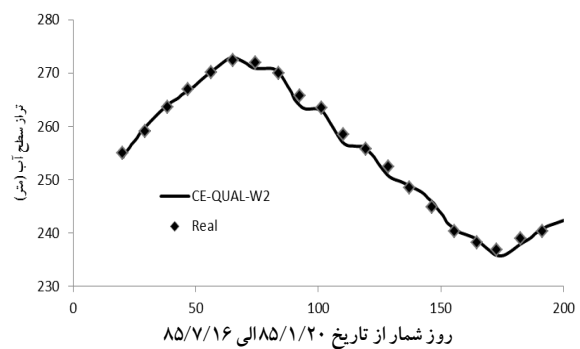
<sup>2</sup> Wind Sheltering Coefficient, WSC

<sup>3</sup> Shading Coefficient, shd

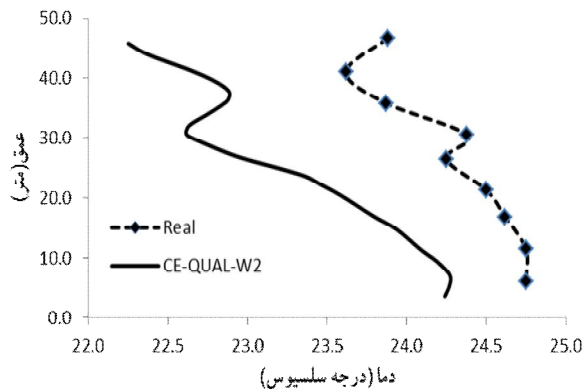
<sup>4</sup> Mean Percent of Absolute Error

صحت سنجی در دو حالت مشاهداتی و مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. شکل ۴ نتایج صحت‌سنجی دمای مخزن سد سپیدرود را برای مقطع ۲۴ در تاریخ ۸۵/۴/۱۸ نشان می‌دهد. نتایج آماری خطاها و ضریب تعیین مدل دما به صورت  $R^2=0.85$ ,  $RMSE=0.54$ ,  $MPAE=3.6\%$  بود. نتایج نشان می‌دهد که مدل به نحو مناسبی دما و تراز سطح آب مخزن را شبیه‌سازی نموده است.

در مورد مدل‌سازی دما، نتایج و مشاهدات نشان می‌دهد که در طول سال، تغییرات دمای آب مخزن در عمق بسیار ناچیز بوده و لایه‌بندی حرارتی وجود ندارد و به عبارت دیگر، مخزن سد سپیدرود جزء مخازن اختلاط کامل است.



شکل ۳- مقایسه تراز سطح آب واقعی و محاسبه شده توسط مدل در دوره صحت سنجی



شکل ۴- نتایج صحت‌سنجی دمای آب مخزن سد سپیدرود در مقطع شماره ۲۴ در تاریخ ۸۵/۴/۱۸

### ۳-۴- بررسی عوامل مؤثر بر محو لایه‌بندی حرارتی

در این مطالعه، عوامل محو لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۴-۳-۱- اثر سرعت باد

سرعت باد در کلیه زمان‌ها به صورت ساختگی به مقدار صفر تغییر یافت و محدوده مخزن سد فاقد هر گونه وزش باد در نظر گرفته شد. در این شرایط نتایج حاکی از وجود لایه‌بندی شدید حرارتی در مخزن سد مورد مطالعه بود.

### ۴-۳-۲- بررسی اثر دمای هوا

به منظور بررسی میزان حساسیت مدل نسبت به دمای هوا، سری زمانی دمای هوای موجود در فایل ورودی مربوطه، به اندازه ۱۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و به مدل اعمال شد. نتایج حاکی از عدم حساسیت مدل به افزایش دمای هوای محیط بر ایجاد لایه‌بندی حرارتی بود، در حالی که در افزایش دمای مخزن نقش چشمگیری دارد. از جمله دلایل آن می‌توان به وزش باد شدید در منطقه مورد نظر اشاره کرد که تأثیرات آن توانسته بر اثرات ناشی از افزایش دمای هوا غالب شود.

### ۴-۳-۳- بررسی اثر دمای آب ورودی

برای بررسی میزان تأثیر دمای آب ورودی، این شرط مرزی در هر دو شاخه ورودی به میزان ۱۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. هرچند افزایش دمای آب باعث بروز لایه‌بندی حرارتی در مقاطع بالادست مخزن سد شد اما به سمت پایین دست، از شدت لایه‌بندی کاسته شد.

### ۴-۳-۴- بررسی ارتفاع تراز سطح آب خروجی

یکی دیگر از عوامل مؤثر در اختلاط مخزن، تراز آب خروجی است. به منظور ارزیابی اثر این عامل، رقوم تخلیه‌کننده نیمه عمقی به میزان ۲۰ متر به پایین انتقال یافت و مدل برای این وضعیت اجرا شد. نتایج نشان داد که ارتفاع تراز تخلیه آب مخزن در ایجاد لایه‌بندی تأثیر بسزایی ندارد اگرچه این عامل در مخازن لایه‌بندی شده نقش بسزایی در لایه‌بندی و دمای کل مخزن دارد.

### ۴-۳-۵- بررسی اثر زمان ماند

به منظور بررسی اثر زمان ماند بر لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد سپیدرود، زمان ماند در مدل به میزان ۲۰ درصد افزایش داده شد و خروجی مدل، لایه‌بندی شدید حرارتی را در مخزن نشان داد. پس زمان ماند کوتاه مخزن سد سپیدرود از عوامل مهم در عدم ایجاد لایه‌بندی حرارتی است.

### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر است:

۱- مدل CE-QUAL-W2 توانست مدل‌سازی تراز سطح آب و دمای مخزن را به‌طور مناسبی انجام دهد به نحوی که خطای شبیه‌سازی تراز سطح آب و دمای مخزن به ترتیب توسط این مدل حدود ۰/۳ و ۳/۶ درصد بود.

۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی مخزن سد سپید رود حاکی از عدم وجود لایه‌بندی در مخزن است و این مخزن جزء مخازن با اختلاط کامل محسوب می‌شود. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عوامل در عدم وجود لایه‌بندی حرارتی مخزن سد سپیدرود،

سرعت بالای باد و زمان ماند کوتاه آن است.  
۳- افزایش دمای آب ورودی در سرشاخه‌ها، می‌تواند باعث ایجاد لایه‌بندی نسبی به خصوص در بالادست مخزن شود. هر چند در خود مخزن سد و المان‌های نزدیک به مخزن سد، لایه‌بندی حرارتی به وجود نمی‌آید.  
۴- افزایش دمای هوای محیط و تغییر رقوم بهره‌برداری از مخزن در ایجاد لایه‌بندی، کم اثر بود.

## ۶- مراجع

1. Henderson, B. (1988). "Sensitivity of thermal stratification models to changing boundary conditions." *J. Applied Mathematical Modeling*, 12(1), 31-43.
2. Owens, E., Effler, S., and Trama, F. (1986). "Variability in thermal stratification in a reservoir." *J. American Water Resources Association*, 22(2), 219-227.
3. Orlob, G. T., and Selna, L. G. (1970). "Temperature variation in deep reservoirs." *J. Hydraul.*, 96, 391-410.
4. Stefan, H., and Ford, D. (1975). "Temperature dynamic in Dimictic lakes." *J. Hydraul.*, 101(1), 97-114.
5. Huber, W. C., Harleman, D. R. F., and Ryan P. J. (1972). "Temperature predication in stratified reservoirs." *J. Hydraul.*, 98(2), 645-666.
6. Balistreri, L., Tempel, R.N., Stillings, L., and Shevenell, L. (2006). "Modeling spatial and temporal variations in temperature and salinity during stratification and overturn in Dexter Pit Lake, Tuscarora, Nevada, USA." *Applied Geochemistry*, 21(7), 1184-1203.
7. Han, P., Armengol, J., Garcia, C.J., Comerma, M., Roura, M., Dolz, J., and Straskraba, M. (2000) "The thermal structure of Sau reservoir (NE: Spain): A simulation approach." *Ecological Modelling*, 125(2-3), 109-122.
8. Gal, G., Imberger, J., Zohary, T., Antenucci, J., Anis, A., and Rosenberg, T. (2003) "Simulating the thermal dynamics of Lake Kinneret." *Ecological Modelling*, 162(1-2), 69-86.
9. Water Quality Research Group. (2009). "CE-QUAL-W2: Model description." <<http://www.cee.pdx.edu/w2>> (May 2011).
10. Martin, J. L. (1987) *Application of two-dimensional model of hydrodynamics and water quality (CE-QUAL-W2) TO Degrey Lake, Arkansas*, Technical Report E-87-1, US. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
11. Champan, R. S., and Cole, T. M. (1992) "Improved thermal predictions in CE-QUAL-W2." *Proceedings of the Hydraulic Engineering Sessions at Water Forum 92*, Baltimore, Maryland, August 2-6.
12. Gunduz, O., Soyupak, S., and Yurteri, C. (1998). "Development of water quality management strategies for the proposed Isikli reservoir." *J. Water. Sci. Tech.*, 37(2), 369-376.
13. Martin, J., Hesterlee, C., and Cole, T. (1999). "Two-dimensional water quality modeling using CE-QUAL-W2 on selected reservoirs." *Water Resources Conference*, University of Georgia.
14. Batick, B. M. (2011). "Modeling temperature and dissolve oxygen in the Cheatham reservoir with CE-QUAL-W2." M.Sc. Thesis, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA.

15. Arhami, M., Tajrishy, M., and Abrishamchi, A. (2003). "Simulation study of water quality variation in Latian reservoir." *J. of Water and Wastewater*, 44, 2-14. (In Persian)
16. Sarang, A., Tajrishy, M., and Abrishamchi, A. (2001). "Bookan dam reservoir quality simulaton." *J. of Water and Wastewater*, 37, 2-15. (In Persian)
17. Khayammi, M., Danesh, S., Khodashenas, S., and Davari, K. (2009). "Simulation of water quality in dam's basin case study- Torogh dam basim." *J. of Water and Soil*, 23 (1), 17-29. (In Persian)
18. Afshar, A., and Saadatpour, M. (2009). "Europhication in dam's reservoirs, 2-D modeling of karkhe reservoir." *J. of Water and Wastewater*, 71, 80-93. (In Persian)
19. Nazariha, M., Danay, E., Hashemi, S.H., and Izad-Doustadar, A.H. (2010). "Prediction of thermal stratification in proposed Bakhtyari reservoir with CE-QUAL-W2." *J. of Environmental Studies*, 36 (54), 11-18. (In Persian)