

بهینه‌سازی چندهدفه برداشت انتخابی از آبگیر مخازن در شرایط بروز بحران با در نظر گرفتن دمای زیست‌محیطی و ملاحظات کیفی (مطالعه موردی مخزن امیرکبیر)

مسعود امیرخانی^{۱*}، امید بزرگ‌حداد^۲، حسینعلی حسینی‌ها^۳ و امین سلطانی^۴

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
m.amirkhani12@ut.ac.ir

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

^۴ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۸

چکیده

وجود مخازن باعث به هم خوردن تعادل دمایی زیست‌محیطی رودخانه می‌شوند. از سوی دیگر مخازن در معرض ورود آلاینده‌هایی مانند مواد جامد محلول می‌باشند که هنگام سیلاب وارد مخزن می‌شوند. در این تحقیق برداشت آب از دو تراز و تأثیر آن بر کیفیت آب خروجی در اثر بروز یک آلودگی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین دبی خروجی در شرایطی برای هر تراز انتخاب گردید که در مجموع کم‌ترین میزان مواد جامد محلول از مخزن خارج شده و اختلاف دمایی آب ورودی به مخزن با آب خروجی از آن به کم‌ترین مقدار خود برسد. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از دو تراز خروجی مختلف در شرایط آلودگی، باعث بهبود مقادیر توابع هدف نسبت به حالت استفاده از یک تراز خروجی می‌شود. به طور مثال به کارگیری دو تراز خروجی در فصل بهار می‌تواند ۱۱/۸۱ درصد مقدار کل آلودگی خروجی از مخزن و ۴/۰۲ درصد اختلاف بین دمای ورودی و خروجی از آن را کاهش دهد.

کلید واژه‌ها: مواد جامد محلول، تراز برداشت، توابع هدف، اختلاف دمای ورودی و خروجی.

Multi-Objective Optimization of Selective Water Withdrawal from Reservoirs in Terms of Crisis Considering Environmental Temperature and Quality Remarks (Case Study: Amirkabir Dam)

M. Amirkhani^{1*}, O.Bozorg Haddad², H.A. Hassaniha³ and A. Soltani⁴

^{1*} - M. Sc. Student of Water Resources Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

² - Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

³ - Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

⁴ - M. Sc. Student of Hydraulic Structures Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 9 September 2014

Accepted: 31 December 2014

Abstract

The use of water reservoirs causes imbalance in water temperature in rivers. Furthermore water reservoirs are always in danger of contamination by different types of pollution such as TDS especially during floods. This paper presents the effect of water withdrawal from two different levels on the quality of the output water in terms of pollution. Furthermore the best amount of discharge is selected for each level in order to minimize the amount of TDS (exiting the reservoir) and Temperature difference between inlet and outlet water. Results indicated that the use of two different output levels in terms of pollution Improves the objective function value compared to the use of a single output level. For example the application of two different output levels in spring can reduce the amount of pollution as much as 11.81%. In addition difference between inlet and outlet temperature was seen to decrease as much as 4.02%.

Keywords: TDS, Withdrawal level, Objective functions, Difference between inlet and outlet temperature.

مقدمه

دمای آب یکی از مهمترین پارامترهای زیست‌محیطی است که به طور قابل توجهی بر رشد و بقای گونه‌های موجود در زیست بومها تأثیرگذار است (برون و همکاران^۱، ۲۰۰۴؛ بگون و همکاران^۲، ۲۰۰۶؛ کلارک^۳، ۲۰۰۶). برای مثال ماهی آزاد اقیانوس اطلس قبل از مرحله خروج از تخم تنها قادر است دمای ۱۶ الی ۲۲ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند و با افزایش دما درصد وزنی زرده تخم^۴ این ماهی کاهش می‌یابد (اچانکورن و همکاران^۵، ۱۹۹۹). همچنین بیش‌ترین افزایش وزن گونه‌ای از گربه‌ماهی پرورشی نیز به دما و اکسیژن محلول در آب وابسته می‌باشد به طوری که دمای ۲۷/۱۸ درجه سانتی‌گراد بهترین دما برای رشد این گونه ماهی می‌باشد (بونتلو و همکاران^۶، ۲۰۰۰). به این ترتیب تغییرات درجه حرارت، چرخه زندگی بسیاری از گونه‌های بومی را در معرض خطر قرار می‌دهد. لسارد و هیس^۷ (۲۰۰۳) تغییرات دمایی مربوط به ده رودخانه را در شبه جزیره‌ای در نزدیکی میشیگان^۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش دما از یک درجه سانتی‌گراد به بیش از پنج درجه سانتی‌گراد در تابستان، غذای گونه‌های از ماهی‌ها را افزایش داده و در عوض باعث کاهش جمعیت قزل‌آلای قهوه‌ای و بروک^۹ شده است. از بین رفتن یک گونه به ظاهر کم اهمیت در یک شبکه غذایی، همه جاندارانی که برای بقای خود به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به آن وابسته‌اند را تحت تأثیر قرار خواهد داد. با توجه به این موضوع می‌توان به اهمیت تعادل دمایی در زیست بومها پی برد (دسونی^{۱۰}، ۲۰۰۹).

مخازن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب مصرفی بشر باعث بر هم خوردن تعادل دمایی می‌شوند و علاوه بر این که مانعی برای مهاجرت ماهیان به قسمت بالادست رودخانه به حساب می‌آیند، باعث تغییر دمای آب پایین‌دست نیز شده و حیات گونه‌های بومی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پریس و جونز^{۱۱} (۲۰۰۲) نشان دادند که لایه‌بندی حرارتی مخزن کیت^{۱۲} در استرالیا باعث تغییرات دمایی در طول رودخانه ناموی^{۱۳} شده و این

موضوع تولید مثل ماهیان را دچار اختلال کرده است. الچی^{۱۴} (۲۰۰۸) اثر لایه‌های حرارتی را بر روی کیفیت آب مخزن تاhtالی^{۱۵} در ترکیه با مشاهده میدانی و تجزیه و تحلیل آماری مورد بررسی قرار داد. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که دمای هوا، سرعت باد و رطوبت هوا پارامترهایی هستند که در لایه‌بندی حرارتی و به تبع آن بر روی کیفیت آب مخزن تأثیرگذار می‌باشند. ۳۰ گونه از ۴۷ گونه ماهیان تجاری در رودخانه نیل به همین دلیل منقرض شده و یا به‌صورت جدی در معرض انقراض قرار دارند (دسونی، ۲۰۰۹). هستر و دوایل^{۱۶} (۲۰۱۱) اثرگذاری عوامل انسانی بر روی تغییرات دمایی آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند مخازن می‌توانند تا ده درجه سانتی‌گراد باعث تغییر در دمای آب رودخانه شوند و همچنین نشان دادند که ماهی‌ها نسبت به بی‌مهرگان به این تغییرات دمایی حساس‌تر می‌باشند.

از سوی دیگر مخازن به دلیل اهدافی مانند کنترل سیلاب بیش‌تر در معرض ورود آلاینده قرار دارند و این موضوع نشان دهنده این است که علاوه بر مدیریت برای کاهش تأثیر زیست‌محیطی مخازن، توجه به بهبود کیفیت آب خروجی نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به این موضوع که سیلاب‌ها می‌توانند آلاینده‌هایی از نوع مواد جامد محلول^{۱۷} (TDS) را با حجم زیاد و در زمان کوتاه وارد مخازن کنند، برای مدیریت کیفیت و کاهش تغییرات دمایی مخازن نیاز به شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی می‌باشد. در ادامه به بررسی پژوهش‌هایی پرداخته می‌شود که در آنها یک مدل مناسب که توانایی شبیه سازی مواد جامد محلول را دارد، استفاده شده باشد.

رستم افشار و همکاران (۱۳۸۵) از مدل دو بُعدی گروه مهندسیین مدل‌سازی کیفی آب^{۱۸} (CE-QUAL-W2) برای شبیه‌سازی ورود مواد جامد محلول استفاده کردند. ورود مواد جامد محلول به مدت یک و هفت روز به سد کرخه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که وجود چنین شرایطی می‌تواند باعث ایجاد بحران‌هایی برای کیفیت آب خروجی شود.

اعتماد-شهیدی و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی بیشینه بار روزانه مواد جامد محلول موجود در مخزن کرخه پرداختند. برای شبیه‌سازی به کمک داده‌های دما و مواد جامد محلول (طی دو سال) از مدل CE-QUAL-W2 استفاده شد و خطای میانگین مطلق^{۱۹} این مدل ۰/۷۱ بود. همچنین از این مدل برای شبیه سازی کیفیت آب در سناریوهای مختلف (غلظت‌های مختلف مواد

- 1 -Brown *et al.*
- 2 -Begon *et al.*
- 3 -Clarke
- 4- York in Eggs
- 5 -Ojanguren *et al.*
- 6 Buentello *et al.*
- 7 Lessard and Hayes
- 8 Michigan
- 9 Brook
- 10 Desonie
- 11 Preece and Jones
- 12 Keepit
- 13- Namoi

14- Elçi

15- Tahtali

16- Hester and Doyle

17- Total Dissolved Solids

18- Corps of Engineers Water Quality Modeling (2-D)

19- Absolute Mean Error

پرتو^{۱۱} تولید می‌کنند که این جواب‌ها نسبت به یکدیگر هیچ برتری ندارند و تنها با در نظر گرفتن میزان اهمیت هر کدام از اهداف می‌توان از هر یک از جواب‌ها استفاده کرد. در تحقیق حاضر، برای بهینه‌سازی از نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^{۱۲} (NSGA-II) که توسط دب و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۲) معرفی شد، استفاده گردید. این الگوریتم در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شده که در زیر به بعضی از آنها اشاره می‌شود.

کیم و هیو^{۱۴} (۲۰۰۶) از نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای حل مسئله بهره‌برداری از مخزن با اهداف چندگانه کنترل سیلاب، تأمین نیاز کشاورزی، صنعت و تولید انرژی برق آبی مربوط به سامانه چهارمخزنه در بخش میانی پنینسولا^{۱۵} استفاده کردند. مقایسه بین رهاسازی‌های روش بهینه‌سازی و آمار تاریخی، نشان داد که رویکرد بهره‌برداری بهینه حاصل از روش نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب، امکان تأمین نیازهای آبی پایین‌دست بیش‌تری را نسبت به حالت بهره‌برداری مورد استفاده در گذشته داشت. چانگ و چانگ^{۱۶} (۲۰۰۹) از نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای یافتن جواب‌های بهینه بهره‌برداری از یک سامانه دومخزنه موازی چندهدفه در تایوان استفاده کردند. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی بهره‌برداری با تابع هدف کمینه کردن ضریب کمبود در اثر فعالیت هم‌زمان هر دو مخزن بود. نتایج حاصل از این پژوهش توانایی NSGAII را در تولید جبهه پرتو مناسب نشان دادند.

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهند که وجود لایه‌بندی حرارتی در مخازن دمای آب پایین‌دست را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد که باعث به خطر افتادن زیست‌بوم منطقه می‌شود و همچنین موجب تغییر کیفیت آب در اعماق مختلف آن می‌گردد. با توجه به این موضوع که تراز برداشت آب در کیفیت و دمای آب خروجی از مخزن مؤثر می‌باشد، می‌توان با برداشت معین از ترازهای مختلف مخزن کیفیت آب خروجی را بهبود بخشید و همچنین باعث کاهش تغییرات دمایی و به تبع آن کاهش تأثیر زیست‌محیطی در پایین‌دست مخزن شد. از مدل CE-QUAL-W2 نیز می‌توان به‌عنوان مدلی کارآمد برای شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخازن استفاده کرد.

در این تحقیق، مواد جامد محلول به‌عنوان آلاینده ورودی به مخزن امیرکبیر (کرج، ایران) در نظر گرفته شده که در چهار سناریوی زمانی (چهار فصل مختلف)، مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی این آلاینده در مخزن مورد استفاده قرار گرفت. از سوی دیگر وجود ابزاری مناسب که توانایی ارزیابی و انتخاب

جامد محلول)، استفاده شد. نتایج نشان دادند برای این که غلظت مواد جامد محلول داخل مخزن به حد مجاز برسد باید ورود این آلاینده به میزان ۵۰ درصد کاهش یابد.

رانگل-پرازا و همکاران^۱ (۲۰۱۲) به بررسی لایه‌بندی حرارتی و میزان غلظت اکسیژن محلول^۲ (DO) و مواد جامد محلول در مخزن اگوامیلپا^۳ در یک منطقه گرمسیری در مکزیک پرداختند. مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی تغییرات دمایی واسنجی شده با داده‌های از ژوئن ۲۰۰۸ تا ژوئن ۲۰۰۹ مورد استفاده قرار گرفت. نیم‌رخ‌های دما-عمق^۴، لایه‌بندی قوی حرارتی را در قسمت‌های عمیق مخزن نشان دادند. نیم‌رخ‌های غلظت اکسیژن محلول نیز، کمبود اکسیژن^۵ را در قسمت‌های عمیق مخزن نشان دادند که با توجه به نوع پوشش گیاهی و تجزیه مواد آلی از طریق فرسایش خاک قابل توجیه است. نتایج نشان دادند که مدل CE-QUAL-W2 به درک بهتر مدیران منابع آب از پویایی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی آب در جهت ارائه راه‌کارهای مدیریتی برای حفظ و بهبود کیفیت آب مخزن کمک کرده است.

با توجه به وجود لایه‌بندی حرارتی، برداشت انتخابی از ترازهای مختلف می‌تواند روشی تأثیرگذار در کیفیت و دمای آب خروجی از مخازن باشد. در زمینه بررسی این تأثیرات ناندالال و بوگاردی^۶ (۱۹۹۵) از مدل شبیه‌سازی دینامیکی مخزن^۷ (DYRESM) و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی^۸ (NLP) برای تعیین محل مناسب خروجی از مخزن استفاده کردند. در تحقیق آنها، کیفیت آب خروجی از مخزن به‌صورت قیدی^۹ وارد مسأله شد. این مدل در تدوین سیاست بهره‌برداری از سد رئیس علی دلواری^{۱۰} به‌کار گرفته شد که با بیشینه کاهش حدود ۱۰ درصدی شوری آب در فصل تابستان، وزن نمک موجود در مخزن، به‌دلیل شستشوی مخزن، هفت درصد کاهش یافت. همچنین علی‌حمزه (۱۳۸۹) آلودگی بیولوژیکی ناگهانی وارد شده به مخزن را مورد بررسی قرار داد و تأثیر برداشت آب از لایه‌های مختلف مخزن در شرایط وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن بر روی کیفیت آب را نتیجه‌گیری نمود.

با توجه به وجود اهداف کاهش تغییرات دمای زیست‌محیطی و همچنین کاهش تبعات کیفی با استفاده از برداشت انتخابی، نیاز به محاسبه خروجی بهینه از ترازهای مختلف به‌وسیله الگوریتم‌های بهینه‌ساز چندهدفه می‌باشد. الگوریتم‌های بهینه‌ساز چندهدفه مجموعه جواب‌هایی را تحت عنوان جواب‌های بهینه

- 1- Rangel-Peraza *et al.*
- 2- Dissolved Oxygen
- 3- Aguamilpa
- 4- Temperature-Depth Profile
- 5- Anoxia
- 6- Nandalal and Bogardi
- 7- Dynamic Reservoir Simulation Model
- 8- Non-Linear Programming
- 9- Constraint
- 10- Rais Ali Dilavari Dam

- 11- Pareto
- 12- Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
- 13- Deb *et al.*
- 14- Kim and Heo
- 15- Peninsula
- 16- Chang and Chang

روابط فوق به ترتیب روابط منتم افقی، منتم عمودی، پیوستگی، حالت، هیدرواستاتیک و پیوستگی آلودگی هستند. و در این روابط، η : رقوم سطح آزاد آب؛ U و W : میانگین عرضی سرعت به ترتیب در جهات طولی و عمودی؛ B : عرض حجم کنترل؛ τ : تنش؛ α : شیب کف رودخانه؛ q : جمع جبری نفوذ از دیواره حجم کنترل؛ T_w : دمای آب؛ ϕ : غلظت آلاینده مورد نظر که در رابطه (۴) اندیس SS و TDS به ترتیب مواد جامد معلق و محلول را نشان می‌دهند؛ D_x و D_z : به ترتیب ضریب پخشیدگی گرما و آلودگی به ترتیب در جهات طولی و عمودی؛ q_ϕ : مقدار آلاینده ورودی یا خروجی از طریق نفوذ؛ S_ϕ : مقدار ورودی یا خروجی آلودگی‌های دیگر از آب را نشان می‌دهند.

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + q B U_x \quad (1)$$

$$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial z} = q B \quad (3)$$

$$\rho = f(T_w, \phi_{TDS}, \phi_{SS}) \quad (4)$$

$$B \eta \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h U B dz - \int_{\eta}^h q B dz \quad (5)$$

$$\frac{\partial B \phi}{\partial t} + \frac{\partial U B \phi}{\partial x} + \frac{\partial W B \phi}{\partial z} - \frac{\partial (B D_x \frac{\partial \phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (B D_z \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} = q_\phi B + S_\phi B \quad (6)$$

دما و کیفیت آب خروجی

برای محاسبه میانگین دمای آب خروجی از دو تراز مخزن، طبق رابطه (۷) از میانگین وزنی دما در هر تراز استفاده شد که اساس این رابطه، تبادل گرمایی اجسامی است که با دمای مختلف در مجاورت هم قرار می‌گیرند و به اصطلاح به دمای تعادل می‌رسند:

$$\bar{T} = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} = \frac{Q_1 T_1 + Q_2 T_2}{Q_1 + Q_2} \quad (7)$$

گزینه مدیریتی بهینه براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده را داشته باشد، بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو در تحقیق حاضر، دبی خروجی از هر تراز با اهداف کاهش غلظت آلاینده خروجی از مخزن در هر دوره زمانی و کاهش مجموع اختلافات دمایی بین ورودی به مخزن و خروجی از آن به کمک نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به دست می‌آید.

مواد و روش‌ها

در این قسمت ابتدا مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2، ویژگی‌ها و علت انتخاب آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به نحوه محاسبه دمای میانگین و مقدار آلاینده خروجی پرداخته می‌شود.

مدل شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخزن

مدل CE-QUAL-W2 یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی آلودگی در عمق و طول می‌باشد (کول و ولس^۱، ۲۰۰۶). این مدل مقطع عرضی را به صورت همگن فرض می‌کند. به این علت برای شبیه‌سازی پهنه‌های آبی باریک که دارای تغییرات عرضی آلودگی کمی هستند، مفید است. از جمله ویژگی‌های این نرم‌افزار که می‌توان به آن اشاره کرد، انجام شبیه‌سازی حرارتی مخزن به‌طور کارآمد و با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی، مانند تابش، سرعت باد و غیره که باعث افزایش دقت شبیه‌سازی می‌شوند، می‌باشد.

توانایی شبیه‌سازی سازه‌های تعبیه شده در مخازن نیز از جمله ویژگی‌های دیگر این مدل است که امکان شبیه‌سازی دما و غلظت آلاینده‌های خروجی از ترازها را فراهم می‌کند.

در مدل CE-EUAL-W2 برای شبیه‌سازی کیفیت آب مخازن معادله منتم عرضی در نظر گرفته نمی‌شود و از حل پنج معادله و پنج مجهول برای حل مدل هیدرودینامیک استفاده می‌شود. همچنین در این مدل مقادیر سرعت عرضی در نظر گرفته نمی‌شود و میانگین عرضی برای تغییرات پارامترهای دیگر در نظر گرفته می‌شود. لذا در تمامی معادله‌ها مقادیر مربوطه حذف می‌شوند. معادله‌ها باقی‌مانده عبارتند از: منتم طولی، منتم عمودی، پیوستگی، حالت^۲ و هیدرواستاتیک و مقادیر سرعت طولی، سرعت عمودی، چگالی، عمق و فشار در هر نقطه از محدوده حل، که مجهول‌هایی هستند که در یک دستگاه پنج معادله و پنج مجهول در نظر گرفته می‌شوند. همچنین مجهول غلظت آلاینده در هر نقطه از محدوده حل، نیز با افزودن معادله پیوستگی آلودگی محاسبه می‌شود. بنابراین روابط نهایی مورد استفاده در مدل CE-QUAL-W2 در روابط (۱) تا (۶) آورده شده‌اند:

1- Cole and Wells
2- Equation of State

مخزن را در نقاط و زمان‌های مشخص استخراج کردند (در تحقیق حاضر از نتایج واسنجی این مدل استفاده شده است).

فرضیه‌ها و محدودیت‌ها

در این تحقیق، آلاینده از نوع مواد جامد محلول با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر به مدت هفت روز در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب این آلاینده این است که مواد جامد محلول در میزان چگالی آب و در نتیجه در لایه‌بندی حرارتی موثر می‌باشد. وندل^۳ (۲۰۰۷) مقدار مواد جامد محلول مجاز در آب شیرین را ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اعلام کرد. آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) ایالات متحده بیش‌ترین مقدار مجاز این ماده در آب آشامیدنی را ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اعلام کرده است (بی نام، ۲۰۱۲). رابطه‌های (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده توابع هدف این پژوهش می‌باشند که دو جنبه زیست‌محیطی و کیفیت آب شرب در آنها مد نظر قرار گرفته است. تابع هدف اول [رابطه ۹] به صورت کمینه کردن میزان آلودگی خروجی از مخزن می‌باشد و تابع هدف دوم [رابطه ۱۰] کمینه کردن اختلاف دمایی بین آب ورودی به مخزن و آب خروجی از آن در نظر گرفته شد:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i=1}^n W_i \quad (9)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i=1}^n (T_{in} - \bar{T})_i^2 \quad (10)$$

در رابطه‌های (۹) و (۱۰)، i : شمارنده تعداد روز و n برابر با ۳۶۵ روز (یک سال) می‌باشد. در رابطه (۱۰) T_{in} : دمای آب ورودی به مخزن می‌باشد. برای بررسی تأثیر تراز برداشت در مقادیر توابع هدف علاوه بر تراز برداشت مخزن امیرکبیر (۱۶۶۰ متر بالاتر از سطح دریا)، تراز برداشت دیگری ۴۰ متر بالاتر از تراز واقعی مخزن (۱۷۰۰ متر بالاتر از سطح دریا) فرض شده است و دبی خروجی از این دو تراز برداشت با توابع هدف فوق بهینه شده است.

وضعیت سناریوها

چهار سناریوی در نظر گرفته شده در این تحقیق مربوط به زمان ورود آلاینده می‌باشند: ورود آلاینده در اواسط بهار (سناریوی اول)، تابستان (سناریوی دوم)، پاییز (سناریوی سوم) و زمستان (سناریوی چهارم).

که در رابطه (۱)، \bar{T} : میانگین وزنی دمای خروجی، T : دمای آب خروجی از هر تراز، m : جرم آب خروجی از هر تراز و Q : دبی خروجی از هر تراز می‌باشند.

مجموع آلاینده خروجی از دو تراز نیز طبق رابطه (۸) محاسبه شد که در این رابطه W : مجموع آلاینده خروجی و C : غلظت آلاینده خروجی از هر تراز می‌باشد.

$$W = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 \quad (8)$$

منطقه مطالعاتی، معیارها، اطلاعات و فرضه‌ها

در این بخش، ابتدا ویژگی‌های مخزن مورد مطالعه، اجزا و موقعیت مکانی آن شرح داده می‌شوند. سپس، معیارهای ارزیابی به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه، مشخصه‌های سناریوها، براساس زمان وقوع آلودگی، معرفی می‌شوند و پس از آن اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل CE-QUAL-W2، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت به بررسی فرضه‌ها و محدودیت‌های تحقیق پرداخته می‌شود.

مطالعه موردی

سد امیرکبیر در سال ۱۳۴۰ به بهره‌برداری رسید. هدف این سد جلوگیری از سیلاب و خسارت‌های ناشی از آن، تأمین آب شرب تهران و کشاورزی کرج و تولید انرژی برق‌آبی می‌باشد. سد امیرکبیر از نوع بتنی دو قوسی با بیشینه ارتفاع ۱۸۰ متر از پی، به ضخامت ۳۰ متر در کف و ۹ متر در تاج می‌باشد. بیشینه مساحت دریاچه مخزن معادل چهار کیلومتر مربع است. سد امیرکبیر در ۶۳ کیلومتری شمال غربی تهران و در کیلومتر ۲۳ جاده کرج-چالوس نزدیک روستای واریان با مساحت حوضه آبریزی معادل ۷۶۴ کیلومتر مربع و متوسط رواناب ۴۷۲ میلیون مترمکعب، واقع شده است. ساختگاه این سد بر روی رودخانه کرج می‌باشد. این رودخانه از رشته کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرد و در انتها به دریاچه نمک، واقع در نزدیکی شهر قم، وارد می‌شود. مشخصات خروجی سد امیرکبیر در جدول (۱) آورده شده است.

اطلاعات مدل‌سازی

برای ساده‌سازی مدل برای مورد مطالعاتی ابتدا باید پوشه هندسه مخزن ایجاد گردد. بدین منظور هندسه مخزن باید به صورت گسسته، از نقشه توپوگرافی با مقیاس (۱:۵۰۰۰) استخراج شود. واسنجی^۱ هیدرودینامیک مدل CE-QUAL-W2 توسط بزرگ‌حداد و همکاران^۲ (۲۰۱۵) صورت گرفت. آنها براساس نمونه‌برداری‌های انجام شده، پروفیل لایه‌بندی حرارتی

3 -Wendell

4- U.S. Environmental Protection Agency

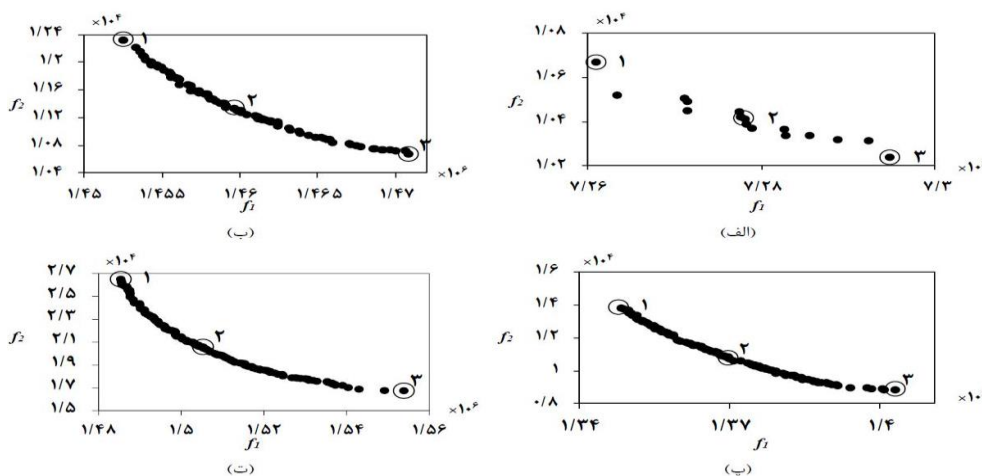
1 -Calibration

2 -Bozorg Haddad et al.

امیرخانی و همکاران: بهینه‌سازی چندهدفه برداشت انتخابی از آبگیر...

جدول ۱- مشخصات خروجی سد امیرکبیر

مشخصه	نوع/مقدار/تعداد
تعداد سرریز	۲
نوع سرریز	اوجی
تراز کف سرریز (متر از سطح دریا)	۱,۷۵۷
تراز تاج سرریز (متر از سطح دریا)	۱,۷۶۵
تعداد دریچه تخلیه رسوب	۱
تعداد دریچه خروجی آب	۳
تراز دریچه خروجی آب (متر از سطح دریا)	۱,۶۶۰
تراز آبگیری توربین (متر از سطح دریا)	۱,۷۰۰



شکل ۱- پرتوهای استخراج شده برای سناریوهای: (الف) اول، (ب) دوم، (پ) سوم و (ت) چهارم

انتزهایی پرتو می‌باشند که در ادامه به بررسی تغییرات توابع هدف در آنها پرداخته می‌شود. همچنین در شکل فوق پرتوها به خوبی نشان‌دهنده رفتار توابع هدف نسبت به یکدیگر می‌باشند که کاهش یکی از توابع هدف با افزایش تابع هدف دیگری همراه می‌باشد.

برای این که تأثیر هر تراز در میزان خروجی بهینه مشخص شود، نسبت خروجی هر یک از ترازها برای نقاط یک، دو و سه به خروجی کل محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) می‌توان پی برد که تراز ۱۷۰۰ تأثیر بیشتری در بهبود توابع هدف داشته است که مقدار خروجی از این تراز در شرایط بهینه به مراتب بیشتر از تراز ۱۶۶۰ می‌باشد. شکل (۲) و (۳) که به ترتیب سری زمانی دمای ورودی و دمای خروجی و سری زمانی مقادیر آلایندگی خروجی مربوط به نقطه یک پرتو در فصل بهار می‌باشند به خوبی نشان‌دهنده تأثیر هر تراز در خروجی بهینه را نشان می‌دهند. برای این که تغییرات دما و غلظت در شکل به خوبی مشخص شود، این شکل‌ها در یک بازه ۵۰ روزه و بین روزهای ۱۵۰ تا ۲۰۰ روز بعد از ورود آلودگی رسم شده‌اند.

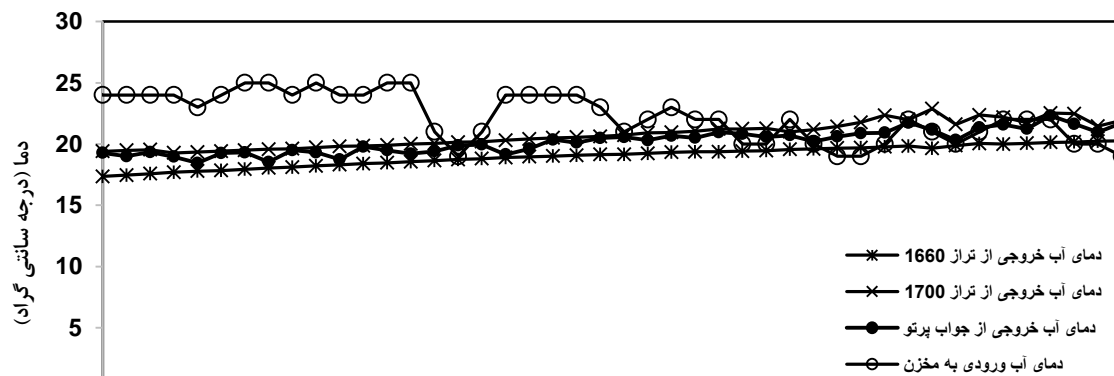
نتایج و بحث

مدل هندسه مخزن و سازه‌های مورد استفاده در آن، داده‌های هواشناسی و آب‌شناسی، میزان و نوع آلایندگی و محل ورود آن، ورودی مدل CE-QUAL-W2 به منظور محاسبه غلظت آلودگی و دمای آب خروجی در هر تراز می‌باشد. برای مشاهده تأثیر تغییرات فصلی آب و هوا در لایه‌بندی حرارتی و دمای آب ورودی و در نتیجه تأثیر آن در انتخاب بهینه خروجی از هر یک از ترازهای مخزن این تحقیق در چهار سناریوی زمانی برای ورود آلایندگی (چهار فصل مختلف) مورد بررسی قرار گرفت. بهینه خروجی با در نظر گرفتن توابع هدف فوق، توسط نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب محاسبه شده است. از جمله پارامترهای الگوریتم می‌توان به تعداد جمعیت برابر با ۲۰۰، تعداد تکرار برابر با ۵۰۰، نرخ ترویج برابر با ۰/۸ و نرخ جهش برابر با ۰/۰۹ اشاره کرد. مجموعه جواب‌های پرتو^۱ برای چهار سناریو در شکل (۱) ارائه شده‌اند.

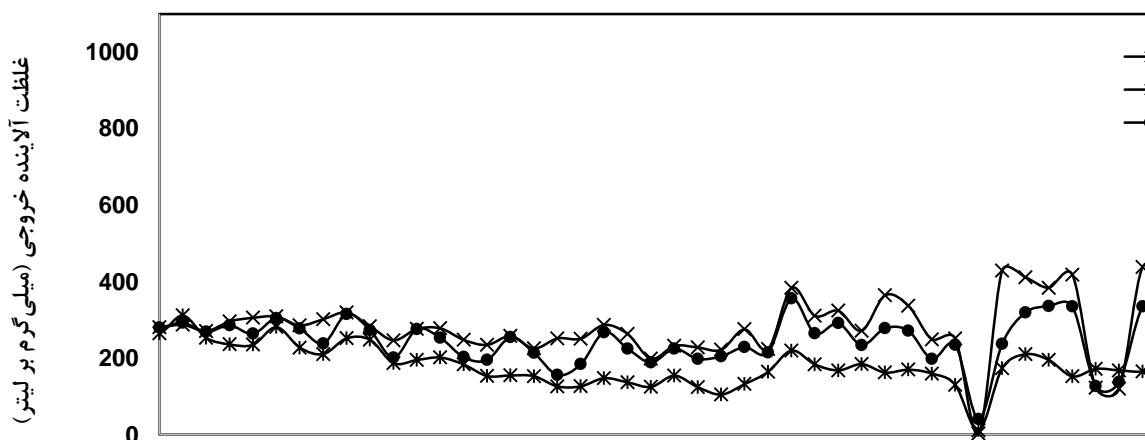
در شکل (۱) نقاط یک، دو و سه که در جواب‌های پرتو مربوط به هر سناریو مشخص شده‌اند به ترتیب نقاط ابتدایی، میانی و

جدول ۲- نسبت خروجی هر تراز به خروجی کل (درصد) در سه نقطه از پرتو برای چهار سناریوی زمانی

تراز آبخیز (متر از سطح دریا)		نقاط پرتو	
۱۷۰۰	۱۶۶۰		
۷۹/۵۹	۲۰/۴۱	یک	سناریوی اول
۸۰/۰۴	۱۹/۹۶	دو	
۸۰/۳۸	۱۹/۶۲	سه	
۶۳/۴۸	۳۶/۵۲	یک	سناریوی دوم
۶۶/۹۲	۳۳/۰۸	دو	
۶۸/۷۹	۳۱/۲۱	سه	
۶۱/۶۱	۳۸/۳۹	یک	سناریوی سوم
۶۹/۰۲	۳۰/۹۸	دو	
۷۴/۶۳	۲۵/۳۷	سه	
۶۲/۰۲	۳۷/۹۸	یک	سناریوی چهارم
۶۹/۷۰	۳۴/۳۰	دو	
۶۸/۸۱	۳۱/۱۹	سه	



شکل ۲- سری زمانی دمای ورودی و دمای خروجی مربوط به نقطه یک پرتو در فصل بهار



شکل ۳- سری زمانی مقادیر آلاینده خروجی مربوط به نقطه یک پرتو در فصل بهار

امیرخانی و همکاران: بهینه‌سازی چندهدفه برداشت انتخابی از آبگیر...

جدول ۳- مقایسه مقادیر تابع هدف در دو حالت برداشت آب از تراز ۱'۶۶۰ و دو تراز در یک نقطه از پرتو برای چهار سناریوی زمانی

نقاط پرتو	توابع هدف	تراز آبگیر (۱'۶۶۰ متر از سطح دریا)	دو تراز برداشت	بهبود تابع هدف (درصد)
یک	f_1	۲'۳۹۱	۲'۲۹۵	۴/۰۲
	f_2	۱'۶۸۱'۴۸۶	۱'۴۶۵'۱۲۴	۱۱/۸۱
دو	f_1	۲'۳۹۱	۲'۲۹۳	۴/۱۱
	f_2	۱'۶۶۱'۴۸۶	۱'۴۶۶'۲۶۹	۱۱/۷۵
سه	f_1	۲'۳۹۱	۲'۲۹۱	۴/۲۰
	f_2	۱'۶۶۱'۴۸۶	۱'۴۶۷'۱۷۹	۱۱/۶۹
یک	f_1	۳'۹۶۹	۳'۸۰۰	۴/۲۴
	f_2	۱'۶۴۹'۹۴۰	۱'۴۵۳'۶۵۳	۱۱/۹۰
دو	f_1	۳'۹۶۹	۳'۷۹۴	۴/۴۱
	f_2	۱'۶۴۹'۹۴۰	۱'۴۶۳'۷۲۳	۱۱/۲۸
سه	f_1	۳'۹۶۹	۳'۷۶۸	۴/۶۰
	f_2	۱'۶۴۹'۹۴۰	۱'۴۷۹'۸۱۶	۱۰/۳۱
یک	f_1	۴'۰۰۱	۳'۸۷۰	۳/۲۶
	f_2	۱'۵۴۴'۱۵۵	۱'۱۱۰'۹۱۰	۲۸/۰۶
دو	f_1	۴'۰۰۱	۳'۸۶۲	۳/۴۶
	f_2	۱'۵۴۴'۱۵۵	۱'۱۰۲'۵۵۶	۲۸/۰۶
سه	f_1	۴'۰۰۱	۳'۸۵۸	۳/۵۶
	f_2	۱'۵۴۴'۱۵۵	۱'۱۱۳'۳۸۴	۲۷/۹۰
یک	f_1	۱'۴۱۱	۱'۳۰۷	۷/۴۱
	f_2	۱'۶۸۸'۹۸۶	۱'۴۶۵'۵۴۲	۱۳/۲۲
دو	f_1	۱'۴۱۱	۱'۲۹۷	۸/۰۸
	f_2	۱'۶۸۸'۹۸۶	۱'۴۶۵'۸۷۳	۱۳/۲۰
سه	f_1	۱'۴۱۱	۱'۲۹۴	۸/۳۴
	f_2	۱'۶۸۸'۹۸۶	۱'۴۶۶'۱۲۲	۱۳/۱۹

نتیجه گیری

در این تحقیق، خروجی بهینه از دو تراز در هنگام بروز آلاینده تحت سناریوهای مختلف به صورت دو هدفه و با اهداف کمینه کردن میزان آلودگی خروجی از مخزن و کمینه کردن اختلاف دمایی بین آب ورودی و خروجی از مخزن، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی رفتار آلاینده در چهار سناریو (چهار فصل مختلف) توسط مدل CE-QUAL-W2 صورت گرفت و خروجی بهینه از هر کدام از ترازها توسط نسخه دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب محاسبه گردید. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که تراز فوقانی ۱'۷۰۰ متر بالاتر از سطح دریا سهم بیش‌تری را در کمینه کردن غلظت آب خروجی از مخزن و کاهش اختلاف دمایی آب ورودی از بالادست و آب خروجی از مخزن، داراست. به‌طور کلی استفاده از برداشت انتخابی باعث بهبود توابع هدف نسبت به حالت استفاده از تراز آبگیر ۱'۶۶۰ متر بالاتر از سطح دریا که تراز موجود فعلی در این مخزن می‌باشد، شده است. به‌طور مثال به

جدول (۲) نشان‌دهنده این موضوع است که تراز ۱'۷۰۰ در تمام سناریوها سهم بیش‌تری را در ایجاد شرایط بهینه دارا می‌باشد. شکل (۲) به‌عنوان مثال نشان‌دهنده این موضوع است که دمای خروجی بهینه در مجموع تطابق بیش‌تری با دمایی خروجی از تراز ۱'۷۰۰ را دارد. همچنین با توجه به شکل (۳) که نشان‌دهنده سری زمانی خروج مقدار آلاینده از هر تراز و مقدار آن در مجموع استفاده از دو تراز می‌باشد، می‌توان تطابق بیش‌تر مقدار خروجی بهینه را با خروجی از تراز ۱'۷۰۰ مشاهده کرد.

در ادامه مقادیر توابع هدف برای نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی پرتوهای مربوط به چهار سناریو محاسبه و با مقادیر توابع هدف در حالت استفاده از یک تراز مقایسه شد. با توجه به جدول (۳) می‌توان بهبود وضعیت در شرایط بروز بحران برای تبعات کیفی و دمایی زیست‌محیطی در هر چهار سناریو را مشاهده کرد.

مخازن در شرایطی که تأثیر لایه‌بندی حرارتی توسط مواردی چون هوادهی کاهش پیدا کرده است، پرداخت. همچنین به دلیل این که تراز ۱۷۰۰ متر بالاتر از سطح دریا در مخزن امیرکبیر تراز خروجی توربین برای تولید برق می‌باشد می‌توان در پژوهش‌های آینده، افزایش تولید انرژی برقی را به‌عنوان هدف دیگر مورد بررسی قرار داد و توان تولیدی را نیز به‌عنوان عامل محدود کننده خروجی از این تراز در نظر گرفت.

کارگیری دو تراز آبگیر در سناریوی اول می‌تواند تا ۱۱/۸۱ درصد مقدار کل آلودگی خروجی از مخزن و ۴/۰۲ درصد اختلاف بین دمای ورودی و خروجی از آن را کاهش دهد. این پژوهش نشان می‌دهد در صورت وجود چند تراز خروجی با ترازهای ارتفاعی متفاوت در مخازن می‌توان بدون کاهش میزان خروجی، کیفیت آب را بهبود بخشید و شرایط دمایی را به شرایط دمایی بالادست نزدیک کرد. با توجه به مطالعات اخیر در مورد از بین بردن لایه‌بندی حرارتی مخازن با هوادهی و موارد دیگر، می‌توان در پژوهش‌های بعدی به بررسی تأثیر برداشت از ترازهای مختلف

منابع

- ۱- رستم افشار، ن.، افشار، ع. و جلیلی، ن. ۱۳۸۵. پیش‌بینی رفتاری مدل تهیه عکس‌العمل سیستم رودخانه در مورد بار تصادفی آلاینده ورودی-مطالعه موردی رودخانه کرخه، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ۱۴-۱۵ شهریور، ۱۸۱-۱۹۰.
- ۲- علی حمزه، م.، (۱۳۸۹). مدیریت بهره‌برداری از مخازن در شرایط بحران کیفی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران.
- 3- Anonymous. 2012. 2012 Edition of the drinking water standards and health advisories, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington DC State, USA.
- 4- Begon, M., Townsend, C. R. and J. L. Harper. 2006. Ecology. Fourth edition, Blackwell Publishing, Malden, Massachusetts, USA.
- 5- Bozorg Haddad, O., Ashofteh, P.S., Ali-Hamzeh, M. and M. A. Marino. 2015. Investigation of reservoir qualitative behavior resulting from biological pollutant sudden entry. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 141(8), p.04015003.
- 6- Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M. and G. B. West. 2004. Toward a metabolic theory of ecology. Ecology, 85(7): 1771-1789.
- 7- Buentello, J. A., Gatlin III, D. M. and W. H. Neill. 2000. Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish. Aquaculture, 182(3): 339-352.
- 8- Chang, L. C. and F. J. Chang. 2009. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. Journal of Hydrology, 377(1-2): 12-20.
- 9- Clarke, A. 2006. Temperature and the metabolic theory of ecology. Functional Ecology, 20(2): 405-412.
- 10-Cole, M. T. and A. S. Wells. 2006. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.5, Washington DC State, U.S. Army Corps of Engineers.
- 11-Deb, K., Partap, A., Agarwal, S. and T. Meyarivan. 2002. Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions Evolutionary Computation, 6(2): 182-197.
- 12-Desonie, D. 2009. Hydrosphere: Freshwater systems and pollution. Infobase Publishing, New York, USA.
- 13-Elçi, Ş. 2008. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. Limnology, 9(2): 135-142.

امیرخانی و همکاران: بهینه‌سازی چندهدفه برداشت انتخابی از آبگیر...

- 14-Etemad-Shahidi, A., Afshar, A., Alikia, H., and H. Moshfeghi. 2009. Total dissolved solid modeling; Karkheh reservoir case example. *International Journal of Environmental Research*, 3(4): 671-680.
- 15-Hester, E. T. and M. W. Doyle. 2011. Human impacts to river temperature and their effects on biological processes: A quantitative synthesis. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3): 571-587.
- 16-Kim, T. and J. H. Heo. 2006. Application of multi-objective genetic algorithms to multi reservoir system optimization in the Han river basin. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(5): 371-380.
- 17-Lessard, J. L. and D. B. Hayes. 2003. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams, *River Research and Applications*, 19(7): 721-732.
- 18-Nandalal, K. D. W. and J. J. Bogardi. 1995. Reservoir management for improving river water quality. In *Proceeding of Water Resources Management under Drought or Water Storage Conditions*, Rotterdam, Holland, pp. 257-264.
- 19-Ojanguren, A. F., Reyes-Gavilán, F. G. and R. R. Muñoz. 1999. Effects of temperature on growth and efficiency of yolk utilisation in eggs and pre-feeding larval stages of Atlantic salmon. *Aquaculture International*, 7(2): 81-87.
- 20-Preece, R. M. and H. A. Jones. 2002. The effect of Keepit dam on the temperature regime of the Namoi river, Australia, *River Research and Applications*, 18(4): 397-414.
- 21-Rangel-Peraza, J. G., Obregon, O., Nelson, J., Williams, G. P., De Anda, J., González-Farías, F and J. Miller. 2012. Modelling approach for characterizing thermal stratification and assessing water quality for a large tropical reservoir, *Lakes and Reservoirs. Research and Management*, 17(2): 119-129.
- 22-Wendell, P. 2007. *Introduction to environmental engineering and science*, Third edition. Prentice Hall publishes, New Jersey, USA, ISBN: 978-0131481930