



Optimal Waste Load Model in Karoon River with the Pollution Loading Loss Analysis

B. Fakouri¹, J. Mohammad Vali Samani^{2*}, H. Mohammad Vali Samani³, and M. Mazaheri⁴

Abstract

The optimal management of pollutants discharged into the rivers plays a critical role in improving water quality. In this paper, a new method is developed for Cost-based waste-load allocation (C-WLA) modeling with trade-off between the cost of treatment at loading points and the loss of pollution at the points of withdrawal from the river system. For this purpose, the qualitative simulation model (MIKE11) is coupled with Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The model is applied to the Karoon River system. At the first step, the sum of treatment cost and loading damage of TDS pollutant was estimated in the river system. Then, with insights into the impacts of the trade-off policy between treatment cost of dischargers and pollutant load loss, optimal treatment percentages and optimal concentration threshold limit were determined in a monthly base and for one year. The results demonstrated that the C-WLA model has the good efficiency in managing the TDS pollutant, so that, the sum of the costs and losses is minimized at \$48.99 million with optimal concentration threshold limit of 2450 mg/l at the discharge points and with an average of 17.85% of the optimal treatment at the loading points.

Keywords: River System Loss, Optimal Load Pattern, Karoon River, Simulation Model, Optimization Algorithm.

Received: April 7, 2021

Accepted: November 7, 2021

مدل بهینه بار آلاینده در رودخانه کارون با تحلیل خسارت بارگذاری آلودگی

بهمن فکوری^۱، جمال محمدولی سامانی^{۲*}، حسین محمدولی سامانی^۳ و مهدی مظاهری^۴

چکیده

مدیریت تخلیه بار آلودگی به رودخانه‌ها نقش مهمی در بهبود کیفیت آب دارد. هدف این مقاله، ارائه روش جدید در مدل‌سازی تخصیص بار آلودگی مبتنی بر هزینه (C-WLA) با تعامل بین هزینه‌های تصفیه در نقاط بارگذاری و خسارت آلودگی در نقاط برداشت جریان از سیستم رودخانه است. برای این منظور، مدل شبیه‌سازی کیفی (MIKE11) با الگوریتم بهینه‌سازی هوش ازدحامی ذرات (PSO) ترکیب می‌شود و کاربرد عملیاتی این مدل‌سازی در بخشی از رودخانه کارون نشان داده شده است. در گام اول هزینه‌های تصفیه و خسارت بارگذاری آلاینده TDS در طول رودخانه برآورد شده و سپس با درک تأثیر سیاست تعامل بین هزینه تصفیه تخلیه‌کننده‌ها و خسارت بار آلودگی، الگوی بار بهینه و حد آستانه غلظت بهینه در نقاط کنترل سیستم رودخانه در طول یکسال به صورت ماهانه تعیین می‌شود. نتایج نشان داد که مدل C-WLA کارایی لازم برای مدیریت تخلیه آلاینده TDS و دستیابی به اهداف بهینه‌سازی در مدیریت کیفیت آب رودخانه را دارد. بطوری که مجموع هزینه‌ها و خسارت‌ها با حد آستانه غلظت بهینه ۲۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در نقاط برداشت جریان و با متوسط ۱۷/۸۵ درصد تصفیه بهینه در نقاط بارگذاری، حداقل شده و برابر ۴۸/۹۹ میلیون دلار بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: خسارت سیستم رودخانه، الگوی بار بهینه، رودخانه کارون، مدل شبیه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۶

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: bahman.fakoori@modares.ac.ir

2- Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: samani_j@modares.ac.ir

3- Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. Email: hossein.samani@gmail.com

4- Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: m.mazaheri@modares.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.19.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.19.4)

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.



بهبود بهره‌برداری از رودخانه‌ها از طریق تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در حوضه رودخانه‌ای دز توسعه دادند. در مدل آن‌ها آثار اقتصادی و زیست‌محیطی تخصیص آب و بار آلودگی برای بهره‌برداری از رودخانه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج مدل آن‌ها اثربخشی خوبی در تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه نشان داد. (Nikoo et al., 2014). یک مدل برنامه ریزی پویا تصادفی برای تخصیص آب و بار آلودگی در سیستم رودخانه-مخزن توسعه دادند. در مدل آن‌ها کارایی و کاربرد تکنیک‌های محاسبات نرم با رویکرد مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برای تعیین الگوی بار بهینه تخلیه‌کنندگان به رودخانه مقایسه شد و نتایج مدل پیشنهادی ارزیابی شده است. (Afshar et al., 2018). مدلی مبتنی بر اعتمادپذیری برای تخصیص بار آلودگی در سیستم رودخانه-مخزن ارائه دادند. در مدل آن‌ها الگوی بار بهینه ماهانه تحت شرایط عدم قطعیت در پارامترهای ورودی سیستم رودخانه تعیین و نتایج عملکرد مدل در سطوح مختلف اعتمادپذیری بررسی شد. (Meysami and Niksokhan, 2020). به توسعه و ارزیابی اثر بخشی یک مدل تخصیص غیرقطعی بار آلودگی در سیستم رودخانه‌ای با استفاده از تصمیم‌گیری چندهدفه پرداختند. نتایج نشان داد که کارایی و استحکام مدل، تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم خوب ارزیابی می‌شود.

همزمان با توسعه روش‌های مدل‌سازی، اهداف و مطلوبیت‌های مختلفی برای مسئله WLA توسعه یافته است. این اهداف در مقالات مختلف عمدتاً با چارچوب‌های تک‌هدفه و چندهدفه بیان شده است (Mahjouri, 2015). انتخاب هر یک از این اهداف به اهمیت آن در مراجع تصمیم‌گیری و مدیران بهره‌برداری از سیستم رودخانه بستگی دارد (Burn and Yulianti, 2001). یکی از این اهداف، حداقل‌سازی هزینه‌های اقتصادی مدیریت و کنترل بار آلودگی است (Yandamuri et al., 2006; Saremi et al., 2010; Zolfagharipoor and Saadatpour et al., 2019). این هزینه‌ها شامل هزینه‌های تصفیه پساب‌ها متاثر از ساخت، بهره‌برداری و نگهداری سیستم‌های تصفیه‌خانه و هزینه جریمه و مالیات ناشی از بارگذاری و تخطی از سطح استاندارد کیفی است. (Ashtiani et al., 2015). مدل تخصیص بهینه بار آلودگی مبتنی بر حداقل‌سازی هزینه تصفیه و تخطی زیست‌محیطی برای پیدا کردن بهترین راه حل‌های کاهش بار آلودگی رودخانه توسعه دادند. (Zhang et al., 2018). یک مدل تخصیص بار آلودگی مبتنی بر مالیات^۵ (PT-WLA) برای تخلیه بار آلودگی در سیستم رودخانه‌ای توسعه دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها در مقایسه با مدل‌های سنتی WLA برای حداقل کردن هزینه اقتصادی، دارای قابلیت کاهش و دستیابی به تخصیص عادلانه بار آلودگی است

در سال‌های اخیر، با افزایش فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری، حجم وسیعی از انواع آلاینده‌ها به پیکره رودخانه‌ها تخلیه شده که منجر به کاهش کیفیت اکوسیستم شده است. هنگامی که بارگذاری آلودگی بیش از ظرفیت جذب محیط پذیرنده باشد، کیفیت آب رودخانه از سطح استاندارد کیفی تجاوز کرده و خسارت‌های مختلفی به کارکردهای اکوسیستم برای بهره‌برداری آب آشامیدنی و تولید محصولات کشاورزی و سلامتی اکوسیستم رودخانه وارد می‌شود (Zolfagharipoor and Ahmadi, 2016). برای کنترل و مدیریت کیفیت آب و برای دستیابی به حد آستانه کیفی مناسب در سطوح مختلف بهره‌برداری از سیستم رودخانه، مدیران به دنبال توسعه برنامه‌های تعیین الگوی بهینه بارگذاری آلودگی هستند. تخصیص بار آلودگی^۱ (WLA) گامی مهم و روشی رایج برای بهبود و مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها است. WLA با تعیین سطح بهینه از بارگذاری آلودگی، نقش حیاتی در کنترل استاندارد کیفی آب سیستم رودخانه‌ها دارد (Mahjouri, 2015; Zhang et al., 2018).

بررسی ادبیات موضوع نشان داد، مدل WLA معمولاً از ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده می‌کند. در آن، مدل‌های بهینه‌سازی الگوی بارگذاری را در سیستم رودخانه به حداکثر می‌رساند و مدل‌های کیفیت آب، اطمینان حاصل می‌کنند که سطح آستانه استاندارد کیفی آب رودخانه رضایت بخش است (Saadatpour and Afshar, 2007). در اواخر دهه ۱۹۶۰، مدل‌های WLA با مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای کنترل پارامتر کیفی BOD آب رودخانه‌ها، براساس معادلات استریتر-فلیس^۲ (S-PE) ساخته شده است (Liebman and Lynn, 1966). سپس مدل WLA با روش برنامه‌ریزی خطی توسط Loucks et al. (1967) و Revelli et al. (1968) توسعه پیدا کرده است. در دهه ۱۹۹۰، مدل‌های غیرقطعی و مدل‌سازی عدم قطعیت در مدیریت کیفیت آب با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی احتمالاتی و فازی توسعه یافت و مدل‌های غیرقطعی با روش‌های برنامه‌ریزی پویا آغاز شده و توسط برنامه‌ریزی مقید تصادفی^۳ (CCP) گسترش یافته است. سپس، مدل‌های WLA فازی و برنامه‌ریزی بازه‌ای^۴ (IFP) توسعه یافتند (Tung and Hathhorn, 1990; Cardwell and Ellis, 1993; Sasikumar and Mujumdar, 1998; Huang and Loucks, 2000; Mujumdar and Sasikumar, 2002; Revelli and Ridolfi, 2004; Qin et al., 2007; Qin et al., 2009; Li and Huang, 2010; Nikoo et al., 2013; Nikoo et al., 2014; Zhou et al., 2015; Zhang et al., 2018). در سال‌های اخیر مدل WLA در شرایط مختلف مدیریت سیستم کیفی رودخانه‌ها توسعه داده شده است (Khoshtkam et al., 2018).

اکوسیستم رودخانه است که انعطاف‌پذیری لازم در تصمیم‌گیری و تعامل بین هزینه‌های مدیریت آلودگی در نقاط بارگذاری و خسارت بارگذاری آلودگی در نقاط برداشت جریان را فراهم می‌کند. این مقاله با تمرکز بر روش بهینه‌سازی- شبیه‌سازی^۸ (S-O) در شرایط جریان غیرمماندگار و الگوی بارگذاری متغیر ماهانه در سیستم رودخانه می‌پردازد. بطوری که از MIKE11 برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده کل جامدات محلول^۹ (TDS) برای بخشی سیستم رودخانه کارون استفاده می‌کند و از الگوریتم ازدحامی ذرات^{۱۰} (PSO) برای بهینه‌سازی اقتصادی استفاده می‌شود.

۲- روش تحقیق

در این بخش، روش‌شناسی مدل C-WLA برای حل مسئله بارگذاری بهینه آلودگی و پیدا کردن حد آستانه بهینه از کیفیت آب سیستم رودخانه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۱- شرح مدل‌سازی

در یک سیستم رودخانه، نقاط بارگذاری منابع آلاینده S_1, S_2, \dots, S_i و نقاط برداشت جریان $W_1, W_2, W_3, \dots, W_m$ در طول مشخصی از رودخانه قرار دارند. همچنین، در نقاط کنترل $R_1, R_2, R_3, \dots, R_j$ غلظت آلاینده در سیستم رودخانه پایش و کنترل می‌شود. افزایش بارگذاری آلودگی در رودخانه منجر به افزایش غلظت آلاینده در نقاط کنترل و تخطی از حد استاندارد کیفی منجر به خسارت در نقاط برداشت می‌شود. برای مدیریت هزینه‌ها و بهبود کیفیت آب سیستم رودخانه، مجموع هزینه تصفیه آلاینده در نقاط بارگذاری و خسارت بار آلاینده در نقاط برداشت برای تعیین الگوی بار بهینه در نقاط بارگذاری و حد آستانه غلظت بهینه در نقاط کنترل، حداقل‌سازی می‌شود. بنابراین، هدف از حل مسأله بارگذاری آلاینده، بهینه‌سازی مجموع هزینه و خسارت سیستم کیفیت آب رودخانه برای تعیین درصد تصفیه بهینه $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_i)$ و تعیین حد آستانه غلظت بهینه $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$ است. در ادامه توصیف ریاضی تابع هدف (معادله ۱)، قید مسأله (معادله ۲)، محدوده‌ها و شرایط مرزی متغیرهای تصمیم (روابط ۳ و ۴) آورده شده است:

$$\min_{x,y} Z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T c_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T d_{mt} \quad i=1, 2, \dots, N; \quad m=1, 2, \dots, M; \quad t=1, 2, \dots, T \quad (1)$$

s.t

$$C_{jt} \leq y \quad (2)$$

$$C_{jt} = f(Q_r, C_0, U, A, Q_w, C_w, Q_s, C_s, C_{std}, x, D, K) \quad j=1, 2, \dots, J; \quad t=1, 2, \dots, T$$

و نتایج مدل PT-WLA منجر به بهبود عملکرد بارگذاری تخلیه‌کننده‌ها و بهبود تصمیم‌گیری‌های زیست‌محیطی می‌شود. (Sadak et al. (2020) مدل تخصیص بار آلودگی با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی توسعه داده و سناریوهای مختلف تخصیص بار آلودگی ارزیابی می‌شود. نتایج نشان که روش پیشنهادی آن‌ها برای تعیین الگوی بار آلودگی بهینه در سیستم رودخانه‌ای کارا و مؤثر است. سیستم کیفی رودخانه‌ها همواره تحت تأثیر تخطی از استاندارد کیفی قرار دارد و غلظت آلاینده‌ها در آن‌ها از حد استاندارد کیفی تجاوز می‌کند. بنابراین، تخطی از حد آستانه استاندارد کیفی منجر به خسارت و اختلال در سیستم بهره‌برداری رودخانه می‌شود. بررسی تحقیقات نشان داد که در بیشتر مقالات ارجاع شده در رویکرد فعلی توسعه مدل‌های WLA، هزینه مربوط به خسارت بارگذاری آلودگی در نظر گرفته نمی‌شود. در واقع در مدل‌های WLA سنتی، خسارت‌های سیستم رودخانه در سطوح مختلف بهره‌برداری آب شرب، کشاورزی و محیط‌زیست به شایستگی توجه قرار نمی‌گیرد و حد آستانه کیفی بهینه در سیستم رودخانه تعیین نمی‌شود. رویکرد تخصیص WLA سنتی با اهداف اقتصادی بارگذاری آلاینده در سیستم رودخانه سازگار نیست. زیرا خسارت‌های سیستم رودخانه هم برای سازمان‌های کنترل آلودگی (محیط‌زیست) و هم برای بهره‌برداران سیستم رودخانه خیلی مهم است. همچنین، تخلیه بار آلودگی با الگوی بارگذاری متغیر در شرایط جریان غیرمماندگار رودخانه، روند تصمیم‌گیری را به یک چالش واقعی تبدیل کرده است. بنابراین لازم است، برای دستیابی به حذف منطقی و الگوی بارگذاری بهینه آلاینده از منابع مختلف در مدل WLA با در نظر گرفتن تعامل^۶ بین هزینه مدیریت بار آلودگی و خسارت بارگذاری آلودگی در سیستم رودخانه برای تعیین الگوی بارگذاری و حد آستانه بهینه از کیفیت آب سیستم رودخانه توسعه یابد.

هدف از این مطالعه، ارائه روشی کارآمد برای پیدا کردن الگوی بارگذاری بهینه و حد آستانه غلظت بهینه از کیفیت آب رودخانه براساس ارزیابی هزینه‌های تصفیه بار آلودگی و خسارت‌های سیستم رودخانه است. برای دستیابی واقع بینانه به این اهداف، مدل تخصیص بار آلاینده مبتنی بر هزینه^۷ (C-WLA) در سیستم رودخانه کارون به عنوان پرآب‌ترین رودخانه کشور توسعه داده شده است. جنبه‌های جدید و نوآوری این تحقیق، علاوه بر ارائه مدل C-WLA مبتنی بر مدل‌سازی ترکیبی از هزینه تصفیه و خسارت بارگذاری آلودگی در

منابع آلاینده نقطه‌ای، تعداد نقاط برداشت، تعداد نقاط کنترل و تعداد ماه‌های دوره شبیه‌سازی است.

در شکل ۱، فلوچارت توسعه مدل C-WLA با ترکیب ابزارها و داده‌های مختلف مدل‌سازی ارائه شده است. هسته اصلی مدل C-WLA شامل مدل شبیه‌سازی، مدل برآورد هزینه-خسارت و الگوریتم بهینه‌سازی است که در برنامه MATLAB (Ver. R2018b) با هم کویل شده‌اند. در اولین گام مدل‌سازی مقادیر تصادفی از بردار متغیر تصمیم‌های $X = (X_1, X_2, X_3 \dots X_n)$ و $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j)$ ایجاد شده و با اعمال در الگوهای بارگذاری، وارد شرایط مرزی مدل شبیه‌سازی می‌شود. سپس مدل شبیه‌سازی اجرا و خروجی آن در نقاط برداشت جریان برای محاسبه خسارت سیستم رودخانه و غلظت در نقاط کنترل برای مقایسه با y انتخاب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی وارد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شود. و تابع هدف در هر گام محاسباتی محاسبه می‌شود. اگر همگرایی مورد نیاز برای بهینه‌سازی در مدل ایجاد شود، فرایند مدل‌سازی تکمیل شده و مقادیر بردار x به عنوان درصد تصفیه بهینه و بردار y به عنوان غلظت حد آستانه بهینه نمایش داده می‌شوند. در غیر اینصورت، مقادیر جدیدی از بردارهای x و y انتخاب شده و رویه مدل‌سازی تا رسیدن به حداقل تابع هدف تکرار می‌شود.

$$0 \leq X \leq X_{max} \quad (3)$$

$$C_{min} \leq Y \leq C_{max} \quad (4)$$

که Z تابع هدف (\$\$)، متغیرهای تصمیم مسأله شامل بردار x درصد تصفیه بهینه (%) برای شش منبع آلاینده در طول ماه‌های مختلف یکسال (۱۲ ماه) و بردار y حد آستانه غلظت بهینه (mg/l) برای پنج نقطه کنترل به صورت مقداری ثابت است. بردار y از مجموعه مقادیر گسسته با تغییرات گام به گام ۵۰ میلی گرم بر لیتر بین دو حد حداقل (C_{min}) و حداکثر (C_{max}) غلظت مشاهداتی در سیستم رودخانه در طی دوره شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. C_i تابع هزینه تصفیه آلاینده در نقاط بارگذاری (\$\$/month) و d_m خسارت بار آلودگی در نقاط برداشت (\$\$/month) است. استخراج و برآورد هریک از توابع هزینه و خسارت در بخش ۲-۲ به تفصیل شرح داده می‌شود. C_{jt} غلظت شبیه‌سازی شده در نقاط کنترل (mg/l)، تابع f بیان‌کننده شرایط کیفی که شامل معادلات یک بعدی جریان و انتقال جرم در سیستم رودخانه است. Q_r جریان رودخانه (m^3/s)، C_0 غلظت آلاینده در مرز بالادست (mg/l)، U و A سرعت متوسط (m/s) و مساحت سطح مقطع جریان (m^2) است. Q_s و C_s به ترتیب دبی جریان (m^3/s) و غلظت منابع آلاینده (mg/l) است. Q_w و C_w به ترتیب دبی (m^3/s) و غلظت جریان برداشت شده از رودخانه (mg/l) و C_{std} غلظت استاندارد (mg/l) است. K ضریب زوال آلاینده (1/day) و D ضریب پراکنندگی طولی در رودخانه (m^2/s) است. x_{max} حداکثر درصد تصفیه (%) می‌باشد. J, M, N, T به ترتیب، تعداد

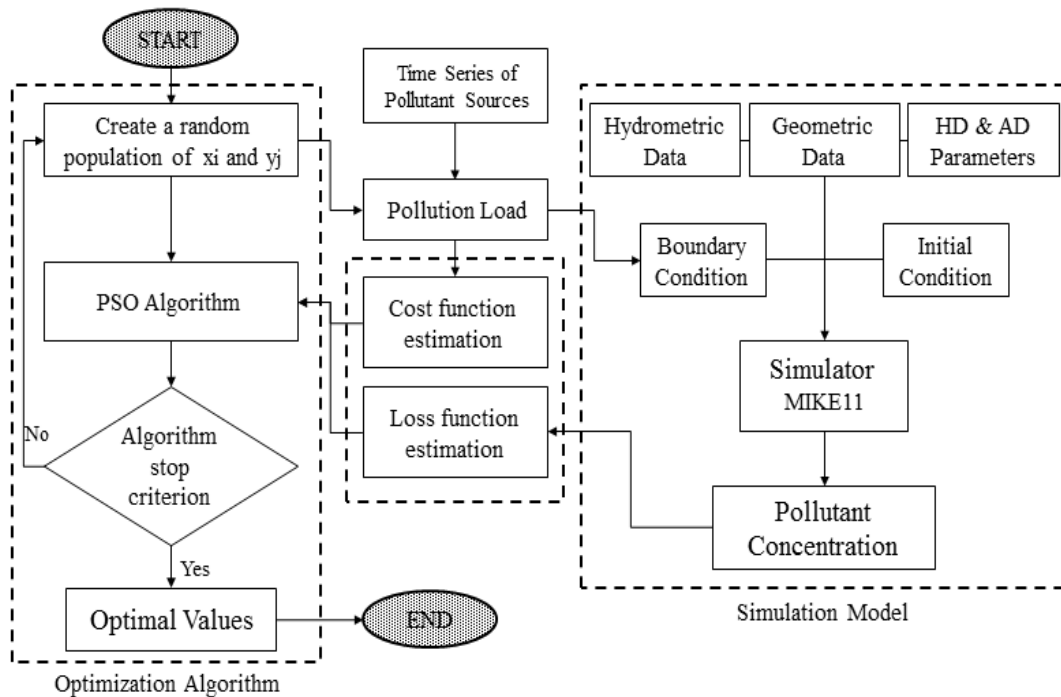


Fig. 1- C-WLA model framework combining various modeling tools and data

شکل ۱- ترکیب ابزارها و داده‌های مختلف برای چارچوب مدل‌سازی C-WLA

۲-۲- برآورد هزینه- خسارت

$$d_D = \begin{cases} a T_1 + b T_2 + c T_3 + d T_4 & C_m > C_{std} \\ 0 & C_m \leq C_{std} \end{cases} \quad (7)$$

برآورد خسارت آب کشاورزی: هنگامی که غلظت آلاینده TDS در آب آبیاری محصولات کشاورزی از آستانه تحمل گیاه تجاوز کند، گیاه تحت تنش قرار می‌گیرد و عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد (McNeal and Coleman, 1966; Munns and Termaat, 1986). با داشتن الگو و سطح کشت محصولات زراعی، هزینه خسارت برای هر گیاه و هزینه کل خسارت کشاورزی به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$d_A = \sum_{k=1}^{NC} Ar_k Be_k (Y - Y')_k \quad k=1, 2, \dots, NC \quad (8)$$

که d_A خسارت کشاورزی (\$/month)، Ar سطح زیرکشت (ha)، Be درآمد محصول (\$/kg)، NC تعداد گیاهان در الگوی کشت منطقه است. $Y - Y'$ کاهش عملکرد محصول (kg/ha) است که Y حداکثر عملکرد گیاه و Y' عملکرد گیاه در اثر تنش شوری می‌باشد. کاهش عملکرد محصولات زراعی به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Maas and Hoffman, 1977):

$$Y' = Y \cdot \begin{cases} 1 - A(\bar{S} - B) & \bar{S} > B \\ 1 & \bar{S} \leq B \end{cases} \quad (9)$$

A ضریب کاهش عملکرد گیاه در واحد افزایش شوری (%)، B غلظت آستانه تحمل شوری گیاه (dS/m)، \bar{S} متوسط شوری خاک که در این تحقیق مقدار آن برابر با متوسط شوری آب آبیاری فرض شده است (Delavar et al., 2015).

برآورد خسارت محیط‌زیست: در این پژوهش، خسارت تخریب محیط‌زیست سیستم رودخانه از روش تعیین جریمه برای تخطی از استاندارد زیست‌محیطی (C_{std}) ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و با حجم بیش از ۳۰۰۰ مترمکعب پساب در ماه در محل تخلیه‌کننده مطابق آیین‌نامه سازمان محیط‌زیست ایران با رابطه (۱۰) تخمین زده شد (IRANDOE, 2015).

$$d_E = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Q_{it} \frac{C_{it} - C_{std}}{C_{std}} x_{it} PAE & C_{it} > C_{std} \\ 0 & C_{it} \leq C_{std} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

در این تحقیق برای برآورد تابع هزینه تصفیه آلاینده از ارزیابی داده‌های مطالعه موردی موجود در منطقه برای ساخت، بهره‌برداری و نگهداری سیستم‌های نمک زدایی اسمز معکوس^{۱۱} و تقطیر مکانیکی^{۱۲} با راندمان تصفیه ۸۵٪ برای یک دوره طرح ۳۰ ساله با متوسط تورم ۱۵٪ استفاده شد. تابع هزینه تصفیه آلاینده (C_s) با استفاده از ابزار Table Curve بصورت یک رابطه توانی با بارگذاری منابع آلاینده ($w_s = Q_s \cdot C_s$) و درصد تصفیه بار آلاینده (x_s) با ضرایب ثابت α ، β و γ برابر $1/58$ ، $1/13$ و $1/08$ و R^2 برابر $0/93$ برازش داده شد (رابطه ۵):

$$C_s = \alpha w_s^\beta x_s^\gamma \quad (5)$$

برآورد خسارت براساس تخطی غلظت آلاینده از غلظت استاندارد در نقاط برداشت جریان برای بهره‌برداری‌های شرب، کشاورزی و محیط‌زیست است. بنابراین، هزینه خسارت بار آلاینده در نقاط برداشت جریان (d_m) از مجموع هزینه‌های روش‌های جایگزین تامین آب شرب (d_D)، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی (d_A) و جریمه ناشی از تخریب محیط‌زیست (d_E) تعیین می‌شود (رابطه ۶). در ادامه به جزئیات برآورد هریک از خسارت‌ها پرداخته می‌شود.

$$d_m = d_D + d_A + d_E \quad (6)$$

برآورد خسارت آب شرب: هنگامی که غلظت آلاینده TDS در نقاط برداشت جریان (C_m) از حداکثر استاندارد مطلوب (C_{std}) ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کند، روش‌های جایگزین برای تامین آب شرب با کیفیت مطلوب در نظر گرفته می‌شود (WHO, 2008). در این تحقیق، روش‌های جایگزین برای تامین آب شرب شامل، هزینه تصفیه تکمیلی آب شرب^{۱۳} (T_1) برای نمک زدایی آب ورودی به شبکه آب شرب، تهیه سیستم تصفیه خانگی^{۱۴} (T_2)، خرید آب شرب بسته‌بندی^{۱۵} (T_3) و استفاده از تانکرهای آبرسانی سیار^{۱۶} (T_4) است. در یک جامعه مصرف بسته به عوامل مختلف نسبت استفاده از هرکدام روش‌های جایگزین متفاوت است و به صورت ضرایب وزنی a ، b ، c و d در هزینه خسارت کل آب شرب اعمال می‌شود (رابطه ۷). مقادیر و نحوه برآورد ضرایب وزنی در بخش ۳-۱ توضیح داده شده است:

۲-۴- مدل شبیه‌سازی

در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی سیستم رودخانه از مدل عددی یک بعدی و غیرماندگار MIKE11 استفاده شد. مدل MIKE11 توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک^{۱۸} (DHI) توسعه یافته است. در ماژول هیدرودینامیک (HD)، معادلات سنت-ونانت^{۱۹} شامل معادله پیوستگی و مومنتم (معادله ۱۳ و ۱۴) به صورت موج دینامیکی با روش عددی تفاضل محدود به صورت ضمنی و الگوی شش نقطه‌ای ابوت^{۲۰} حل می‌شود که دبی جریان و عمق آب در زمان و مکان سیستم رودخانه تعیین می‌کند. در ماژول جابجایی-پراکندگی^{۲۱} (AD) با روش عددی تفاضل محدود به صورت ضمنی معادله جابجایی-پراکندگی (معادله ۱۵) حل می‌شود (Abbott and Ionescu, 1967). معادله جابجایی-پراکندگی مکانیسم انتقال جرم یک بعدی مواد محلول یا معلق نظیر غلظت کل جامدات محلول (TDS) و رسوبات معلق غیرچسبنده در شرایط غیرماندگار در سیستم رودخانه را بیان می‌کند. این معادله با فرض اختلاط کامل در مقطع رودخانه و با ترکیب دو معادله پیوستگی و قانون اول فیک استخراج می‌شود (Jamshidi et al., 2020).

مدل MIKE11 قادر به شبیه‌سازی انواع شرایط مرزی جریان و بارگذاری منابع آلودگی نقطه‌ای و برداشت آب در طول سیستم رودخانه است. داده‌های هیدرولیکی، هندسی، هیدرولوژیکی و کیفیت آب به عنوان داده‌های ورودی به مدل در نظر گرفته می‌شوند (DHI, 2012).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = Q_s \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \frac{Q|Q|}{AR} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial(C)}{\partial x} \right) - AKC + C_s Q_s \quad (15)$$

که Q جریان رودخانه (m^3/s)، A مساحت سطح مقطع جریان (m^2)، h عمق آب رودخانه (m)، C غلظت ماده آلاینده (mg/l)، Q_s دبی منابع آلاینده، (m^3/s)، D ضریب پراکندگی طولی (m^2/s)، K ضریب زوال مرتبه اول ($1/day$)، c ضریب زبری سزی، R شعاع هیدرولیکی (m)، g شتاب ثقل (m/s^2) و α ضریب تصحیح ممنتوم است و C_s نشان دهنده غلظت منابع آلاینده (mg/l) است.

۲-۵- سناریو مدیریتی

برای ارزیابی کارایی مدل C-WLA و بررسی اثر تعامل هزینه مدیریت بار آلودگی و خسارت بارگذاری در نتایج مدل‌سازی، استراتژی‌های مختلفی با حدود آستانه کیفی مختلف از بهره‌برداری رودخانه مطابق جدول ۱ اجرا شد. هریک از این استراتژی‌ها در قالب یک سناریو

که Q_{it} دبی منابع آلاینده، C_{it} غلظت منابع آلاینده و C_{std} غلظت استاندارد، P ، A و E به ترتیب ضرایب تبدیل اقتصادی، منطقه‌ای و حساسیت محیط است.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی

در این پژوهش برای بهینه‌سازی تابع هدف از الگوریتم ازدحامی ذرات^{۱۷} (PSO) استفاده شد. الگوریتم PSO یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد که بر پایه رفتار اجتماعی گروهی از پرندگان یا ماهی‌ها شکل گرفته است که به طور تصادفی در یک منطقه به دنبال غذا می‌گردند. الگوریتم PSO توسط (Eberhart and Kennedy, 1995) توسعه یافته است. این الگوریتم مانند الگوریتم‌های فراکوشی دیگر با ایجاد یک جمعیت تصادفی (Swarm) متشکل از تعدادی ذرات (Particles) آغاز می‌شود. هر کدام از این ذرات یک جواب را می‌سازد که در حقیقت مقداری برای متغیر تصمیم می‌باشد و به طور تصادفی در فضای جست و جو حرکت می‌کنند و دارای یک موقعیت و سرعت مشخص هستند. موقعیت هر ذره با بهترین موقعیت ذره (p -best) و بهترین موقعیت جمعیت (g -best) بروزرسانی می‌شود. ارزیابی کارایی هر ذره در فضای جست و جو، مقدار برازندگی آن به کمک تابع هدف تعیین می‌شود. معادله سرعت هر ذره و موقعیت جدید آن به صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شود (Afshar and Masoumi, 2016). با همگرا شدن همه ذرات موجود در جمعیت تصادفی به g -best، جواب بهینه پیدا می‌شود:

$$(11)$$

$$v^i(t+1) = wv^i(t) + c_1r_1(x^{i,p-best} - x^i(t)) + c_2r_2(x^{g-best} - x^i(t))$$

$$x^i(t+1) = x^i(t) + v^i(t+1) \quad (12)$$

که $v^i(t+1)$ سرعت ذره i در تکرار جدید، $v^i(t)$ سرعت ذره در تکرار فعلی، $x^i(t)$ موقعیت ذره i در تکرار فعلی و $x^{i,p-best}$ بهترین موقعیت ذره i که در آن قرار دارد و x^{g-best} بهترین موقعیت که تمام ذرات مشاهده کرده‌اند. r_1 و r_2 مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت $[0, 1]$ ، c_1 و c_2 ضرایب ثابت شتاب که به ترتیب وزن نسبی مولفه‌های شناختی و اجتماعی را تعیین کرده و مقادیری غیرمنفی و کوچکتر از ۲ هستند. w وزن اینرسی که تمایل ذرات به حفظ حالت فعلی حرکت را تعیین می‌کند و مقداری بین ۰/۴ تا ۰/۹ است (Afshar and Masoumi, 2016; Eberhart and Shi, 1998).

لیتر بود (شکل ۲). تمامی تخلیه‌کننده‌های آلودگی مؤثر در طول محدوده مطالعاتی به شش گروه اصلی (منابع نقطه‌ای) با سیستم تخلیه و تصفیه مجزا تقسیم شدند. همچنین هشت نقطه برداشت جریان آب برای مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی شناسایی شد. به این ترتیب رودخانه به ۵ بازه با ۵ نقطه کنترل در کیلومترهای ۰/۵، ۳۳، ۴۵، ۵۸ و ۶۲ کیلومتر تقسیم شد (شکل ۲). مشخصات تخلیه‌کننده‌ها و نقاط برداشت بصورت متوسط سالانه در جدول ۲ ارائه شده است. دوره شبیه‌سازی براساس آمار هیدروگراف و بار آلودگی یک ساله از ۱۳۹۴ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۵ در نظر گرفته شده است. برای جزییات بیشتر پارامترهای ورودی و شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی رودخانه کارون به (Fakouri et al., 2018) مراجعه شود.

خسارت آب شرب از روش‌های جایگزین برای تامین آب شرب با کیفیت مطلوب برای جمعیت ۱۳۰۲۵۹۱ نفری و ۳۶۲۴۸۰ خانواده برای شهر اهواز در نقاط برداشت P₇ و P₈ مطابق رابطه (۷) محاسبه شد (www.amar.org.ir) و ضرایب وزنی a, b, c و d برابر ۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ با داده‌های موجود، مشورت کارشناسان آب و فاضلاب و مشاهدات میدانی در منطقه مطالعاتی تعیین شدند. هزینه T₁، T₂ و T₃ براساس متوسط هزینه سامانه‌های موجود در بازار و برای شیرین‌سازی هر مترمکعب برابر ۱ دلار برآورد شده است.

خسارت کاهش عملکرد محصولات کشاورزی مطابق معادلات (۸) و (۹) براساس الگوی کشت غالب در حوضه آبریز کارون برای پنج محصول زراعی گندم، چغندر قند، پیاز، سیب زمینی و ذرت در نقاط برداشت P₁، P₃، P₄ و P₆ به صورت ماهانه در طول فصل رشد تخمین زده شده است. دور آبیاری مرسوم در محدوده مطالعاتی هفت روزه در نظر گرفته شد. الگوی کشت و مشخصات محصولات زراعی در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

مدیریتی بررسی شد. دو سناریو I و II به ترتیب وضعیت فعلی بارگذاری و تصفیه تمام منابع آلاینده در سیستم رودخانه را نشان می‌دهد. این دو سناریو به صورت شرایط حدی از بارگذاری سیستم رودخانه‌اند و بدون بهینه‌سازی آنالیز می‌شوند. در سناریو I هزینه تصفیه آلودگی بسیار ناچیز درحالی که سیستم رودخانه در شرایط خسارت زیاد بارگذاری است. در مقابل سناریو II دارای خسارت آلودگی صفر و هزینه تصفیه بسیار بالا در سطح ۹۵٪ تصفیه منابع آلاینده است. سناریو III نتایج مدل C-WLA به عنوان مسأله اصلی این تحقیق است که در آن کارایی مدل برای ارائه الگوی بارگذاری بهینه و حد آستانه غلظت بهینه بررسی می‌شود. هدف از این سناریو، پیدا کردن مقادیر درصد تصفیه بهینه و حد آستانه غلظت بهینه که به ازای آن‌ها، تابع هدف حداقل می‌شود.

۳- مطالعه موردی

۳-۱- مروری بر محدوده مطالعاتی

رودخانه کارون در سال‌های اخیر به دلیل بارگذاری بیش از حد آلودگی پساب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی به یک مشکل جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است. تخلیه پساب‌ها منجر به افزایش شوری رودخانه شده و آن در معرض ریسک آلودگی شدید قرار داده است. در این تحقیق برای بررسی کارایی مدل C-WLA، ۶۲ کیلومتر از رودخانه کارون در محدوده ایستگاه ملاثانی (کیلومتر ۰ با مختصات ۴۸° ۵۲' شرقی و ۳۱° ۳۵' شمالی) تا ایستگاه اهواز (کیلومتر ۶۲ با مختصات ۴۸° ۴۱' شرقی و ۳۱° ۲۰' شمالی) انتخاب شد (شکل ۲). این محدوده به دلیل تراکم زیاد جمعیت و منابع مصرف‌کننده، بخش مهم و حیاتی از سیستم رودخانه کارون محسوب می‌شود و همچنین دریافت کننده حجم قابل توجهی از تخلیه‌کننده‌های پساب است. متوسط جریان سالانه و غلظت TDS از مرز ورودی به محدوده مطالعاتی به ترتیب برابر ۲۸۸ مترمکعب بر ثانیه و ۱۰۸۲ میلی‌گرم بر

Table 1- Different scenarios for management of river quality system

جدول ۱- سناریوهای مختلف مدیریت سیستم کیفیت آب رودخانه

Operation	Scenario	Cost	Damage	Objective Function	Constraint
Current situation	I	C_{it}	$d_{m t}$	-	-
Treatment of all dischargers	II	C_{it}	0	-	-
C-WLA	III	C_{it}	$d_{m t}$	$Z_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T d_{m t}$	$C_{j t} \leq y$

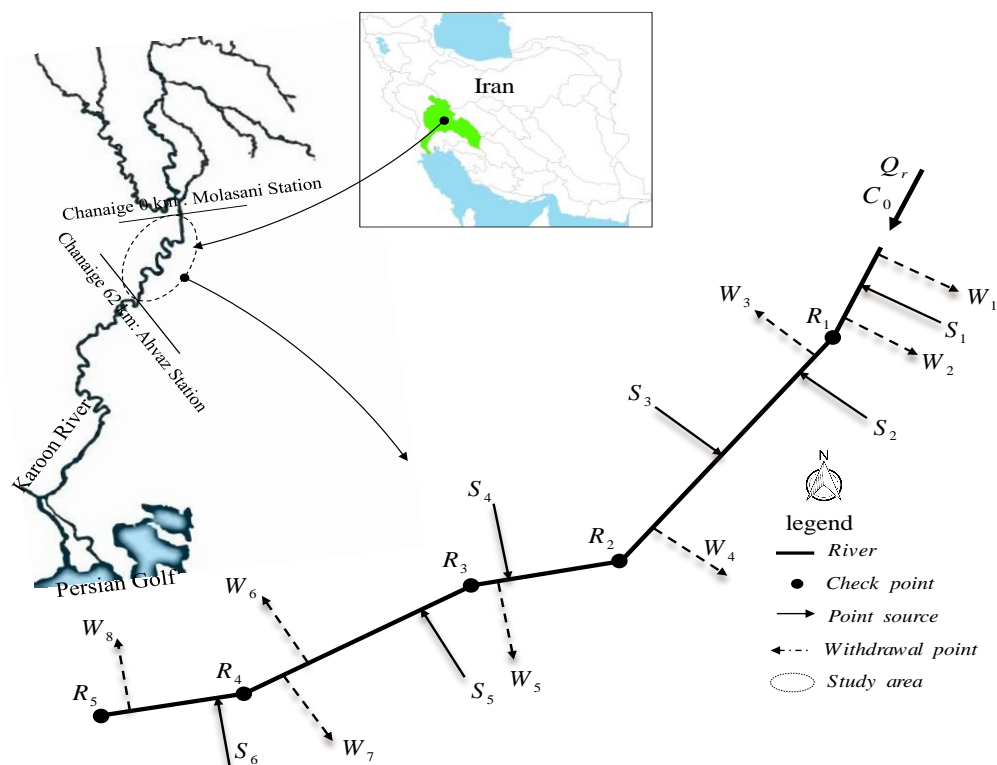


Fig. 2- Location of Karoon river system and schematic diagram of the reach under study
 شکل ۲- سیستم رودخانه کارون و شکل شماتیک از بارگذاری آلودگی و برداشت جریان در محدوده مطالعاتی

Table 2- Parameters for the dischargers and withdrawal points

جدول ۲- مشخصات منابع تخلیه کننده و نقاط برداشت جریان

Parameter	Pollutant Sources S_i					
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
location (km)	4.0	13.0	18.7	43.2	48.0	59.1
Q_s (m^3/s)	2.15	0.26	2.65	1.79	0.27	0.51
C_s (mg/l)	3744.2	7227.7	3989.7	10036.8	3900.2	4737.2
w_s (kg/s)	8.06	1.89	10.57	17.95	1.04	2.43

Parameter	Withdrawal Point W_m							
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
operation	Agricultural	Industrial	Agricultural	Agricultural	Industrial	Agricultural	Drinking	Drinking
location (km)	0.5	7.60	10.6	30.0	43.0	56.0	57.0	61.0
Q_w (m^3/s)	0.23	0.29	0.76	0.13	0.26	1.32	0.62	1.65

Table 3- Dominant crop pattern in the reach under study

جدول ۳- الگوی کشت غالب در محدوده مطالعاتی

Crop Pattern	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Corn					*	*	*	*				
Wheat		*	*	*	*	*	*	*	*			
Onion						*	*	*	*	*		
Potato					*	*	*	*	*			
Sugar beet						*	*	*	*	*	*	

Table 4- Crop characteristics for agricultural damage estimation

جدول ۴- مشخصات گیاهان زراعی برای برآورد خسارت کشاورزی

Crop Parameters	Wheat	Sugar beet	Onion	Potato	Corn
A (%)	7.1	5.9	7.3	12	12
B (dS/m)	6	7	1.2	1.7	1.7
Crop Area (ha)	42840	28150	16540	27140	10310
Crop Benefit (\$/kg)	0.147	0.033	0.027	0.041	0.113
Maximum Yield (kg/ha)	9000	70000	40000	50000	18000

۴- نتایج و بحث

همانطور که در بخش ۲-۱ ارائه شد، مدل C-WLA با پارامترها و ضرایب مشخص ساخته شد و سپس با استفاده از الگوریتم PSO بهینه شد. با آنالیز حساسیت، پارامترهای PSO با اندازه جمعیت ۵۰ و ۲۰۰ تکرار، ضرایب C_1 و C_2 برابر ۰/۴ و ۰/۶ و وزن اینرسی ۰/۹ بدست آمد (معادله ۱۱). مدل شبیه سازی- بهینه سازی C-WLA در کامپیوتری با مشخصات Intel(R) Core i7-4820k و پردازنده CPU 3.70 GHz و 16 GB RAM به مدت ۱۲۵ ساعت برای هر سناریو اجرا شد. لازم به ذکر است که مدت زمان اجرای مدل شبیه سازی ۴۵ ثانیه بود. نتایج هزینه ها و خسارت سیستم رودخانه در شرایط فعلی و نتایج مدل C-WLA شامل درصد تصفیه بهینه (x) با الگوی بارگذاری بهینه از تخلیه کننده ها (C_s^*)، حد آستانه بهینه y و تابع هدف (Z) در سیستم رودخانه کارون مقایسه شدند و عملکرد مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۱- سناریو I: وضعیت فعلی

نتایج سناریو I وضعیت فعلی هزینه ها و خسارت در طول یک سال برای سیستم رودخانه کارون نشان می دهد و برای آنالیز نتایج، از تابع هدف و محدودیتها در نقاط کنترل استفاده نمی شود. برای این سناریو هزینه تصفیه صفر می باشد بجز هزینه ۷/۹۳ میلیون دلاری برای منبع آلاینده S_5 که در سال های قبل در خروجی آن یک سیستم ساده تصفیه RO نصب شده بود.

جدول ۵ خسارت و هزینه تخلیه کننده های TDS در محدوده مطالعاتی از سیستم رودخانه کارون را نشان می دهد. نتیجه محاسبات نشان می دهد که سیستم رودخانه در وضعیت فعلی بیش از ۸۰ میلیون دلار خسارت دیده است. این خسارت شامل، هزینه روش های جایگزین تأمین آب آشامیدنی ۲۶/۵۲ میلیون دلار، خسارت کاهش عملکرد محصولات کشاورزی ۲۳/۹۱ میلیون دلار و خسارت تخریب محیط زیست ۴/۱۶ میلیون دلار است.

خسارت تخریب محیط زیست اکوسیستم رودخانه نیز مطابق رابطه (۱۰) با ضرایب A، P و E معادل ۲، ۱/۸ و ۲ مطابق آیین نامه سازمان محیط زیست ایران برای رودخانه کارون در استان خوزستان برآورد شد (IRANDOE, 2015).

۳-۲- واسنجی و صحت سنجی مدل شبیه سازی

مدل شبیه سازی در شرایط غیرماندگار برای دوره یک ساله اجرا شد. برای شرایط مرزی بالادست، هیدروگراف دبی جریان روزانه و متوسط غلظت TDS ماهانه به صورت شرایط مرزی باز استفاده شد و برای شرایط مرزی پایین دست، منحنی دبی- اشل به صورت شرایط باز و غلظت TDS به صورت گرادیان صفر^{۳۳} وارد مدل شد. همچنین، منابع آلاینده ورودی در مسیر به صورت منابع نقطه ای و متوسط ماهانه معرفی شدند. برای شرایط اولیه از نتایج اجرای مدل در شرایط ماندگار استفاده شد. در امتداد طولی رودخانه ۸۰ سطح مقطع با متوسط فاصله تقریبی ۸۰۰ متر استفاده شد و فواصل مکانی و گام های زمانی به ترتیب ۵۰۰ متر و ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای اطمینان از پایداری شبیه سازی عددی، عدد کورانته^{۳۳} کوچکتر از ۱ در نظر گرفته شد و رسیدن مدل به یک حالت دینامیکی پایدار، مدل برای دوره یک ساله اجرا شد تا از صحت نتایج خروجی اطمینان حاصل گردد.

برای مقاومت بستر رودخانه از ضریب زبری مانینگ n مطابق تحقیق Fakouri et al. (2018) مقدار 0.035 برای انتخاب شده است. ضریب پراکندگی (D) از رابطه تجربی Kashfipour and Falconer (2002) برابر با 1.03 مترمربع بر ثانیه محاسبه و در مدل وارد شد. آلاینده TDS به صورت یک آلاینده پایستار و واکنش ناپذیر با ضریب زوال برابر صفر قرار در نظر گرفته شد (Kanda et al., 2015). براساس نتایج صحت سنجی، عملکرد مدل با ضرایب زبری مانینگ n، پراکندگی (D) و نرخ زوال (K) در ترم های سطح آب و غلظت TDS در ایستگاه اهواز در طول بهمن تا شهریور سال ۱۳۹۳ با پارامترهای آماری محاسبه شده قابل اعتماد است (شکل ۳).

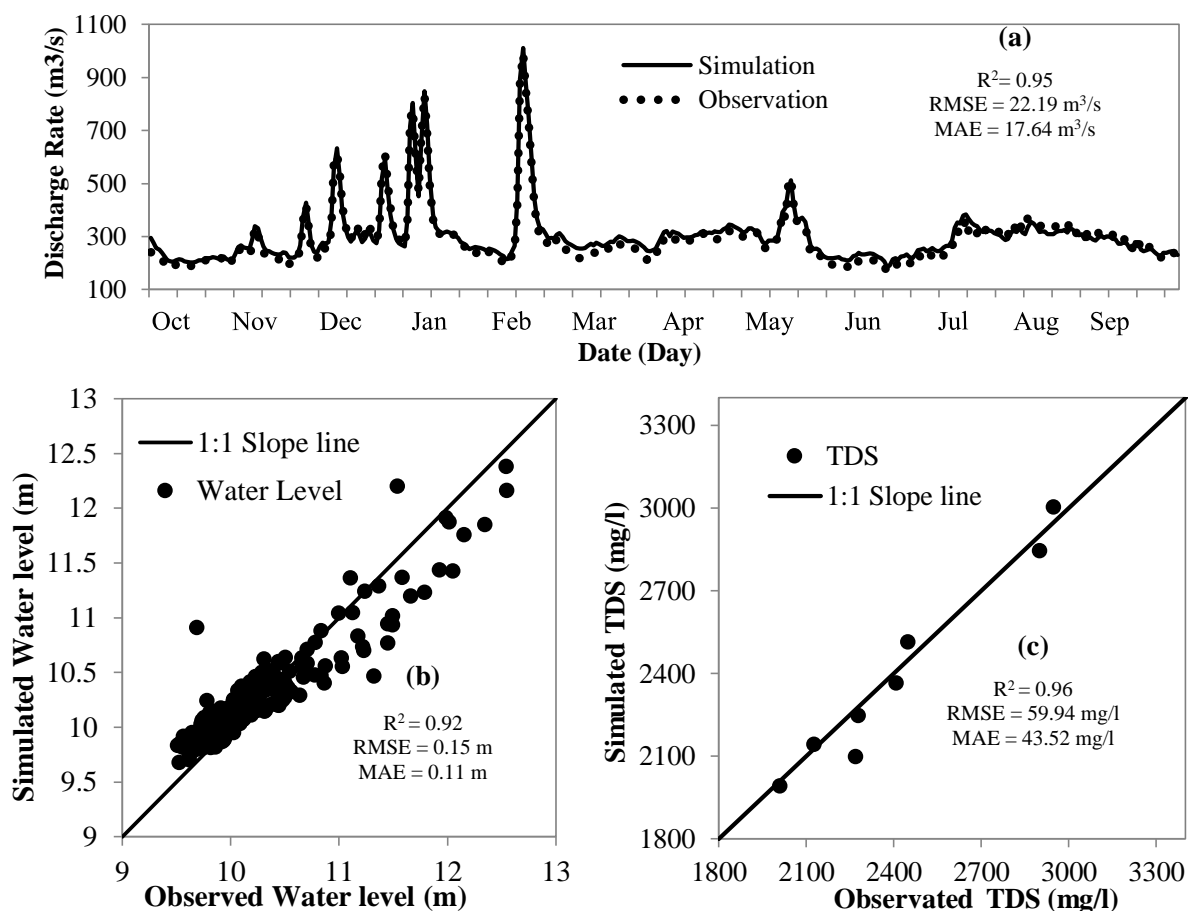


Fig. 3- Comparison of the simulated and observed (a) Discharge, (b) water level, and (C) TDS concentration

شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی (a) دبی جریان، (b) سطح آب و (c) غلظت TDS برای صحت‌سنجی

بهره‌بردارهای‌های شرب و کشاورزی به دلیل پایین بودن آستانه جریمه و سطح استاندارد کیفی در سیستم‌های رودخانه‌ای است. بنابراین، لازم است برای حوضه‌های درحال توسعه، در تعریف حد استانداردهای زیست‌محیطی در نقاط کنترل تجدید نظر شود.

مقدار بالای خسارت در بخش شرب اهمیت سیستم رودخانه را در تأمین نیازهای شرب و خانگی در محدوده مورد نظر به ویژه شهر اهواز را نشان می‌دهد که باید به آن توجه بیشتری شود (Afkhami et al., 2007). همچنین، خسارت کم محیط‌زیستی در مقایسه با سایر

Table 5- Costs and damages of pollutant sources in current situation scenario

Parameter	Withdrawal Point W_m								Total
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	
drinking water Damage of 10^6 *(\$/year)	0	5.37	0	0	4.82	0	11.49	30.58	52.26
Damage to agriculture (loss of yield) 10^6 *(\$/year)	2.25	0	7.45	1.27	0	12.93	0	0	23.91
Parameter	Pollutant Sources S_i						Total		
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6			
Cost of treatment 10^6 *(\$/year)	0	0	0	0	7.93	0	7.93		
Damage to environment 10^6 *(\$/year)	0.80	0.19	1.05	1.78	0.10	0.24	4.16		

۴-۲- سناریو II: تصفیه تمام تخلیه‌کننده

در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد. در این سناریو، پس از بهینه‌سازی حد آستانه غلظت بهینه (y) در نقاط کنترل برابر ۲۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمد و جدول ۷ درصد تصفیه بهینه (x) نشان می‌دهد. شکل ۴ الگوهای بارگذاری غلظت بهینه (C*) در مقابل الگوی بارگذاری فعلی (نقاط مشکلی) را در نقاط بارگذاری نشان می‌دهد. نتایج مدل C-WLA نشان داد که با حد آستانه غلظت بهینه ۲۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در نقاط برداشت جریان و الگوهای بارگذاری بهینه در نقاط بارگذاری (جدول ۷)، مجموع هزینه و خسارت‌ها حداقل می‌شود.

در جدول ۸ نتایج آنالیز هزینه تصفیه منابع نقطه‌ای و خسارت سیستم رودخانه در نقاط برداشت در شرایط بهینه برای استراتژی III ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مجموع هزینه و خسارت بهینه برای محدوده مطالعاتی سیستم رودخانه کارون برابر ۴۸/۹۹ میلیون دلار بدست آمد که ۳۰/۳۱ میلیون دلار هزینه تصفیه و مدیریت آلودگی است و خسارت شرب، کشاورزی و محیط‌زیست به ترتیب ۸/۶۱، ۷/۷۴ و ۲/۳۳ میلیون دلار است.

در شکل ۵ نتایج عملکرد سناریوهای I، II و III وضعیت فعلی و سناریو مدل C-WLA نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استراتژی مدیریتی تعامل بین هزینه تصفیه و خسارت بارگذاری آلودگی براساس مدل C-WLA، علاوه بر ارائه الگوی بارگذاری بهینه منجر به کاهش و حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها و خسارت‌ها می‌شود. این سناریو ۳۰/۳۱ میلیون دلار هزینه و ۱۸/۶۸ میلیون دلار خسارت بارگذاری دارد.

در سناریو II فرض می‌شود، همه منابع آلودگی تصفیه می‌شوند و غلظت استاندارد در همه نقاط کنترل سیستم رودخانه رعایت می‌گردد. بنابراین، خسارت برابر با صفر بدست می‌آید. اما هزینه تصفیه و مدیریت آلودگی به ۲۰۴/۰۸ میلیون دلار افزایش می‌یابد (جدول ۶). این هزینه صرف تصفیه ۹۵٪ منابع آلاینده می‌شود.

بررسی نتایج سناریو I و II نشان داد که هزینه تصفیه منابع آلاینده به مراتب بیشتر از خسارت آلاینده است (حدود ۲/۵ برابر). زیرا محدوده مطالعاتی بخش بحرانی از کیفیت سیستم رودخانه است که حجم قابل توجهی از پساب‌های حاشیه رودخانه از منابع آلاینده مختلف کشاورزی، صنایع و خانگی و شهری در آن بارگذاری می‌شود. بطوری که بررسی‌های نشان داد در محدوده مطالعاتی حدود ۶۰ درصد افزایش شوری برای کل سیستم رودخانه کارون اتفاق می‌افتد (Fakouri et al., 2018). از سوی دیگر به دلیل بارگذاری پیوسته از منابع آلاینده و واکنش ناپذیری آلاینده TDS، اثرات پدیده‌های جابجایی، پراکنندگی و واکنش در کاهش غلظت آلاینده بسیار ناچیز است (Yu et al., 2014). همچنین، TDS به عنوان یک آلاینده زوال‌ناپذیر، معمولاً دارای هزینه‌های زیادی برای تصفیه و نم‌زدایی است (Karamouz, 2005). بنابراین، همواره مدیریت و کنترل بارگذاری TDS دارای هزینه‌های بسیار زیاد در مدیریت کیفی سیستم رودخانه‌ای است.

۴-۳- سناریو III: مدل C-WLA

نتایج سناریو III، نتایج مدل C-WLA به عنوان مسأله اصلی تحقیق

Table 6- Cost of treatment of pollutant sources in scenario II

جدول ۶- هزینه تصفیه منابع آلاینده در سناریو II

Parameter	Pollutant Sources S _i						Total
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
x (%)	95	95	95	95	95	95	
Cost of Treatment 10 ⁶ * (\$/year)	28.34	4.53	45.36	90.71	7.93	27.21	204.08

Table 7- Optimal treatment percentage (x) of scenario III

جدول ۷- درصدهای تصفیه بهینه (x) منابع آلاینده برای سناریو III

x (%)	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
S ₁	7.13	9.33	6.79	6.69	5.67	7.05	9.51	10.05	19.01	8.53	16.27	9.59
S ₂	11.24	3.03	7.80	2.20	0.00	2.50	14.32	14.43	23.05	31.54	26.60	15.01
S ₃	5.79	3.95	1.30	3.34	30.33	0.00	5.86	21.65	11.03	16.12	13.16	6.21
S ₄	9.34	5.60	2.20	6.80	4.19	3.20	5.60	8.70	14.40	17.40	11.78	7.40
S ₅	21.72	27.37	22.96	22.78	21.01	28.09	21.86	17.57	38.25	44.91	33.48	22.65
S ₆	29.49	11.99	5.44	5.18	2.55	13.06	35.64	35.86	53.11	60.19	70.08	37.03

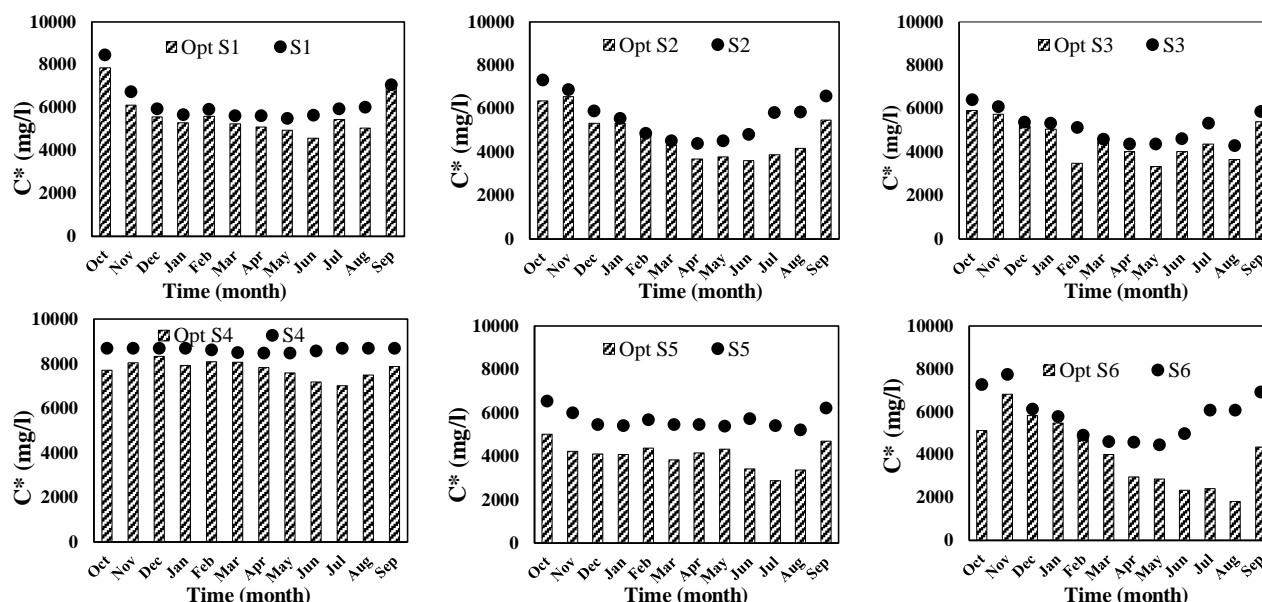


Fig. 4- Optimal load pattern discharges (C*) for scenario III
 شکل ۴- الگوی بارگذاری بهینه (C*) تخلیه کننده‌ها برای مدل C-WLA

Table 8- Results analysis of scenario III at point sources and withdrawal points

جدول ۸- آنالیز نتایج سناریو III در نقاط بارگذاری و برداشت جریان

Parameter	Pollutant Sources S_i						Total		
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6			
Cost of treatment (\$/year) *10 ⁶	2.25	1.83	4.24	9.39	7.33	5.27	30.31		
Damage to environment (\$/year) *10 ⁶	0.34	0.24	0.48	1.05	0.03	0.19	2.33		
Parameter	Withdrawal Point P_m								
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	Total
Damage to drinking water supply (need for substitute source) (\$/year) *10 ⁶	0	1.03	0	0	1.12	0	1.61	4.85	8.61
Damage to agriculture (loss of yield) (\$/year) *10 ⁶	1.25	0	2.03	0.27	0	4.19	0	0	7.74
Objective function (\$/year) *10 ⁶									48.99

۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله توسعه مدل ریاضی مسأله تخصیص بارآلودگی با استفاده از سیاست حداقل‌سازی هزینه و خسارت بارگذاری آلودگی است. کارایی این مدل در کاهش هزینه‌های تصمیمات مدیریتی برای دستیابی کیفیت آب مناسب با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی سیستم رودخانه کارون نشان داده شده است. چارچوب مدل‌سازی ارائه شده در این پژوهش ترکیبی از الگوریتم ازدحامی ذرات (PSO) با مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی (MIKE11) و مدل‌های اقتصادی برای بررسی تخصیص بار آلودگی است.

در حالی که تحلیل نتایج در وضعیت فعلی ۷/۹۳ میلیون دلار هزینه و ۸۰/۳۲ میلیون دلار خسارت بارگذاری نشان داد. آنالیز نتایج این سناریوها نشان داد که تعامل بین هزینه و خسارت منجر به بهبود کیفیت آب رودخانه و همچنین کاهش هزینه‌های اقتصادی در مدیریت کیفیت آب رودخانه می‌شود. در تحقیق Zhang et al. (2018) نشان دادند، تعامل بین هزینه‌های تصفیه و جریمه تخطی استانداردهای کیفیت آب می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های اقتصادی برای مدیریت کیفیت آب رودخانه شود.

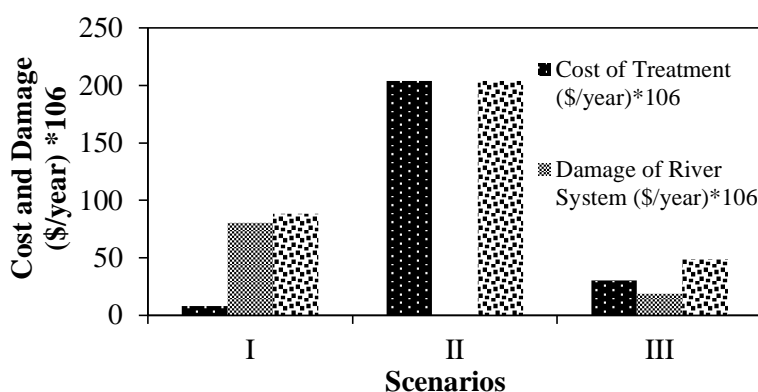


Table 5- Economic performance of different management strategies

شکل ۵- عملکرد مدل C-WLA در استراتژی‌های مختلف مدیریتی

آلودگی مشخص گردد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان صمیمانه از حمایت مالی بنیاد ملی حمایت از پژوهشگران معاونت ریاست جمهوری (گزارش شماره ۹۷۰۱۴۹۲۸) و دانشگاه تربیت مدرس برای انجام این تحقیق تشکر می‌کنند. همچنین، از سازمان آب و برق و اداره محیط زیست خوزستان و مدیریت منابع آب ایران برای ارائه داده‌های کمی و کیفی رودخانه کارون صمیمانه قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Waste-Load Allocation (WLA)
- 2- Streeter and Phelps Equations
- 3- Chance-Constrained Programming (CCP)
- 4- Interval and Fuzzy Programing (IFP)
- 5- Pigovian Tax-Based Waste-Load Allocation (PT-WLA)
- 6- Trade off
- 7- Cost-Based Waste-Load Allocation (C-WLA)
- 8- Simulation-Optimization (S-O)
- 9- Total Dissolved Solid (TDS)
- 10- Particle Sawarm Optimization (PSO)
- 11- Reverse Osmosis (RO) desalination
- 12- Mechanical Distillation (MED) Desalination
- 13- Water Advanced Treatment
- 14- Household Water Purifier
- 15- Mineral Water Packaging
- 16- Mobile Water Tankers
- 17- Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm
- 18- Danish Hydraulic Institute (DHI)
- 19- Saint-Venant Equations
- 20- Six-Point Pattern Abbott
- 21- Advection-Dispersion Equation
- 22- Zero Gradients
- 23- Courant Number

با استفاده از فرمول‌بندی مدل پیشنهادی، نتایج الگوی بارگذاری بهینه به صورت ماهانه به مدت یک سال به دست آمد و درصد تصفیه بهینه در سناریوهای کنترل کیفیت برای مدل C-WLA و در شرایط فعلی و ایده‌آل (عدم بارگذاری) ارائه و مقایسه شد.

در روند مدل‌سازی C-WLA تعامل بین هزینه تصفیه آلاینده و خسارت بارگذاری به سیستم رودخانه وجود دارد و به طور قابل توجهی روی اهداف کاهش و مدیریت هزینه بارگذاری تأثیر می‌گذارد. وقتی خسارت بارگذاری آلودگی ناچیز باشد، تأثیری در الگوی بارگذاری بهینه و هزینه مدیریت بار آلودگی نخواهد داشت. در حالی که در صورت تخطی بار آلاینده از استاندارد بهره‌برداری، خسارت بارگذاری در سیستم رودخانه افزایش یافته و منجر به هزینه‌های بالا برای مدیریت تخلیه‌کننده‌ها و هزینه‌های تصفیه بار آلاینده می‌شود. بررسی نتایج مدل پیشنهادی در نقاط کنترل نشان داد که سناریو III انعطاف‌پذیری خوبی در بهبود کیفیت آب و کاهش هزینه‌های بهینه مدیریت و خسارت بارگذاری آلاینده‌ها را دارد. در واقع تعامل بین هزینه‌های تصفیه و خسارت بار آلودگی منجر به کاهش کل هزینه‌ها می‌شود و ضمن کاهش هزینه‌های تصفیه، انعطاف‌پذیری خوبی در بهبود کیفیت آب نشان می‌دهد. استفاده از این سناریو منجر به کارایی بالایی در کیفیت آب رودخانه و کاهش هزینه‌های مدیریت کیفیت سیستم رودخانه می‌شود.

در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود، اهداف تصمیم‌گیری توسعه یافته و سودمندی هر استراتژی در معیارهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و مدیریتی با استفاده از مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره و چند هدفه برای انتخاب سناریو برتر پرداخته شود. همچنین، مدل C-WLA در شرایط عدم قطعیت توسعه داده شود، تا اثر تغییرات اقلیمی و حساسیت پارامترهای تابع خسارت بر الگوی تخصیص بار

۷- مراجع

- Abbott MB, and Ionescu F (1967) On the numerical computation of nearly horizontal flows. *Journal of Hydraulic Research* 5(2):97-117
- Afkhami M, Shariat M, Jaafarzadeh N, Ghadiri H, and Nabizadeh R (2007) Regional water quality management for the Karun-Dez River basin, Iran. *Water and Environment Journal* 21(3):192-199
- Afshar A, and Masoumi F (2016) Waste load reallocation in river-reservoir systems: Simulation-optimization approach. *Journal of Environmental Earth Sciences* 75(1):75-53
- Afshar A, Masoumi F, and Sandoval Solis S (2018) Developing a reliability-based waste load allocation strategy for river-reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 144(9):52-64
- Ashtiani EF, Jamshidi S, Niksokhan H, and Ashtiani AF (2015) Value index, a novel decision making approach for waste load allocation. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 9(6):624-628
- Burn DH, and Yulianti JS (2001) Waste-load allocation using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127(2):121-129
- Cardwell H, and Ellis H (1993) Stochastic dynamic programming models for water quality management. *Water Resources Research* 29(4):803-813
- Delavar M, Morid S, and Moghadasi M (2015) Optimization of water allocation in irrigation networks considering water quantity and quality constrains, Case study: Zayandehroud Irrigation Networks. *Journal of Iran-Water Resources Research* 11(2):84-96 (In Persian)
- Eberhart R, and Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. *MHS'95, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science Nagoya, Japan*, 39-43 pp
- Eberhart RC, and Shi Y (1998) Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. *Springer* 611-616 pp
- Fakouri B, Mazaheri M, and Samani JM (2018) Management scenarios methodology for salinity control in rivers (case study: Karoon River, Iran). *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 68(1):74-86
- Farjoudi ZS, Moridi A, and Mousavi Nadoushani SS (2019) Applying bankruptcy approach in allocating point and non-point pollution in rivers. *Journal of Iran-Water Resources Research* 15(2):88-97 (In Persian)
- Huang G, and Loucks DP (2000) An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty. *Civil Engineering Systems* 17(2):95-118
- Jamshidi A, Samani JMV, Samani H MV, Zanini A, Tanda MG, and Mazaheri M (2020) Solving Inverse Problems of Unknown Contaminant Source in Groundwater-River Integrated Systems Using a Surrogate Transport Model Based Optimization. *Journal of Water* 12(9):2415-2441
- Kanda EK, Kosgei JR, and Kipkorir EC (2015) Simulation of organic carbon loading using MIKE 11 model: A case of River Nzoia, Kenya. *Water Practice and Technology* 10(2):298-304
- Karamouz M (2005) Waste-load allocation model for seasonal river water quality management: Application of sequential dynamic genetic algorithms. *Journal of Scientia Iranica* 12(2):117-130
- Kashefipour SM, and Falconer RA (2002) Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research* 36(6):1596-160
- Khoshkam H, Saadatpour M, and Heidarzadeh N (2017) Single/multi waste load allocation in Gheshlagh River; Simulation-optimization approach. *Journal of Iran-Water Resources Research* 13(2):99-114 (In Persian)
- Li Y, and Huang G (2010) Dual-interval fuzzy stochastic programming method for long-term planning of municipal solid waste management. *Journal of Computing in Civil Engineering* 24(2):188-202
- Liebman JC, and Lynn WR (1966) The optimal allocation of stream dissolved oxygen. *Water Resources Research* 2(3):581-591
- Loucks DP, Revell CS, and Lynn WR (1967) Linear programming models for water pollution control. *Management Science* 14(4):166-181
- Maas EV, and Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103(2):115-134
- Mahjouri N (2015) Waste load allocation in rivers: A state of the art review and prospects for future studies. *Journal of Iran-Water Resources Research* 11(2):117-134 (In Persian)
- McNeal B, and Coleman N (1966) Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 30(3):308-312

- Meysami R and Niksokhan MH (2020) Evaluating robustness of waste load allocation under climate change using multi-objective decision making. *Journal of Hydrology* 588(2020):1-10
- Mujumdar P and Sasikumar K (2002) A fuzzy risk approach for seasonal water quality management of a river system. *Water Resources Research* 38(1):1-9
- Munns R and Termaat A (1986) Whole-plant responses to salinity. *Functional Plant Biology* 13(1):143-160
- Nikoo MR, Kerachian R, and Karimi A (2012) A nonlinear interval model for water and waste load allocation in river basins. *Water Resources Management* 26(10):2911-2926.
- Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A, and Azadnia AA (2013) Optimal water and waste-load allocations in rivers using a fuzzy transformation technique: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(3):2483-2502
- Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A, Azadnia AA, and Jafarzadegan K (2014) Optimal water and waste load allocation in reservoir-river systems: a case study. *Environmental Earth Sciences* 71(9):4127-4142
- Qin XS, Huang GH, Zeng GM, Chakma A, and Huang Y (2007) An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty. *European Journal of Operational Research* 180(3):1331-1357
- Qin X, Huang G, Chen B, and Zhang B (2009) An interval-parameter waste-load-allocation model for river water quality management under uncertainty. *Environmental Management* 43(6):999-1012
- Revelle CS, Loucks DP, and Lynn WR (1968) Linear programming applied to water quality management. *Water Resources Research* 4(1):1-9
- Revelli R, and Ridolfi L (2004) Stochastic dynamics of BOD in a stream with random inputs. *Advances in Water Resources* 27(9):943-952
- Saadatpour M and Afshar A (2007) Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation-optimization approach. *Water Resources Management* 21(7):1207-1224
- Saadatpour M, Afshar A, and Khoshkam H (2019) Multi-objective multi-pollutant waste load allocation model for rivers using coupled archived simulated annealing algorithm with QUAL2Kw. *Journal of Hydroinformatics* 21(3):397-410
- Sadak D, Ayyvaz MT, and Elçi A (2020) Allocation of unequally-weighted wastewater discharge loads using a simulation-optimization approach. *Journal of Hydrology* 589(2020):125-158
- Saremi A, Sedghi H, Manshouri M, and Kave F (2010) Development of multi-objective optimal waste model for Haraz River. *World Applied Sciences Journal* 11(8):924-929
- Sasikumar K, and Mujumdar P (1998) Fuzzy optimization model for water quality management of a river system. *Journal of Water Resources Planning and Management* 124(2):79-88
- Tung YK and Hathhorn WE (1990) Stochastic waste load allocation. *Ecological Modelling* 51(2):29-46
- Yandamuri S, Srinivasan K, and Murty Bhallamudi S (2006) Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(3):133-143
- Yu Y, Zhang H, and Lemckert C (2014) Salinity and turbidity distributions in the Brisbane River estuary, Australia. *Journal of Hydrology* 519:3338-3352
- Zhang M, Ni J, and Yao L (2018) Pigovian tax-based equilibrium strategy for waste-load allocation in river system. *Journal of Hydrology* 563:223-241
- Zhou X, Huang G, Zhu H, and Yan B, (2015) Two-stage chance-constrained fractional programming for sustainable water quality management under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(5):04014074
- Zolfagharipour MA and Ahmadi A (2016) A decision-making framework for river water quality management under uncertainty: Application of social choice rules. *Journal of Environmental Management* 183:152-16