



## Applying Bankruptcy Approach in Allocating Point and Non-Point Pollution in Rivers

S. Zare Farjoudi <sup>1\*</sup>, A. Moridi <sup>2</sup>,  
and S.S. Mousavi Nadoushani <sup>2</sup>

### Abstract

The optimal allocation of the dischargeable waste load to the pollutants is important for improving the quality of rivers. The purpose of this paper is applying some bankruptcy rules, one of the Game theory methods, to allocate the waste load to pollutant sources and attain the standard dissolved oxygen in Zarjub River, Gilan. Based on the proposed framework, a combination of QUAL2Kw model, particle swarm optimization algorithm and bankruptcy rules are used in this research. In this paper, particle swarm optimization algorithm has been used to optimize discharged contaminants from the point and non-point sources to the adjacent river under bankruptcy rules. The conclusion indicated the efficient application of the bankruptcy approach on maintaining the optimal level of oxygen at downstream. According to the research results, CEA and TAL rules discharge less waste load to the river. Also, based on the results methods are differentiated according to their appropriateness for high pollutant industries and low pollution industries.

**Keywords:** Waste Load Allocation, Particle Swarm Optimization, QUAL2Kw, Water River Quality Management.

Received: July 21, 2018

Accepted: December 15, 2018

## کاربرد رویکرد ورشکستگی در تخصیص بارهای آلاینده نقطه‌ای و گسترده در رودخانه

سحر زارع فرجودی <sup>۱\*</sup>، علی مریدی <sup>۲</sup>  
و سیدسعید موسوی ندوشنی <sup>۲</sup>

### چکیده

تخصیص بهینه بار آلودگی قابل تخلیه به منابع آلاینده در راستای بهبود شرایط کیفی رودخانه از مسائل حائز اهمیت می‌باشد. هدف این مقاله بکارگیری رویکرد ورشکستگی، یکی از زیرمجموعه‌های تئوری بازیها، جهت تخصیص بار آلودگی به منابع آلاینده و رسیدن به مقدار استاندارد اکسیژن محلول پایاب رودخانه زرچوب در گیلان است. بر این اساس در این تحقیق، از ترکیب مدل شبیه‌ساز کیفی QUAL2Kw، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و قوانین ورشکستگی استفاده شده است. در واقع در این تحقیق، مقادیر تخلیه آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای حاشیه رودخانه توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و باقی‌مانده‌های ورشکستگی تعیین گردید. نتایج نهایی بدست آمده بیانگر کاربرد مؤثر رویکرد ورشکستگی در دستیابی به حد مطلوب اکسیژن در پایاب رودخانه می‌باشد. این در حالی است که مقدار بار آلودگی ورودی به رودخانه در اثر بکارگیری این قیود تا حد بالایی کاهش یافته و تخلیه‌کنندگان را ملزم به تصفیه می‌کند. بر اساس نتایج بدست آمده برخی روشها مطلوب آلاینده‌های عمده و برخی دیگر روشها مطلوب واحدهای آلاینده کوچک می‌باشد ولیکن در تمام آنها استاندارد کیفیت رودخانه رعایت شده است.

**کلمات کلیدی:** تخصیص بار آلودگی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، QUAL2Kw، مدیریت کیفی رودخانه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۴/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۲۴

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering and Management, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s.zarefarjoudi@mail.sbu.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران - مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

آبی استفاده شده که یکی از آنها رویکرد ورشکستگی می‌باشد. در تحقیقی، قوانینی برای کنترل آلودگی کشاورزی با استفاده از راه‌حل چانه‌زنی ارائه شده و روش‌های ورشکستگی برای ایجاد مجوز تخصیص بکار رفته‌اند. نتایج حاکی از آن بودند که میزان تخصیص‌ها به قدرت چانه‌زنی هریک از ذی‌نفعان بستگی داشته و از طرف دیگر بیانگر این است که قوانین تخصیص براساس تفاسیر متفاوت از عدالت، اثرات گوناگونی بر حل این مسأله دارد (Kampas and White, 2003).

اختلاف موجود بر سر دریاچه خزر نیز به کمک رویکرد ورشکستگی مورد بررسی قرار گرفت و طبق آن تمام سهم نفت و گاز موجود در حوضه به نسبت مناسب بین ذی‌نفعان توزیع گردید. به علت کمبود منابع آب نسبت به تقاضا، حوضه قزل‌اوزن- سفیدرود با روش‌های ورشکستگی بررسی شده و روش‌های نسبی اصلاح شده<sup>۵</sup> (AP)، مقید به ضرر یکسان<sup>۶</sup> (CEL) و تلمود<sup>۷</sup> (TAL) برای تأمین نیاز کشاورزی مطلوب‌تر بوده‌اند (Madani et al., 2014). در تحقیقی، تخصیص آب حوضه زاینده‌رود براساس ورشکستگی نشان داد که روش‌های نسبی<sup>۸</sup> (P) و (AP) منجر به تقسیم مساوی آب شده و روش مقید به سود یکسان<sup>۹</sup> (CEA) به نفع طلبکاران با ادعای کمتر است (Mehrparvar, 2015). در تحقیقی بین‌مرزی، تخصیص کمی آب با بکارگیری روش ورشکستگی و نش غیرمقارن برای احیای تالاب هورالهویزه صورت گرفت. این تحقیق نشان داد اگرچه روش نش برای ایران سود بیشتری به همراه دارد؛ اما حتی با استفاده از روش ورشکستگی نیز می‌توان به هدف اصلی که احیای تالاب است دست یافت.

در این مقاله مدلی بر پایه روش ورشکستگی برای مدیریت کیفیت آب رودخانه ارائه گردیده است. در این مدل، مقادیر بهینه توابع هدف رویکرد ورشکستگی با استفاده از تلفیق مدل شبیه‌سازی کیفیت آب QUAL2Kw و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۰</sup> (PSO) تعیین می‌گردد و هدف بررسی تأثیر قوانین ورشکستگی بر بار آلودگی قابل تخلیه در رسیدن به DO استاندارد می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

با وجود سطح بالای آلودگی‌های موجود در حاشیه رودخانه‌ها و اهمیت این منابع طبیعی در تأمین نیازهای آبی، بررسی شاخص‌های کیفی آنها الزامی است. در این مقاله چندی از روش‌های ورشکستگی و یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی ارائه شده تا با استفاده از آن نتایج قوانین مختلف این رویکرد همکارانه از تئوری بازی بررسی گردد. در این راستا

هدف اصلی مدیریت کیفی رودخانه، برنامه‌ریزی جهت بهبود شرایط کیفی آن و رسیدن به حد استاندارد می‌باشد. در اکثر مدل‌های رایج برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی رودخانه‌ها، میزان مجاز تخلیه فاضلاب هر آلاینده براساس دو هدف کاهش هزینه‌های تصفیه و یا کاهش تخطی پارامترهای کیفی از حد استاندارد تعیین می‌گردد. در این راستا بکارگیری مدل‌های شبیه‌ساز به همراه الگوریتم‌های بهینه‌سازی از متعارف‌ترین و کارآمدترین رویکردهای ارتقا و بهبود سطح زیست‌محیطی و اقتصادی طرفین درگیر می‌باشد.

اولین تحقیقات در حوضه تخصیص بار آلودگی برای کمینه‌سازی سطح تصفیه اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی<sup>۱</sup> ( $BOD_5$ ) جهت دستیابی به اکسیژن محلول<sup>۲</sup> (DO) استاندارد توسط Liebman and Lynn (1966) انجام شده است. از مدل بهینه‌سازی فازی برای رودخانه‌ای فرضی جهت مدیریت کیفیت آب به صورت فصلی استفاده کرده و در تحقیقی دیگر مدل بهینه‌سازی فازی با الگوریتم ژنتیک نیز برای تخصیص بار آلودگی ارائه گردیده است (Pour et al., 2005). در این زمینه، مسأله چندهدفه بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی رودخانه‌ای نیز با الگوریتم جامعه مورچگان<sup>۳</sup> (ACO) (Mostafavi and Afshar, 2011) و یک مدل دو هدفه قطعی با الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب<sup>۴</sup> (NSGA-II) برای تخصیص هم‌زمان بار آلودگی و آب توسعه داده شده است (Liu et al., 2014). در مدلی دو هدفه تحت الگوریتم ژنتیک نیز، بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی با در نظر قرار دادن شاخص‌های فازی صورت گرفته است (Mahjouri and Abbasi, 2015). در تحقیقی بر زرجوب (Bizhani-Manzar and Mahjouri, 2014) بکارگیری سناریوهای مرکب از تصفیه کامل و تصفیه مقدماتی به منابع آلاینده، بار آلودگی ( $BOD_5$ ) را جهت دستیابی به (DO) مطلوب اختصاص دادند. (Mahjouri, 2015) تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه انواع شرایط تخصیص بار آلودگی انجام داده که در آن روش‌های بهینه‌سازی، مدل‌های شبیه‌ساز کیفی، روش‌های عدم قطعیت و نحوه برخورد طرفین ذی‌نفع در سیستم آبی را بررسی و طبقه‌بندی نمود. (Hosseinzadeh et al., 2010) در مطالعات خود بر رودخانه ویلمیت از الگوریتم بهینه‌سازی برای تخصیص بار آلودگی با سه هدف متفاوت از جمله حداقل‌سازی هزینه تصفیه، تخطی اکسیژن محلول و شاخص بی‌عدالتی استفاده نمود و نتایجی با قابلیت اجرایی بدست آورد.

در بسیاری از تحقیقات اخیر، از روش‌های همکارانه تئوری بازی در راستای ایجاد عدالت و سازش میان ذی‌نفعان درگیر در سیستم‌های

ماکزیم پتانسیل آلودگی آن واحد که نهایتاً  $BOD_5$  اولیه است نزدیک شود تا بتواند  $DO$  پایاب را به مقدار مورد نظر برساند (معادله ۲). این روش همواره به نفع منابع آلاینده خرده (با ادعای کم) است.

$$Pollution_i^{new} = \min(\alpha_i, Pollution_i^{old}) \quad (2)$$

در اینجا  $\alpha_i$  بیشینه آلودگی قابل تخلیه برای آلاینده‌ها به ازای روش CEA،  $Pollution_i^{new}$  غلظت آلاینده هر منبع پس از اعمال رویکرد ورشکستگی و  $Pollution_i^{old}$  غلظت آلاینده خروجی از منبع  $i$  به رودخانه پیش از تصفیه است.

### ۲-۲-۲-۲ قانون مقید به ضرر یکسان (CEL Rule)

به کمک این قانون، سیستم به مقدار مساوی از غلظت آلاینده،  $BOD_5$ ، هر یک از منابع می‌کاهد تا غلظت اکسیژن محلول در نقطه کنترل به حد استاندارد برسد. در این حالت غلظت آلاینده هر منبع به مقدار مینیمم ممکن می‌رسد (معادله ۳). این روش همواره به نفع منابع آلاینده بزرگ (با ادعای زیاد) می‌باشد.

$$Pollution_i^{new} = \max(0, Pollution_i^{old} - \alpha_i) \quad (3)$$

در اینجا  $\alpha_i$  غلظتی که باید از آلاینده‌ها به ازای روش CEA کاسته شود،  $Pollution_i^{new}$  غلظت آلاینده هر منبع پس از اعمال رویکرد ورشکستگی و  $Pollution_i^{old}$  غلظت آلاینده خروجی از منبع  $i$  به رودخانه پیش از تصفیه هستند.

### ۲-۲-۲-۳ قانون ورشکستگی نسبی (P Rule)

در این روش از میزان غلظت آلودگی هر یک از منابع آلاینده به یک نسبت کاسته می‌شود. قانون نسبی بیانگر رویکردی است که در آن تمام منابع درصدی معین از مقدار آلاینده‌های خود را به رودخانه وارد می‌کنند و رابطه آن در معادله ۴ نمایش داده شده است (Mianabadi et al., 2014).

$$Pollution_i^{new} = \alpha_i * Pollution_i^{old} \quad (4)$$

در این قانون  $\alpha_i$  درصد غلظتی است که از منابع آلاینده به ازای روش P تخلیه می‌شود،  $Pollution_i^{new}$  غلظت آلاینده هر منبع پس از اعمال رویکرد ورشکستگی،  $Pollution_i^{old}$  غلظت آلاینده خروجی از منبع  $i$  به رودخانه پیش از تصفیه می‌باشد.

### ۲-۲-۲-۴ قانون تلمود (TAL Rule)

در این روش که ترکیبی از روش‌های نزدیک به سود یکسان و ضرر یکسان به کار گرفته می‌شود، سهم هر بازیکن براساس برقراری یکی از شروط مربوطه محاسبه می‌گردد (معادله ۵ و ۶):

از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی تغییرات کیفیت آب در رودخانه و از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای تعیین بار آلودگی قابل تخلیه به رودخانه استفاده شده است.

### ۲-۱-۲ مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw

مدل QUAL2Kw شامل معادله حاکم تعادل جرمی برای غلظت مواد موجود در رودخانه می‌باشد که غلظت متغیرهای کیفیت آب را به صورت عددی و براساس زمان و مکان محاسبه کرده و روش عددی حاکم در آن تفاضل محدود است (معادله ۱). سیستم کالیبراسیون خودکار این مدل که براساس الگوریتم ژنتیک می‌باشد جهت افزایش نکویی برازش نتایج محاسباتی و مشاهداتی بکار می‌رود. مدل QUAL2Kw انتقال و زوال آلاینده‌های متداول را برای مدل‌سازی یک بعدی رودخانه در حالت غیریکنواخت، دائم شبیه‌سازی می‌نماید و معادلات حاکم در روند محاسبه  $DO$  و  $BOD_5$  نیز استریتر-فلپس می‌باشند.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial(AD \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} - Q \frac{\partial C}{\partial x} - KC + S_C \quad (1)$$

که  $C$  غلظت مؤلفه موردنظر ( $g/m^3$ )،  $V$  حجم آب رودخانه ( $m^3$ )،  $U$  سرعت متوسط رودخانه ( $m/d$ )،  $D$  ضریب پخشیدگی ( $m^2/d$ )،  $A$  مساحت مقطع مصب رودخانه ( $m^2$ )،  $S_C$  منابع ورودی و خروجی خارجی مؤلفه  $c$  ( $g/m^3/d$ )،  $t$  زمان ( $d$ ) و  $x$  فاصله هر بازه رودخانه ( $m$ ) (در جهت جریان) است (Chapra and Pelletier, 2003; Kannel et al., 2007).

### ۲-۲-۲ تخصیص بار آلودگی با استفاده از رویکرد ورشکستگی

عدالت و کارامدی بازتخصیص منابع آبی داخلی و مرزی میان ذی‌نفعان، یک مسأله پیچیده و اختلاف‌برانگیز است. یکی از روش‌های تحلیلی که در مناقشات تخصیص منابع استفاده می‌شود تئوری ورشکستگی است. هدف از این روش، توزیع دارایی در میان طلبکاران درحالی‌که است که دارایی موجود برای برآورده کردن تمام طلب مدعیان کافی نیست. از متداول‌ترین قوانین ورشکستگی می‌توان به قانون مقید به ضرر یکسان (CEL)، مقید به سود یکسان (CEA)، نسبی (P) و تلمود (TAL) که به سهم مساوی از ادعاها، ضررها و سودها می‌رسند اشاره کرد (Herrero and Villar, 2001).

### ۲-۲-۱-۱ قانون مقید به سود یکسان (CEA Rule)

در این قانون مقدار غلظت قابل تخلیه توسط واحدهای آلاینده در سیستم به تدریج و بطور مساوی از صفر افزایش می‌یابد تا غلظت آلاینده قابل تخلیه یعنی  $BOD_5$  توسط هر یک از منابع آلاینده به

$$\text{Pollution}_i^{\text{new}} = \text{CEA}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}})$$

$$\text{if } \text{DO}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}}) \leq \text{DO}_{\text{sta}} \quad (5)$$

$$\text{Pollution}_i^{\text{new}} = 0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}} + \text{CEL}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}})$$

$$\text{if } \text{DO}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}}) > \text{DO}_{\text{sta}} \quad (6)$$

رود باعث از بین رفتن گونه‌های گیاهی و جانوری زیادی در منطقه، بویژه تالاب، نیز گردیده است. آنچه در روند اجرای این تحقیق تأثیرگذار است یازده منبع آلاینده نقطه‌ای و هفت منبع غیرنقطه‌ای است که در بازه‌های مختلفی از پایین‌دست و طول رودخانه مستقر بوده و با مقادیر مختلفی از دبی،  $\text{BOD}_5$  و  $\text{DO}$  پساب خود را تخلیه می‌نمایند و در نقطه کنترلی میزان  $\text{DO}$  را تا کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسانند. دبی مورد استفاده در این تحقیق مربوط به ماه مهر بوده و اطلاعات منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است (IWPC Technical Report, 2010; (Niksokhan et al., 2009).

در معادلات بالا،  $\text{CEA}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}})$  بیانگر قانون مقید به سود یکسان می‌باشد که در آن  $\text{Pollution}_i^{\text{old}}$  با  $0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}}$  و  $\text{CEL}(0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}})$  قانون مقید به ضرر یکسان را بیان می‌نماید که در آن  $0.5\text{Pollution}_i^{\text{old}}$  جایگزین  $\text{Pollution}_i^{\text{old}}$  گردیده است (Moreno and Villar, 2006).

### ۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات یک روش کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان به مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای  $n$  بعدی می‌باشد پاسخ داد. البته پاسخ بدست آمده لزوماً بهترین پاسخ ممکن نیست. در این الگوریتم، ذرات با یک سرعت ابتدایی در فضای پاسخ حرکت کرده و نتایج بر اساس معیار شایستگی محاسبه می‌گردند. در هر گام ذرات برتر مشخص شده و طبق روابط مشخصی و بر اساس بهترین موقعیت یافت شده توسط خودشان یا کل دسته به نقطه بعدی حرکت می‌کنند. این فرآیند تکرار شده و غالباً در انتها به یک راه حل مناسب منتج می‌گردد. در این میان با تغییر موقعیت ذرات، سرعت آنها نیز همواره تغییر خواهد نمود (Clerc, 2006). رابطه تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق که در کنار قیود رویکرد ورشکستگی مورد استفاده قرار گرفت به صورت زیر نگاشته شده است (معادله ۷):

$$z = (\text{DO}_c - \text{DO}_{\text{sta}})^2 \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $z$  تابع هدف،  $\text{DO}_c$  اکسیژن محلول نقطه کنترلی در پایین‌دست رودخانه و  $\text{DO}_{\text{sta}}$  اکسیژن محلول استاندارد (۵ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد. متغیر تصمیم مورد نظر در این تحقیق همان  $\alpha_i$  در قوانین ورشکستگی می‌باشد که باید  $z$  را به کمترین مقدار میل دهد.

### ۴-۲- معرفی محدوده مطالعاتی

طبق شکل ۱، محدوده مطالعاتی شامل بخشی از رودخانه سیاهرود با نام زرچوب و به طول تقریباً ۲۴ کیلومتر می‌باشد. این رودخانه در حومه و داخل شهر رشت از جنوب به شمال حرکت می‌نماید و پس از تالاب انزلی به دریای خزر می‌ریزد. میانگین دبی سالانه زرچوب ۵۹ میلیون متر مکعب می‌باشد. در دهه اخیر این رود دچار آلودگی قابل توجهی شده که دلیل اصلی آن پذیرش مستقیم و زیاد فاضلاب‌های شهری و پساب کشاورزی ناشی از زهاب همراه سموم و کود شیمیایی است. فاضلاب کارخانه‌ها و حوضه مصرف شهری و روستایی بدون فرآیند تصفیه به رودخانه تخلیه شده و آلودگی خود را به دریا نیز منتقل می‌کنند. این مسئله علاوه بر بروز مشکلات جدی برای ساکنین حاشیه

### ۵-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی کیفی

نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ آمده است. در شکل ۲ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و تغییرات  $\text{DO}$  در رودخانه نشان‌دهنده کالیبراسیون مدل با دقت مناسب است. شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی  $\text{DO}$  را در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین ۰/۹۲ نشان‌دهنده نتایج مناسب مرحله کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی کیفی می‌باشد.

علاوه بر کالیبراسیون  $\text{DO}$ ، از داده‌های  $\text{BOD}_5$  نیز برای صحت‌سنجی مدل استفاده و مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مقایسه گردیده‌اند. شکل ۴ و ۵ نتایج صحت‌سنجی مدل برای این متغیر را نمایش می‌دهد. مقدار ضریب تعیین بدست آمده برای صحت‌سنجی دقت مدل در شبیه‌سازی  $\text{BOD}_5$  مساوی ۰/۸۴ بوده که نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی می‌باشد.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

در این تحقیق میزان غلظت قابل تخلیه توسط هر یک از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به ازای رویکردهای مختلف روش ورشکستگی تعیین شده و در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. بدین منظور غلظت  $\text{DO}$  نقطه پایاب به عنوان قید بهبود کیفیت آب در نظر گرفته شده و حد استاندارد آن ۵ میلی‌گرم بر لیتر فرض گردیده و در انتها، نتایج بهینه‌سازی به ازای چهار روش ورشکستگی به منظور کمینه‌سازی تخطی  $\text{DO}$  نقطه کنترلی از حد استاندارد اجرا و بررسی شده است. شاخص بار آلودگی تخلیه شده به رودخانه،  $\sum (\text{BOD}_5 * Q)$ ، به ازای تمام آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای محاسبه شده و به‌عنوان یکی

۶ مقادیر DO نقطه کنترلی حاصل از چهار قانون P، CEL، CEA و TAL به ترتیب ۴/۵۹، ۴/۹، ۵ و ۴/۹۹ میلی گرم بر لیتر می باشد و نزدیکی قابل قبول آنها دلیلی بر عملکرد مناسب مدل شبیه ساز- بهینه ساز مورد استفاده است.

نتایج حاصل از بهینه سازی که در جدول ۳ آمده است در اشکال ۷ و ۸ نیز بصورت مجزا به تصویر کشیده شده اند. شکل ۷ مقدار BOD<sub>5</sub> قابل تخلیه را قبل و پس از اعمال بهینه سازی برای چهار حالت ممکن در منابع نقطه ای نشان می دهد.

از معیارهای سنجش جهت انتخاب روش مناسب به سود ذی نفعان استفاده گردیده و در ردیف انتهایی جدول ۳ نگاشته شده است.

طبق شاخص موجود در جدول ۳، روش های CEL، TAL و CEL که به ترتیب بار آلودگی تولیدی بیشتری را به رودخانه وارد می کنند روش های بهتری برای منابع آلاینده در نظر گرفته شده و روش P که کمترین مقدار بار آلودگی را به رودخانه منتقل می کند اولویت سه روش دیگر را ندارد. البته روش P به دلیل تولید آلودگی کمتر منجر به رسیدن به DO مطلوب تری را در نقطه کنترلی نیز می شود. بر اساس شکل

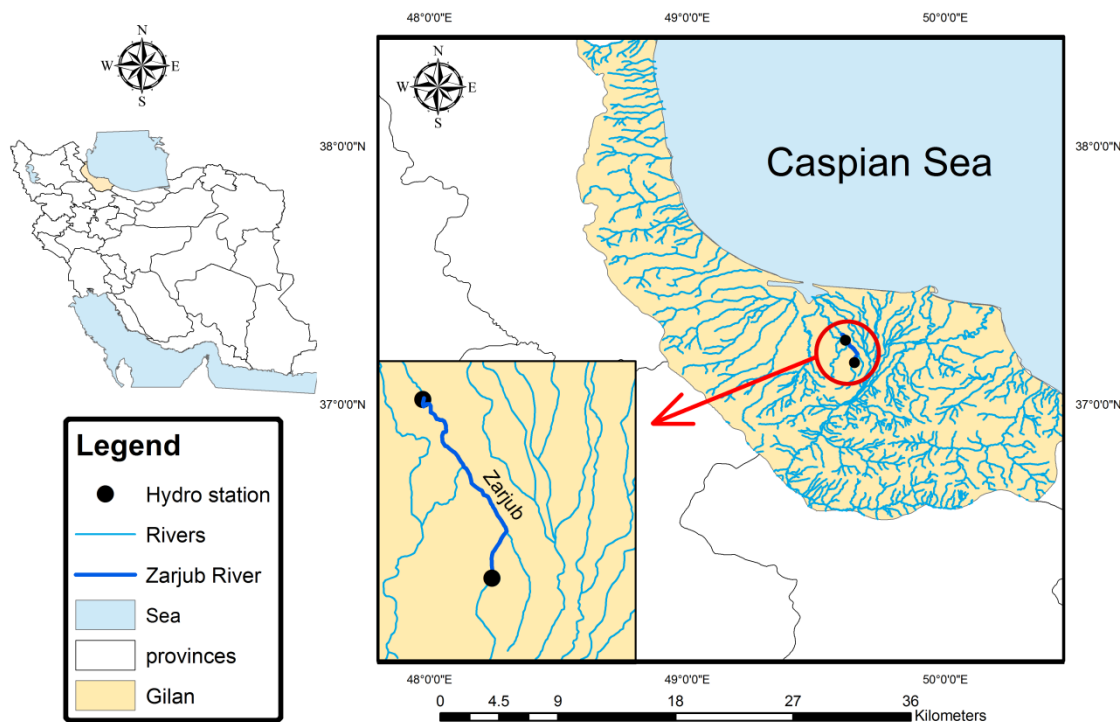


Fig. 1- Zarjub River location  
شکل ۱- موقعیت رودخانه زرjub

Table 1- Characteristics of point source pollution discharged to the Zarjub River (IWPC Technical Report, 2010)

جدول ۱- مشخصات آلودگی منابع نقطه ای تخلیه شده رودخانه زرjub (IWPC Technical Report, 2010)

| Pollutant number | Distance from upstream (m) | Inflow (m <sup>3</sup> / s) | BOD <sub>5</sub> (mg / l) | DO (mg / l) | Organic Nitrogen (mg / l) | Ammonia (mg / l) | Ammonium (mg / l) | Organic Phosphorous (mg / l) | Soluble Phosphorus (mg / l) |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1                | 436                        | 0.083                       | 100                       | 8.0         | 130                       | 5                | 20                | 0.4                          | 0.04                        |
| 2                | 7500                       | 0.291                       | 8                         | 7.32        | 15.33                     | 0.39             | 1.722             | 0.061                        | 0.04                        |
| 3                | 10350                      | 0.05                        | 130                       | 3.0         | 200                       | 10               | 200               | 2                            | 0.05                        |
| 4                | 11251                      | 0.05                        | 120                       | 3.0         | 220                       | 10               | 0.5               | 2                            | 0.05                        |
| 5                | 13400                      | 0.023                       | 180                       | 3.0         | 250                       | 10               | 0.5               | 4                            | 0.05                        |
| 6                | 18200                      | 0.05                        | 90                        | 2.00        | 120                       | 25               | 1                 | 4                            | 0.1                         |
| 7                | 18400                      | 0.05                        | 110                       | 0.00        | 30                        | 40               | 1                 | 2                            | 0.1                         |
| 8                | 19200                      | 0.05                        | 90                        | 0.00        | 50                        | 50               | 1                 | 2                            | 0.1                         |
| 9                | 21000                      | 0.067                       | 100                       | 0.00        | 50                        | 50               | 1                 | 4                            | 0.1                         |
| 10               | 23700                      | 0.07                        | 180                       | 0.00        | 100                       | 20               | 1                 | 1                            | 0.2                         |
| 11               | 24000                      | 0.079                       | 180                       | 0.00        | 100                       | 30               | 1                 | 0.5                          | 0.2                         |

Table 2- Characteristics of Non-point source pollution discharged to the Zarjub River (IWPC Technical Report, 2010)

جدول ۲- مشخصات آلودگی منابع غیرنقطه‌ای تخلیه شده رودخانه زرjub (IWPC Technical Report, 2010)

| Pollutant number | Length (m) | Inflow (m <sup>3</sup> / s) | DO (mg / l) | BOD <sub>5</sub> (mg / l) |
|------------------|------------|-----------------------------|-------------|---------------------------|
| 1                | 5.336      | 0.4                         | 9.00        | 7.00                      |
| 2                | 2.943      | 0.15                        | 8.00        | 0.00                      |
| 3                | 4.341      | 2.32                        | 3.00        | 5.00                      |
| 4                | 2.018      | 0.95                        | 0.00        | 70.00                     |
| 5                | 2.950      | 1.4                         | 0.00        | 100.00                    |
| 6                | 2.581      | 3                           | 0.00        | 33.00                     |
| 7                | 0.473      | 4.12                        | 0.50        | 5.00                      |

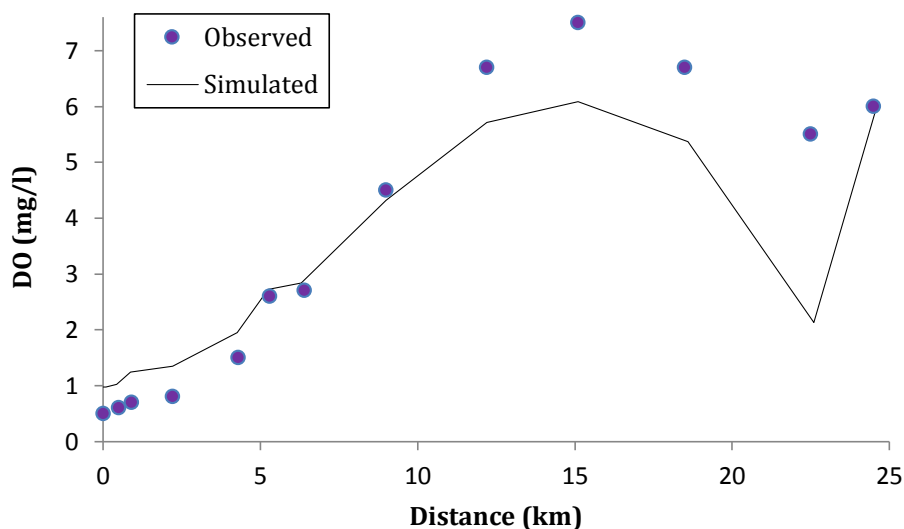


Fig. 2- DO variation along Zarjub River  
شکل ۲- تغییرات DO در طول رودخانه زرjub

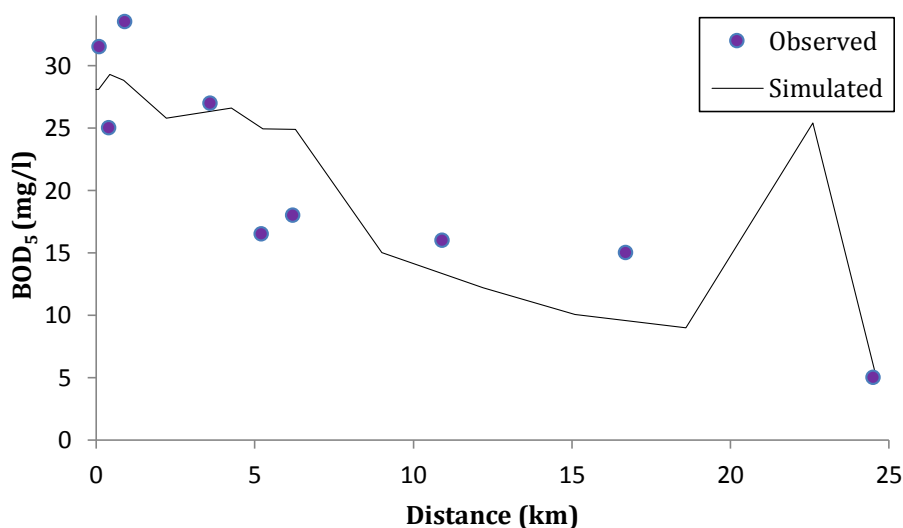


Fig. 3- BOD<sub>5</sub> variation along Zarjub River  
شکل ۳- تغییرات BOD<sub>5</sub> در طول رودخانه

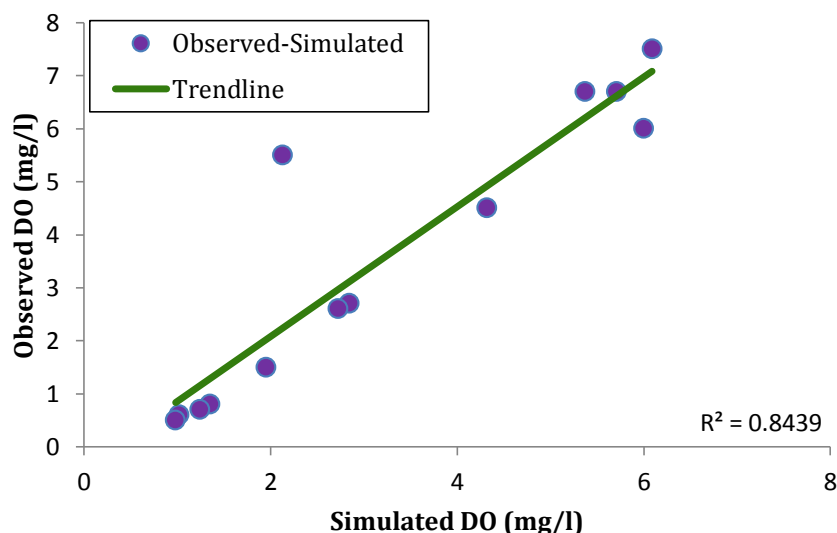


Fig. 4- DO calibration in Zarjub River  
 شکل ۴- کالیبراسیون DO رودخانه زرجوب

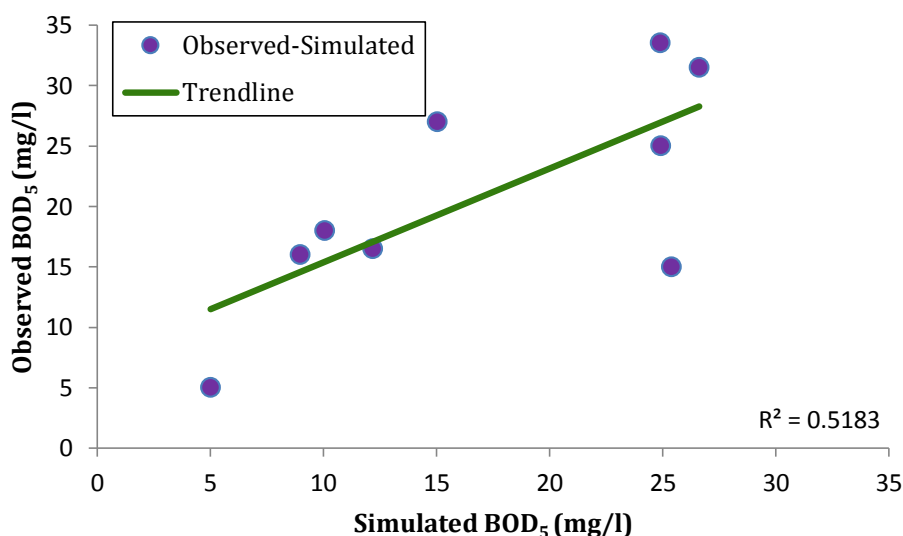


Fig. 5- BOD<sub>5</sub> validation in Zarjub River  
 شکل ۵- صحت‌سنجی BOD<sub>5</sub> رودخانه زرجوب

طی بکارگیری قانون مقید به سود یکسان و تلمود، تمامی آلاینده‌ها مجاز به تخلیه یک مقدار ثابت بودند و از نتایج می‌توان دریافت که روش مقید به سود یکسان به نفع منابع آلاینده جزء بوده و بیشترین سطح تصفیه متوجه منابع آلاینده با حجم کلان است که در واقع اکثر منابع آلاینده نقطه‌ای را شامل می‌شود. روش تلمود هم با توجه به اینکه از روابط مشابه با سود یکسان ولی به ازای نصف آلودگی‌ها اجرا گردیده، نتایج مشابه با روش مقید به سود یکسان را ارائه داده است. از آنجایی که روش نسبی به تمام منابع آلاینده درصد یکسانی را اختصاص داده است هیچ کدام از آنها نسبت به دیگری دچار سود و

شکل ۸ همان موارد را برای منابع غیرنقطه‌ای ترسیم می‌کند. بررسی جدول ۳ و بار آلودگی خروجی آنها به رودخانه حاکی از مناسب بودن روش‌های CEA و TAL در رودخانه زرجوب می‌باشد. روش CEA مقدار بار آلودگی را از ۲۵۷/۹۶ به ۵۲/۴۸ می‌رساند. با این حال نقطه کنترلی حاصل از این روش، مقادیر کمتری را نسبت به سه روش دیگر پوشش داده و عملکرد ضعیف‌تری برای تأمین DO داشته است. در شکل ۷ می‌توان دید که مقادیر BOD<sub>5</sub> اولیه برای غالب آلاینده‌های نقطه‌ای بالا بوده و همین امر منجر به کاهش DO پایاب قبل از اعمال بهینه‌سازی گردیده است.

برخلاف سه روش قبلی، در روش مقید به ضرر یکسان، آلاینده‌هایی که مقدار آلودگی بیشتری را به رودخانه تخلیه می‌کردند قادر به تخلیه آلودگی بیشتر بودند. در واقع این روش، منابع آلودگی کوچکتر را مجبور به تصفیه همه یا بخش اعظمی از پساب خود کرده و منابع کلان همچنان بخش زیادی از آلودگی خود را به رودخانه می‌ریزند.

شکل ۸ بیانگر نتیجه بهینه‌سازی برای آلاینده‌های غیرنقطه‌ای می‌باشد که از نظر اصولی شبیه به آلاینده‌های نقطه‌ای عمل کرده‌اند. البته با توجه به اینکه  $BOD_5$  اولیه منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در مقایسه با نقطه‌ای بسیار کم است، جز دو مورد، به طور کلی تغییرات همچون حالت نقطه‌ای محسوس نمی‌باشد.

بکارگیری رویکرد ورشکستگی به همراه بهینه‌سازی در وضعیت موجود رودخانه نشان داده که با همه روش‌های مذکور به DO مطلوب می‌توان دست یافت. از نتایج مهم بکارگیری این متدولوژی، کاهش قابل توجه حجم آلودگی تخلیه شده به رودخانه می‌باشد. مطلب دیگری که از جدول ۳ قابل مشاهده است، کاهش شدید بار آلودگی پساب قابل تخلیه توسط منابع غیرنقطه‌ای است که به مقادیر بسیار کم و حتی صفر تنزل می‌یابد.

ضرر نشده‌اند که با توجه به نمودار ترسیم شده می‌توان دریافت درصد بسیار کمی بوده است.

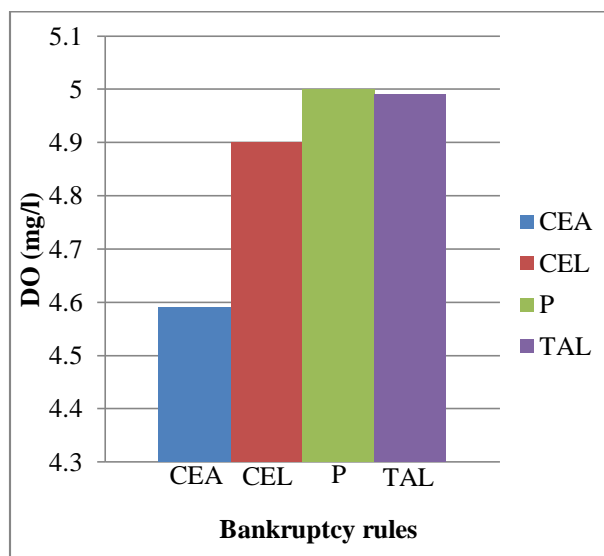


Fig. 6- DO resulted from Bankruptcy rules  
شکل ۶- DO حاصل از بهینه‌سازی در قوانین ورشکستگی

Table 3- Permitted  $BOD_5$  concentration discharged from pollution sources based on bankruptcy rules  
جدول ۳- غلظت  $BOD_5$  قابل تخلیه از نقاط آلاینده تحت قوانین ورشکستگی

| Pollutant           | Number | $BOD_5$ (mg / l) |       |       |      |       |
|---------------------|--------|------------------|-------|-------|------|-------|
|                     |        | old              | CEA   | CEL   | P    | TAL   |
| Point               | 1      | 100              | 4.97  | 0.87  | 5    | 1.97  |
|                     | 2      | 8                | 4.97  | 0     | 0.4  | 1.97  |
|                     | 3      | 130              | 4.97  | 30.87 | 6.5  | 1.97  |
|                     | 4      | 120              | 4.97  | 20.87 | 6    | 1.97  |
|                     | 5      | 180              | 4.97  | 80.87 | 9    | 1.97  |
|                     | 6      | 90               | 4.97  | 0     | 4.5  | 1.97  |
|                     | 7      | 110              | 4.97  | 10.87 | 5.5  | 1.97  |
|                     | 8      | 90               | 4.97  | 0     | 4.5  | 1.97  |
|                     | 9      | 100              | 4.97  | 0.87  | 5    | 1.97  |
|                     | 10     | 180              | 4.97  | 80.87 | 9    | 1.97  |
|                     | 11     | 180              | 4.97  | 80.87 | 9    | 1.97  |
| Non-point           | 1      | 7                | 4.97  | 0     | 0.35 | 1.97  |
|                     | 2      | 0                | 0     | 0     | 0    | 0     |
|                     | 3      | 5                | 4.97  | 0     | 0.25 | 1.97  |
|                     | 4      | 70               | 4.97  | 0     | 3.5  | 1.97  |
|                     | 5      | 100              | 4.97  | 0.87  | 5    | 1.97  |
|                     | 6      | 33               | 4.97  | 0     | 1.65 | 1.97  |
|                     | 7      | 5                | 4.97  | 0     | 0.25 | 1.97  |
| $\Sigma(BOD_5 * Q)$ |        | 257.96           | 52.48 | 17.43 | 12.9 | 20.79 |



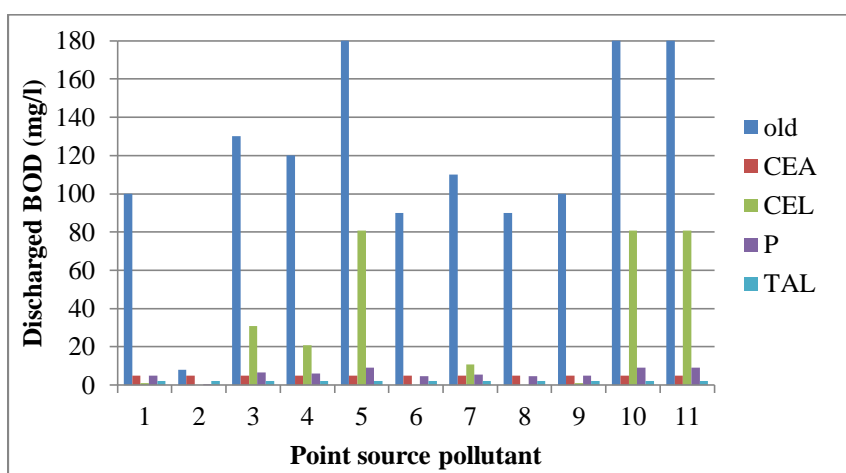


Fig. 7- Dischargeable BOD<sub>5</sub> concentration from point source pollutants based on bankruptcy rules  
 شکل ۷- غلظت BOD<sub>5</sub> قابل تخلیه از منابع آلاینده نقطه‌ای تحت قوانین ورشکستگی

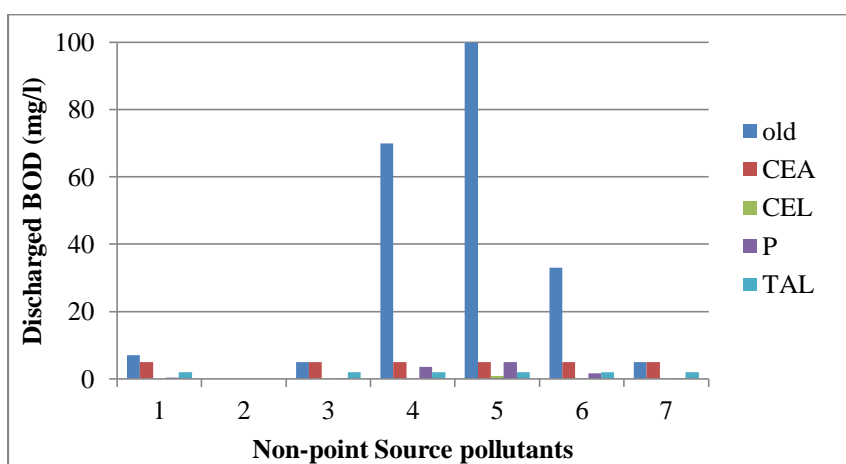


Fig. 8- Dischargeable BOD<sub>5</sub> concentration from Non-Point source pollutants based on bankruptcy rules  
 شکل ۸- غلظت BOD<sub>5</sub> قابل تخلیه از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای تحت قوانین ورشکستگی

به رودخانه تخلیه شده است. برداشت دیگری که از نتایج بدست آمده می‌توان داشت تأثیر بالای آلاینده‌های گسترده است که بخش اعظم آنها در انتهای رودخانه قرار دارند و می‌توانند DO پایاب را به شدت تحت تأثیر قرار دهند.

روش CEA به نفع منابع آلاینده جزء بوده و منجر به تصفیه بیشتر آلودگی توسط منابع آلاینده بزرگ می‌شود. در حالی که روش CEL منابع آلودگی کوچکتر را مجبور به تصفیه همه یا بخش اعظمی از پساب می‌نماید و آلاینده‌های کلان سود می‌برند. روش P همه منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای را مجاب به تخلیه درصد مشخصی به رودخانه می‌نماید و روش تلمود شرایط را به سمت سود یکسان سوق خواهد داد. طبق نتایج این تحقیق با روش‌های CEA و TAL بار آلودگی

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله از یک متدولوژی جدید برای تخصیص بار آلودگی به منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای حاشیه رودخانه زرجوب استفاده شده است. این متدولوژی شامل رویکرد ورشکستگی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مدل شبیه‌ساز QUAL2Kw می‌باشد. توسط این تحقیق، برای اولین بار رویکرد ورشکستگی جهت حل اختلاف تخصیص بار آلودگی در حوضه مدیریت کیفی رودخانه مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از اتصال مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و همچنین انتخاب چهار قانون CEA، CEL، P و TAL به‌عنوان قیود مدل، سهم تخلیه هر یک از منابع آلاینده بدست آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد روش TAL بیش از سایر روش‌ها به DO مطلوب رسیده و در روش CEA بیشترین مقدار بار آلودگی

Liebman JC, Lynn WR (1966) The optimal allocation of stream dissolved oxygen. *Water Resources Research* 2(3):581-91

Liu D, Guo S, Shao Q, Jiang Y, Chen X (2014) Optimal allocation of water quantity and waste load in the Northwest Pearl River Delta, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28(6):1525-42

Madani K, Sheikhmohammady M, Mokhtari S, Moradi M, Xanthopoulos P (2014) Social planner's solution for the Caspian Sea conflict. *Group Decision and Negotiation* 23(3):579-96

Mahjouri N (2015) Waste load allocation in rivers: A state of the art review and prospects for future studies. *Iran-Water Resources Research* 2:117-134

Mahjouri N, Abbasi MR (2015) Waste load allocation in rivers under uncertainty: application of social choice procedures. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(2):5

Mehrparvar M, Ahmadi A (2015) River water allocation with bankruptcy methods, Case study: (Zaiandehrood River). The 8th National Congress on Civil Engineering, Babol Industrial University (In Persian)

Mianabadi H, Mostert E, Zarghami M, Van de Giesen N (2014) A new bankruptcy method for conflict resolution in water resources allocation. *Journal of Environmental Management* 144:152-9

Moreno-Ternero JD, Villar A (2006) The TAL-family of rules for bankruptcy problems. *Social Choice and Welfare* 27(2):231-49

Mostafavi SA, Afshar A (2011) Waste load allocation using non-dominated archiving multi-colony ant algorithm. *Procedia Computer Science* 3:64-9

Mujumdar PP, Sasikumar K (2002) A fuzzy risk approach for seasonal water quality management of a river system. *Water Resources Research* 38(1)

Niksokhan MH, Kerachian R, Amin P (2009) A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems. *Environmental Monitoring and Assessment* 154(1-4):219

Pour MS, Afshar A, Haddad OB (2005) Simulation-optimization model for fuzzy waste load allocation. In Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Evolutionary computing (pp. 384-391), World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)

کمتری به رودخانه تخلیه شده است. برای ادامه و گسترش این تحقیق، بکارگیری روش‌های دیگر ورشکستگی توصیه می‌گردد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Biochemical Oxygen Demand
- 2- Dissolved Oxygen
- 3- Ant Colony Algorithm
- 4- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
- 5- Adjusted Proportional
- 6- Constrained Equal Loss
- 7- Talmud
- 8- Proportional
- 9- Constrained Equal Award
- 10- Particle Swarm Optimization

#### ۵- مراجع

Banihabib M E, Najafi Marghmaleki S (2018) Assessment of game and bankruptcy theories to supply environmental water of Hawizeh Wetland. *Iran-Water Resources Research* 14(2):12-22

Bizhani-Manzar M, Mahjouri N (2014) Waste load allocation in Zarjub River: Application of borda scoring social choice and Nash bargaining methods. *Iran-Water Resources Research* 9(3):59-74

Chapra SC, Pelletier GJ, Tao H (2003) QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and users manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.

Clerc M (2006) Particle swarm optimization. ISTE, London

Herrero C, Villar A (2001) The three musketeers: four classical solutions to bankruptcy problems. *Mathematical Social Sciences* 42(3):307-28

Hosseinzadeh H, Afshar A, Sharifi F (2010) Multiobjective waste load allocation using multicolony ant algorithm. *Iran-Water Resources Research* 6(1):1-13

IWPC (Iran's Water and Power Resources Development Company) (2013) Technical Report. (In Persian)

Kampas A, White B (2003) Selecting permit allocation rules for agricultural pollution control: a bargaining solution. *Ecological Economics* 47(2-3):135-47

Kannel PR, Lee S, Lee YS, Kanel SR, Pelletier GJ (2007) Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling* 202(3-4):503-17