

Single/Multi Waste Load Allocation in Gheslgh River; Simulation-Optimization Approach

H. Khoshkam¹, M. Saadatpour^{2*}
and N. Heidarzadeh³

Abstract

In this research, single/multi waste load allocation problems are assessed with QUAL2Kw and multi objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm tools. Improving water quality in Gheslgh River (minimizing DO violation from standard value) and minimizing the costs of construction and operation of municipal and industrial wastewater treatment plants are defined as objective functions in CBOD waste load allocation problem. Improving the integrated water quality index (which integrates the effects of T. Coliform, nitrogen concentration, phosphorous concentration, total suspended solid, and dissolved oxygen) in various monitoring stations is defined as water quality objective in multi waste load allocation problem. The results showed that in CBOD waste load allocation problem with no water treatment plant, the sum of DO violation in various monitoring stations was 4.5 mg/L. Also for no water quality standard violation, the construction and operation cost of wastewater treatment plant would be 290×10^9 Rials in 25 years. In multi waste load allocation problem the wastewater treatment plant costs increased considerably compared to the single waste load allocation problem.

Keywords: Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm, Optimum Waste Load Allocation, Qual2kw Model, Water Quality Index, Gheslgh River.

Received: October 29, 2016

Accepted: January 1, 2017

تخصیص بهینه بار یک/چند آلاینده در رودخانه قشلاق؛ رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

هاله خوشکام^۱، مطهره سعادت پور^{۲*} و نیما حیدرزاده^۳

چکیده

در این کار تحقیقاتی مسأله تخصیص بهینه بار یک و/یا چند آلاینده در امتداد رودخانه قشلاق با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه هوش جمعی ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. اهداف تعریف شده در مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی، CBOD، بهبود کیفیت آب رودخانه قشلاق (مینیمم نمودن میزان تخطی غلظت اکسیژن محلول نسبت به مقدار استاندارد در نقاط متعدد پایش) و مینیمم نمودن هزینه‌های احداث و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه‌خانه صنعتی و شهری امتداد رودخانه است. همچنین در مسأله تخصیص بهینه بار چند آلودگی، بهبود شاخص کیفیت آبی که تجمع اثر پارامترهای کیفی متعدد (مجموع کلیرم، غلظت نیترژن، غلظت فسفر، ذرات معلق و اکسیژن محلول) در نقاط پایش را لحاظ می‌نماید به عنوان تابع هدف کیفیت آب، تعریف گردید. نتایج نشان می‌دهند در مسأله تخصیص بار CBOD، در صورت عدم تصفیه مجموع قدر مطلق تخطی اکسیژن محلول از مقدار استاندارد در نقاط پایش ۴/۵ میلی گرم بر لیتر و در صورت عدم تخطی از استاندارد، مجموع هزینه احداث و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها در مدت ۲۵ سال حدود ۲۹۰ میلیارد ریال خواهد بود. همچنین در مسأله تخصیص بهینه بار چند آلاینده، هزینه‌های تصفیه‌خانه‌ها افزایش قابل توجهی نسبت به مسأله تخصیص بار یک آلاینده می‌یابد.

کلمات کلیدی: الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه، تخصیص بهینه بار آلودگی، مدل QUAL2Kw، شاخص کیفی آب، رودخانه قشلاق.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۱۲

1- MSc. Graduate of Civil and Environmental Engineering, College of Environment, Karaj, Alborz, Iran.

2-Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: msaadatpour@iust.ac.ir

3-Assistant Professor, Civil Engineering Department, Technical Faculty, Kharazmi University, Karaj, Alborz, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، کرج، البرز، ایران.

۲- استادیار، عضو هیات علمی گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، کرج، البرز، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

رودخانه‌ها یکی از مهمترین منابع تأمین نیازهای آبی بشر در زمینه‌های شرب، کشاورزی و صنعت هستند. با توسعه شهرنشینی و صنعت، که افزایش میزان و تنوع آلودگی‌ها را به دنبال داشته است، رودخانه‌ها با دارا بودن ویژگی خودپالایی در حذف آلودگیها، مکانهایی برای تخلیه خروجی فاضلابهای ناشی از فعالیتهای بشری در نظر گرفته شدند. فاضلابهای تخلیه شده حاوی گستره وسیعی از آلودگی‌های آلی و غیرآلی شامل مواد مغذی، مواد نفتی، چربی‌ها، فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و جامدات معلق هستند. متأسفانه تخلیه فاضلابها و مواد زائد به رودخانه‌ها تا آنجا افزایش یافت که از ظرفیت خودپالایی^۱ این پیکره‌های آبی تجاوز نمود (Mostafavi and Afshar, 2011; Vasudevan et al., 2011). یکی از جنبه‌های مهم مدیریت کیفی منابع آب، تخصیص بهینه بار آلاینده‌ها^۲ در سیستم رودخانه‌ها است. تخصیص بهینه بار آلاینده می‌تواند از یکسو استانداردهای کیفیت آب را در سیستم ارضا کرده و از سوی دیگر هزینه‌های تحمیل شده به مدیران صنعتی و کشاورزی را برای حذف آلاینده‌های ورودی به پیکره‌های آبی حداقل نماید (Saadatpour, 2004).

با توجه به ماهیت چندگانه و گاه متضاد اهداف در مسائل تخصیص بار آلاینده، مجموعه‌ای از جبهه پرتو بهینه به عنوان پاسخ این‌گونه مسائل با استفاده از تکنیکهای بهینه‌سازی فراکوشی ارائه می‌گردد و انتخاب یکی از اعضای جبهه پرتو توسط نهاد تصمیم‌گیرنده بر اساس الویتها و ارجحیت‌های آن صورت می‌پذیرد (Sharifi et al., 2010). ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها مقادیر بهینه تخصیص بار آلودگی هر یک از منابع آلاینده را متأثر می‌سازد. بر این اساس، یک مدل شبیه‌سازی به منظور تعیین پاسخ‌های کیفی پیکره آبی در ازای ترکیبات متفاوت تخصیص بار آلاینده‌های موردنیاز است تا با ارزیابی هر یک از سناریوهای تخصیص در پایان، مقادیر بهینه تخصیص بار آلاینده‌های نقطه‌ای فراهم گردد (Yandamuri et al., 2006).

محققین تاکنون ابزارهای فراکوشی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی متنوعی را در راه حل مسائل تخصیص بهینه بار آلودگی به خدمت گرفته‌اند و ترکیب‌های متنوعی از آنها به منظور بهینه‌سازی توابع هدف هر مسأله با در نظر گرفتن قیدهای آن به کار گرفته شده‌است. مدل هیدرودینامیکی و کیفیت آب دو بعدی CE-QUAL-W2 در مسأله تخصیص بار آلاینده در رودخانه ویلامت^۳ (کلانشهر اورگان^۴) (Berger et al., 2002) و ترکیب مدل برنامه‌ریزی خطی و مدل

اصلاح شده QUAL2E به منظور مدیریت اقتصادی کیفیت منابع آبی رودخانه گیونگانگ^۵ در کره جنوبی استفاده گردیدند (Cho et al., 2003). همچنین الگوریتم چندهدفه ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی در حل مسأله تخصیص بار آلاینده، توسط Yandamuri et al. 2006 بکار گرفته شد. در مدل تخصیص بار آلاینده رودخانه هراز در شمال ایران از یک مدل شبیه‌ساز بر مبنای معادله استریتر-فلیس برای تخمین غلظت BOD جریان رودخانه و تکنیک برنامه‌ریزی خطی به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده گردید (Saremi et al., 2010). مسأله چند هدفه تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه ویلامت با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (معادله استریتر-فلیس و الگوریتم چند هدفه جامعه مورچگان^۶) حل گردید (Hosseinzadeh et al., 2010). در سال ۲۰۱۱ با استفاده از الگوریتم فراکوشی چند هدفه شبیه‌سازی نورد فلزات^۷ و مدل شبیه‌سازی، مدیریت کیفیت منابع آب رودخانه‌ای با جریان جذر و مدی با استفاده از کنترل میزان دبی رها شده از مخزن بالادست و تخصیص مقادیر حذف آلودگی واحدهای آلاینده امتداد رودخانه دنبال گردید (Zewdie and Bhallamudi, 2011). به منظور ارزیابی توانایی تحمل بار آلودگی رودخانه آریویو کلورادو^۸ در امتداد مرز امریکا و مکزیک، یک سیستم پشتیبانی تصمیم (DSS) با تعبیه و گردآوری عبارات موازنه جرم و GIS، و بر اساس رویکرد سنجش از راه دور بکار گرفته شد. تمرکز اصلی این تحقیق، توسعه یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای ارزیابی آثار نیاز اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای بر روی سطح اکسیژن محلول (DO) رودخانه بود. در این مسأله محدودیت غلظت بیشینه BOD و میزان کسری DO در نقاط کنترلی (که ۵۰۰ متری پایین دست منابع تخلیه نقطه‌ای واقع هستند)، کمینه آزادسازی پساب (۴۰٪)، حداقل تخلیه مجاز از تصفیه‌خانه (با هدف تأمین جریان کافی رودخانه برای تأمین اهداف اکولوژیکی) و مثبت بودن پارامترهای تعریف شده در تمام نقاط تصفیه‌خانه و کنترلی، قیدهای مطرح شده در مسأله بودند (Hernandez and Uddameri, 2012).

به منظور تخصیص بار آلاینده در حوضه آبریز رودخانه سانتا ماریا دا ویتوریا^۹ در کشور برزیل، الگوریتم بهینه‌سازی اکتشافی شبیه‌سازی نورد فلزات (SA) و مدل شبیه‌سازی کیفیت آب (QUAL2E) مورد استفاده قرار گرفت (De Andrade et al., 2013). به منظور تخصیص بار آلاینده در رودخانه تامراپارنی (کشور هند)، مدل فازی چندهدفه برنامه‌ریزی خطی استفاده گردید. در این مسأله کمینه نمودن میزان تصفیه و بیشینه‌نمودن عدالت با در نظر گرفتن قیدهای مربوط به رعایت بیشترین مقدار مجاز برای کمبود اکسیژن محلول

در نقاط کنترلی (محاسبه با استفاده از معادله استریتر - فلپس) و همچنین میزان کمینه و بیشینه تصفیه، به عنوان اهداف و قیدهای مسأله مطرح گردیدند (Kumar, 2014). در حل مسأله چندهدفه تخصیص بار آلاینده در رودخانه هراز، معادله استریتر - فلپس برای شبیه‌سازی شاخص اکسیژن محلول کیفیت آب در نقاط کنترلی رودخانه هراز و الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده گردید (Ashtiani et al., 2015). تخصیص بهینه بار آلودگی فسفات در سیستم رودخانه-مخزن کرخه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه هوش جمعی ذرات و مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 و شبکه عصبی (ساختار مدل بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین) در سال ۲۰۱۶ صورت پذیرفت (Afshar and Masoumi, 2016). در مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه، کاهش هزینه‌های حذف آلودگی، رعایت عدالت میان واحدهای آلاینده، کاهش تعداد دفعات تخطی غلظت اکسیژن محلول از مقادیر استاندارد در غالب هزینه-تخطی، هزینه-عدالت و هزینه-عدالت-تخطی از جمله اهداف مورد بررسی در مطالعات بوده است.

در این کار تحقیقاتی مسائل تخصیص بار یک و/یا چند آلاینده در رودخانه قشلاق با رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی حل خواهد گردید. شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب در نرم‌افزار QUAL2Kw با هدف تعیین پاسخ پیکره آبی تحت تأثیر کنترل تخلیه آلاینده‌های نقطه‌ای انجام و از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات در ساختار چندهدفه به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی در حل مسأله استفاده خواهد گردید. اگرچه ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق به تنهایی ابزار و تکنیک‌های جدیدی به شمار نمی‌آیند، اما چگونگی ترکیب آنها در مسأله مورد بررسی قطعاً نوآوری در سطح مسائل تخصیص بهینه بار آلودگی خواهد بود. همچنین مسأله تخصیص بهینه بار چند نوع آلودگی (آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های خانگی و صنعتی) در غالب رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه شده در این تحقیق، به ندرت در مطالعات پیشین برای یک رودخانه واقعی مشاهده گردیده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مورد مطالعاتی

رودخانه قشلاق در استان کردستان یکی از رودخانه‌های مهم مرزی غرب کشور بوده که در تأمین نیاز آبی منطقه و استان، نقش ویژه‌ای را ایفا می‌نماید. به دلیل عبور این رودخانه از مجاورت شهر سنندج، در طول مسیر بعد از سد وحدت تا تلاقی با

رودخانه گاوهرود، در معرض منابع مختلف آلاینده و در نتیجه کاهش جدی کیفیت آب رودخانه قرار گرفته است (Jafari Salim, 2009; Asheghmoala et al., 2014). قشلاق دارای آب دائمی و رژیم جریان آبی، برفی - بارانی است. بخشی از آب آن نیز توسط چشمه‌های آهکی موجود در حوضه تأمین می‌شود. دبی آب طی فصل‌های مختلف سال دارای نوسان می‌باشد. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، کمترین مقدار دبی آب در مرداد ماه بوده و برابر با ۰/۱ متر مکعب بر ثانیه اندازه‌گیری شده است (Asheghmoala et al., 2014). کاهش شدید آب در ماه‌های تابستانی چه به دلیل کمبود بارش و تمام شدن ذخیره برف‌ها و چه به دلیل برداشت زیاد آب در مسیر حوضه آبریز، موجب می‌شود که آلودگی رودخانه افزایش یافته و با جریان کند آب نیز، قدرت خودپالایی رودخانه به شدت کاهش یابد. ۱۴ ایستگاه پایش در این رودخانه در نظر گرفته شده که چهارتای آنها روی شاخه‌های فرعی ورودی رودخانه قشلاق قرار گرفته و بقیه در طول رودخانه اصلی واقع شده‌اند (جدول ۱). اطلاعات هندسی، هواشناسی، هیدرولیکی، هیدرولوژی و داده‌های کیفی رودخانه قشلاق در فصل تابستان (مرداد ماه) بر اساس مراجع مورد اشاره در این تحقیق، برداشت و در مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است. پس از بررسی‌های به عمل آمده و تعیین شیب کف کانال، عرض کف، شیب دیواره‌ها و ضریب زبری مقاطع مختلف، رودخانه از بعد از سد قشلاق به ۹ بازه (Reach) تقسیم‌بندی و در مدل پیاده‌سازی گردید (خلاصه اطلاعات در جدول ۲).

در یک تقسیم‌بندی کلی، منابع آلاینده آب را می‌توان به منابع شهری، صنعتی و کشاورزی تقسیم نمود که البته هر کدام از این منابع آلاینده، به ویژه منابع آلاینده صنعتی، خود می‌توانند به چندین زیر مجموعه تقسیم‌بندی شوند. این منابع آلاینده می‌توانند از طریق تخلیه مستقیم فاضلاب‌ها، پساب‌ها، مواد زائد جامد و شیرابه‌ها، منابع آب را آلوده نمایند. همانگونه که پیشتر ذکر شد، رودخانه قشلاق در طول مسیر خود بعد از سد وحدت (قشلاق) تا تلاقی با رودخانه گاوهرود، در معرض ورود آلاینده‌های مختلفی قرار دارد. مهمترین منابع آلاینده شهری، فاضلاب تولید شده از منابع خانگی، تجاری و رواناب‌های شهری می‌باشند. در رودخانه قشلاق آلودگی شهری شامل فاضلاب شهری سنندج و همچنین فاضلاب روستاها و شهرک‌هایی که در مسیر قشلاق و یا سرشاخه‌های آن قرار دارند موجب آلودگی آن می‌گردند. آلودگی‌های صنعتی شامل پساب‌های صنایع مستقر در حاشیه رودخانه و پساب‌های خروجی از شبکه فاضلاب شهرک‌های صنعتی سنندج شماره ۱ و ۳ و برازان می‌باشد

به منظور تعیین بارهای آلودگی مختلف ناشی از منابع نقطه‌ای و با در نظر گرفتن این نکته که کمیت و کیفیت آلودگی حاصل از منابع و بخشهای مختلف متفاوت می‌باشد، (Jafari Salim, 2009) با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و گردآوری اطلاعاتی از حوضه آبریز قشلاق، سهم بخش‌های مختلف آلاینده‌های اصلی

که مستقیماً وارد رودخانه می‌شود. همچنین فاضلاب ناشی از کارگاه‌ها و صنایع داخل شهرها و مناطق مسکونی را نیز می‌توان به این بخش افزود. در حد فاصل سد قشلاق تا انتهای رودخانه، ۸ منبع آلاینده نقطه‌ای که داده‌های مکانی و کیفی آنها (بار BOD) در دسترس بود، شناسایی و در مدل‌سازی اعمال گردیدند.

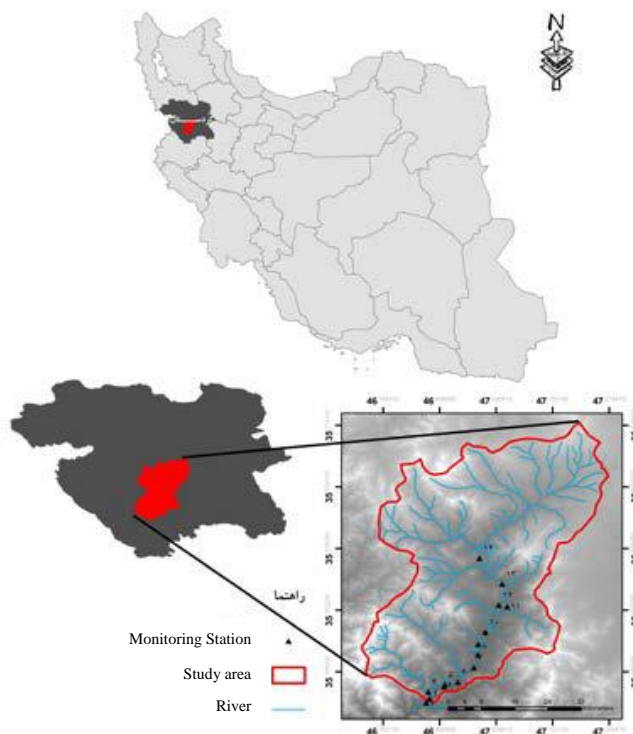


Fig. 1- The location of Geshlagh River basin in Kurdistan province (Asheghmoala et al., 2014)
 شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز رودخانه قشلاق در استان کردستان (Asheghmoala et al., 2014)

Table 1- Measured water quality parameters at monitoring stations of Geshlagh River in summer (Jafari Salim, 2009)

جدول ۱- مقادیر پارامترهای کیفیت آب ایستگاههای پایش رودخانه قشلاق در تابستان (Jafari Salim, 2009)

Parameter	CBOD ₅	COD	DO	EC	TDS	TSS	T	pH	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	Total Coliforms
Monitoring station	mg/L	mg/L	mg/L	μs/cm	mg/L	mg/L	°C	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	MPN/100ml
S14	7.4	32	10.7	329	164	11.6	15.5	8.3	4.3	0.38	0.7	1.6	93
S13	16	38	8.3	428	213	22	21.5	8.17	7.3	0.87	1.32	2.02	29
S12	12	32	6.3	487	243	63.2	22.5	7.73	5.9	3.44	3.9	5.46	43
S10	36	56	5.2	638	319	52	22.3	7.67	9.04	4.35	26.8	23.7	29
S8	81.4	172	2.9	688	344	60	24.6	7.5	15.6	8.06	59.9	56.9	290
S7	53.8	92	2.7	803	351	92	26.1	7.38	8.2	11.4	50.8	51.6	460
S6	18	32	2.2	708	354	64	28.3	7.73	5.98	2.8	80.9	35.2	210
S4	10.6	48	4.9	685	342	18	27.1	7.92	5	4.9	18.8	30.5	23
S2	23.2	32	5.5	682	341	17.6	28.3	8.01	6.3	14.3	35.4	44.7	21
S1	11.8	32	5.95	535	266	20	25.9	7.93	4.11	9.11	15.5	15.7	21

Table 2- Hydraulic characteristics of Gheslugh River reaches (Asheghmoala et al., 2014)

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی بازه‌های رودخانه قشلاق (Asheghmoala et al., 2014)

Reach No	Reach names	Length (km)	Distance to downstream (km)	Elevation (MASL)	Manning roughness coefficient	River width (m)	Bed slope	Side slope
0	Headwater		49.45	1479	0.09	4	0.003	0.03
1	Gheslugh dam	10.45	39	1447	0.09	5.5	0.003	0.02
2	Salavat abad	4	35	1419	0.08	7.5	0.007	0.025
3	Baharan	6.35	28.56	1390	0.06	10	0.005	0.02
4	Sanandaj sewage	5.7	22.95	1362	0.055	10	0.005	0.015
5	Landfill leachate	5.4	17.55	1357	0.055	12.5	0.001	0.01
6	Par chicken slaughter	5.5	12.05	1332	0.05	12.5	0.005	0.01
7	Sou confluence	3.4	8.65	1311	0.05	10	0.006	0.005
8	Darvishan confluence	5.4	3.25	1293	0.045	10	0.003	0.005
9	Gavroud confluence	3.25	0	1226	0.05	10	0.021	0.01

کیفی در بار آلودگی کل آن واحد، به محاسبه تقریبی سایر پارامترها بر اساس نسبت‌های ارائه شده در جدول ۴ می پردازیم. مقادیر محاسبه شده از بارهای مختلف آلودگی در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۲- تخصیص بهینه بار آلودگی

تخصیص بار آلاینده (WLA) رویکرد مفیدی برای تعیین میزان مجاز بارگذاری آلاینده‌های نقطه‌ای بوده و تخصیص بهینه بار آلودگی استفاده از حداکثر ظرفیت خودپالایی پیکره آبی با در نظر گرفتن هزینه‌های اقتصادی، عدالت، کارایی و ... در حین تأمین کیفیت مطلوب منابع آبی است (Chen and Ma, 2008).

(شهری، صنعتی، کشاورزی و متفرقه) از بار آلودگی کل ورودی به رودخانه قشلاق را تعیین نمود. شکل ۲ برگرفته از مطالعات وی در خصوص سهم بخشهای مختلف در تولید آلودگی‌های با ماهیت‌های متفاوت بوده است.

با توجه به نسبت میان پارامترهای مختلف آلاینده حاصل از مصارف شهری و صنعتی و داده‌های حاصل از مینی بر بار BOD_5 ورودی از جدول ۳ منابع آلاینده نقطه‌ای، به تخمین بار آلودگی حاصل از هر پارامتر می‌پردازیم. ابتدا با استفاده از نسبت BOD_5 در سهم آلودگی کل مصارف شهری و نسبت BOD_5 و COD در مصارف صنعتی (۲،۱)، به تخمین بار آلودگی کل و سپس از روی سهم هر پارامتر

Table 3- Point source pollutions along Gheslugh River (Asheghmoala et al., 2014)

جدول ۳- منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در طول رودخانه قشلاق (Asheghmoala et al., 2014)

Name of discharger unit	Reach number	Distance to downstream (km)	CBOD (mg/lit)	Waste water flow rate (m^3/s)	Pollution load (gr/s)
Nanleh Wastewater	1	41	200	0.1	20.8
Industrial park	3	33	800	0.01	9.13
Sanandaj livestock slaughter	3	28	900	0.003	2.57
Fajr concrete foundation	4	25	50	0.004	0.2
Treatment Plant Outflow	4	23	97.94	1.4	136.63
Asphalt and Grain Recycling and Production	5	21	40	0.003	0.14
Creek Landfill Leachate	5	19	2054.79	0.03	61.64
Poultry Slaughter	6	14	698.63	0.002	1.66

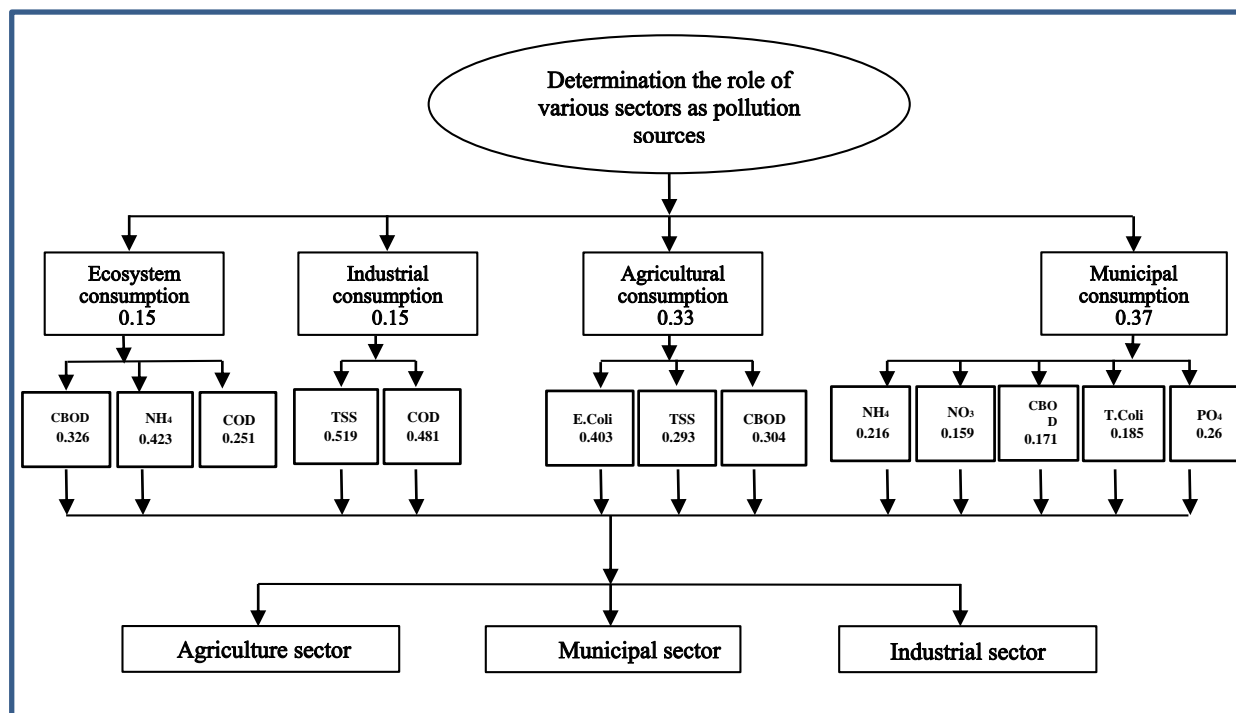


Fig. 2- Determining the role of each sector as a pollution source (Jafari Salim, 2009)
 شکل ۲- تعیین سهم آلودگی در بخش های مختلف (Jafari Salim, 2009)

Table 4- The role of industrial, municipal, and agricultural sectors as pollution sources (Jafari Salim, 2009)
 جدول ۴- سهم مصارف صنعتی، شهری و کشاورزی در تولید آلاینده (Jafari Salim, 2009)

	BOD ₅	COD	NH ₄	TSS	F.Coliform	NO ₃	T.Coliform	PO ₄ ⁻³	AS
Industrial consumption	0.08	0.342	0.174	0.33	0.0032	0.034	0.01	0.02	0.077
Municipal consumption	0.87	0.655	0.76	0.654	0.992	0.74	0.93	0.63	0.92
Agricultural consumption	0.05	0.004	0.07	0.013	0.0051	0.227	0.06	0.35	0.003

Table 5- The calculated contaminant loads from each pollution point source
 جدول ۵- میزان بار آلودگی محاسباتی در واحدهای تخلیه کننده فاضلاب

Name of discharger unit	BOD (mg/Lit)	Total pollution load (mg/Lit)	PO ₄ (mg/Lit)	T.Coliform (mg/Lit)	NO ₃ (mg/Lit)	NH ₄ (mg/Lit)	TSS (mg/Lit)	COD (mg/Lit)
Nanleh Wastewater	200.00	1170	304	216	186	253		
Industrial park	800.00	3493					1813	1680
Sanandaj livestock slaughter	900.00	3929					2039	1890
Fajr concrete foundation	50.00	218					113	105
Treatment Plant Outflow	97.94	573	149	106	91	124		
Asphalt and Grain Recycling and Production	40.00	175					91	84
Creek Landfill Leachate	2054.79	8971					4656	4315
Poultry Slaughter	698.63	3050					1583	1467

یک مدل تخصیص بار آلودگی، یک مدل ریاضی شامل یک مدل شبیه‌سازی کیفیت آب در ساختاری همراه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی یک/چند هدفه است. در این قسمت، ساختارهای مورد استفاده در این تحقیق بیان می‌گردند.

۱-۲-۲-۱- مدل شبیه سازی

QUAL2Kw (Q2K) مدل کیفیت آب رودخانه و جریان آب است که نسخه به‌روز شده مدل QUAL2E است. QUAL2Kw مدل شبیه‌سازی یک بعدی هیدرولیک و کیفیت آب در حالت پایا (دائمی) است که به شبیه‌سازی درجه حرارت روزانه، سینتیک آب - کیفیت روزانه، بارهای آلودگی، حرارتی و ... و خروجی‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آلاینده و حرارت می‌پردازد. این مدل، قابلیت تقسیم‌بندی سیستم به بازه‌های با فضای نابرابر را دارا است. به‌علاوه، چندین بارگذاری و خروجی می‌تواند در هر بازه لحاظ گردد. در این مدل، به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای نرخ واکنش، ته‌نشینی و ... و برای بیشینه کردن تناسب نتایج شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی، کالیبراسیون اتوماتیک صورت می‌پذیرد (Pelletier and Chapra, 2008).

۱-۲-۲-۲- مدل بهینه سازی

در طبیعت، پرندگان در جستجوی غذا، تجربه شخصی خویش و دانش دیگر پرندگان گروه را مدنظر قرار می‌دهند. این ایده الهام بخش Kennedy و Eberhart در ارائه روش بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات گردید. مانند تمام الگوریتم‌های تکاملی، برای ذرات در شروع الگوریتم، موقعیت و سرعت تصادفی لحاظ می‌گردد. در تکرار بعدی (تجمع بعدی)، متناسب بودن ذرات در تابع هدف برای تعریف بهترین موقعیت هر ذره در مقایسه با همان ذره در ازدحام قبلی Pbest و بهترین موقعیت بین همه ذرات در میان تمام ازدحام‌ها gbest بکار می‌رود (Afshar et al., 2011; Damghani et al., 2013). در الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چندهدفه مانند سایر الگوریتم‌های فراکوشی چندهدفه، دنبال‌نمودن راه‌حل‌های متعدد غیر مغلوب مورد نظر است. در اثر ماهیت گاهاً متضاد اهداف چندگانه در مسائل چندهدفه، انتخاب یک راه حل بهینه یکتا دشوار است. در این رویکرد بردارهای Pbest و gbest یکتا نیستند و تعریف آنها با موارد هم‌تایشان در هوش جمعی ذرات یک‌هدفه متفاوت است. تجربه فردی هر ذره در ویژگی Pbest نگهداری می‌شود، که منطبق با بهترین اجرایی است که ذره تاکنون در پرواز خود حاصل کرده است. تفاوت عمده میان الگوریتم تک‌هدفه و چندهدفه

هوش جمعی ذرات، نحوه ذخیره‌سازی و انتخاب بهترین ذرات gbest می‌باشد. در این تحقیق، رویکرد پیشنهادی توسط Saadatpour and Afshar (2013) مبنای کار قرار داده شده است.

۱-۲-۲-۲- بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چندهدفه توسعه داده شده در این تحقیق

به منظور بررسی کارایی الگوریتم هوش جمعی ذرات دوهدفه توسعه یافته در این تحقیق، دو تابع ریاضی معروف ZDT1 و ZDT2 (توابع مقعر و محدب) که در سال ۱۹۹۹ توسط Deb طرح شده‌اند، با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده در این تحقیق حل گردیدند. توابع ریاضی ZDT1 و ZDT2 به شرح معادلات ریاضی زیر در مراجع تعریف گردیده‌اند.

$$\text{Minimize } ZDT1 = (f_1(x_1), f_2(X)) \quad (1)$$

$$f_2(X) = g(x_2, \dots, x_m) \cdot h(f_1(x_1), g(x_2, \dots, x_m)) \quad (2)$$

$$X = (x_1, \dots, x_m) \quad (3)$$

تفاوت این دو مسأله مربوط به ترم‌های f_1 و g و h می‌باشد به گونه‌ای که برای تابع ZDT1 که دارای منحنی پرتویی مقعر خواهد بود و خواهیم داشت:

$$f_1(X) = x_1 \quad (4)$$

$$g(x_2, \dots, x_m) = 1 + 9 \cdot \sum_{i=2}^m x_i / (m-1) \quad (5)$$

$$h(f_1, g) = 1 - \sqrt{f_1/g} \quad (6)$$

همچنین برای تابع ZDT2 که دارای جبهه پرتویی محدب خواهد بود، معادلات ریاضی به شرح زیر می‌باشند.

$$h(f_1, g) = 1 - (f_1/g)^2 \quad (7)$$

که در مسائل حل شده در این تحقیق، $m=30$ و $x_i \in [0,1]$ می‌باشد.

۱-۲-۳- مسائل مورد بررسی در تخصیص بهینه بار آلاینده در رودخانه قشلاق

مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی با هدف تأمین شرایط مطلوب کیفیت آب و کاهش هزینه‌های حذف آلودگی بهبود شرایط محیط زیست و بهبود شرایط اقتصادی-اجتماعی را در اهداف خود دنبال می‌نماید. مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی در این تحقیق با دو نگاه (۱) تنها در نظر گرفتن بار آلودگی CBOD و (۲) بارهای متفاوت

آلودگی از واحدهای صنعتی و شهری امتداد رودخانه قشلاق مورد بررسی قرار گرفت. در زیر جزییات مسائل مورد بررسی ارائه می‌گردد.

۲-۳-۱- مسأله تخصیص بار آلاینده CBOD

در این مسأله، تنها بار CBOD از منابع آلاینده نقطه‌ای (۸ واحد آلاینده) در مجاورت رودخانه قشلاق، وارد آن می‌گردند و تنها پارامتر کیفی اکسیژن محلول در رودخانه برای حفاظت کیفیت منابع آبی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۳-۱-۱- مسأله یک-یک

در این مسأله، کمینه نمودن میزان مجموع قدر مطلق تفاضل غلظت اکسیژن محلول ($DOCon_i$) در نقاط کنترل i از مقدار استاندارد (۵ میلی‌گرم در لیتر) به عنوان تابع هدف کیفی (معادله ۸) و بهبود شرایط محیط زیستی لحاظ می‌گردد. کیفیت اکسیژن محلول در ۱۰ نقطه در امتداد رودخانه قشلاق در این تحقیق پایش می‌گردد.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{10} \text{Violation}_i \quad (8)$$

$$\text{Violation}_i = \begin{cases} |DOCon_i - 5| & DOCon_i < 5 \\ 0 & \text{Else} \end{cases}$$

کاهش مجموع هزینه‌های حذف آلودگی (شامل هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری از واحدهای تصفیه‌خانه آلاینده) به عنوان تابع هدف کمی در این مسأله لحاظ می‌گردد (معادله ۹).

$$\text{Min Cost} = \quad (9)$$

$$\sum_{i=1,5} (P_i + \sum_{t=1}^{25} 0.02A_{i,t}) + \sum_{j=2}^4 (P_j + \sum_{t=1}^{25} 0.03A_{j,t}) + \sum_{j=6}^8 (P_j + \sum_{t=1}^{25} 0.03A_{j,t})$$

$$P_i = R \times \text{CBOD}(i) \times Q(i) \times x(i) \quad (10)$$

که در رابطه فوق R بیانگر هزینه احداث تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی به ازای هر یک کیلوگرم بار آلودگی در روز به مبالغ به ترتیب ۲۳ و ۳۰ میلیون ریال (با عمر مفید ۲۵ سال) می‌باشد (Asheghmoala et al., 2014)، $\text{CBOD}(i)$ بار آلاینده CBOD ، $Q(i)$ دبی و $x(i)$ درصد حذف فاضلاب از واحد آلاینده نام هستند. واحدهای آلاینده ۱ و ۵ در امتداد رودخانه قشلاق، واحدهای آلاینده شهری و بقیه واحدهای آلاینده نیز صنعتی هستند.

$$A = P * [(ii * (1 + ii)^n) / ((1 + ii)^n - 1)] \quad (11)$$

که در آن A بیانگر ارزش معادل سالیانه، ii نرخ بهره (که در اینجا ۱۵٪ فرض شده است)، n تعداد سالهای بهره‌برداری (که ۲۵ سال می‌باشد)، P هزینه سرمایه‌گذاری فعلی می‌باشند. در این تحقیق هزینه بهره‌برداری معادل ۳ درصد هزینه سالانه برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی و ۲ درصد برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در نظر گرفته شده است (Asheghmoala et al., 2014).

۲-۳-۱-۲- مسأله یک-دو

ساختار این مسأله همانند مسأله یک-یک، مسأله بهینه‌سازی با دو تابع هدف است و تفاوت آن در تعریف ریاضی تابع هدف حفاظت از کیفیت منابع آبی است. تابع هدف بهبود شرایط کیفیت آب به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{10} \text{Violation}_i \quad (12)$$

$$\text{Violation}_i = \begin{cases} (DOCon_i - 5)^2 & DOCon_i < 5 \\ 0 & \text{Else} \end{cases}$$

به این ترتیب، متغیرهای تصمیم درصد حذف CBOD از ۸ منبع آلاینده نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق است که الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیر درصد حذف را در صفحه Point Source مدل QUAL2Kw اعمال نموده و تابع هزینه محاسبه می‌گردد. پس از اعمال درصدهای حذف بر مقادیر بار آلودگی منابع آلاینده نقطه‌ای، مقادیر بار CBOD (داده‌های ورودی مدل QUAL2Kw) تغییر کرده و براساس داده‌های ورودی جدید، مدل شبیه‌سازی اجرا می‌گردد. پس از اجرای مدل شبیه‌سازی، مقادیر غلظت اکسیژن محلول از صفحه WQ Output مدل QUAL2Kw در نقاط کنترل خوانده شده و بر اساس این مقادیر، محاسبه تابع هدف کیفی (معادله ۸ یا ۱۲) صورت می‌پذیرد. به این ترتیب با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، توابع هدف کمی و کیفی (به ترتیب کاهش هزینه و کاهش تخطی از غلظت اکسیژن محلول استاندارد در نقاط کنترل)، فراخوانی‌های متعدد مدل شبیه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی و ... مسأله تخصیص بهینه بار آلاینده حل می‌گردد.

۲-۳-۲- مسأله تخصیص بار چند آلاینده

در این مسأله، بارهای آلودگی با ماهیت‌های متفاوت به شرح شکل ۲ و جدول ۵ از منابع آلاینده نقطه‌ای (۸ واحد آلاینده) در مجاورت رودخانه قشلاق، وارد آن می‌گردند. با توجه به تأثیر منابع آلاینده بر پارامترهای کیفی مختلف در رودخانه، از شاخصی به منظور لحاظ

نمودن اثر کلیه این پارامترها استفاده می‌گردد. این شاخص بر اساس مطالعات (Swamee and Tyagi (2000) توسعه یافته است.

۳-۲-۱- شاخص توسعه یافته توسط Swamee and Tyagi

$$I = \left(1 - N + \sum_{i=1}^N S_i^{-1/k} \right)^{-k} \quad (13)$$

زیر شاخص S_i برای پارامترهای کیفی با ماهیت کاهش یکنواخت، غیریکنواخت و تک مودی و بر اساس پارامترها (اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، ذرات معلق، کلیفرم و CBOD) و ضرایب مورد نظر در نقاط کنترل محاسبه می‌گردد. N تعداد پارامترهای کیفی مورد بررسی و k ضریب توانی است که مقدار 0.4 برای آن توصیه شده است. هدف ماکزیمم کردن شاخص کیفیت آب فوق به عنوان تابع هدف کیفی می‌باشد. ساختار تابع هدف مساله مورد بررسی در مساله دو، بهبود کیفیت منابع آبی رودخانه قشلاق و کاهش هزینه احداث، بهره‌برداری و نگهداری از تصفیه‌خانه به شرح زیر تعریف شده است.

$$\text{Min} \left(\frac{1}{I} = \frac{1}{\left(1 - N + \sum_{i=1}^N S_i^{-1/k} \right)^{-k}} \right) \quad (14)$$

$$\text{Min Cost} = \sum_{i=1,5}^5 \sum_{j=1}^3 \left(P_{i,j} + \sum_{t=1}^{25} 0.02A_{i,j,t} \right) + \sum_{i=2}^4 \sum_{j=1}^3 \left(P_{i,j} + \sum_{t=1}^{25} 0.03A_{i,j,t} \right) + \sum_{i=6}^8 \sum_{j=1}^3 \left(P_{i,j} + \sum_{t=1}^{25} 0.03A_{i,j,t} \right) \quad (15)$$

در عبارت فوق، اندیس j مربوط به بار آلودگی با ماهیت CBOD، COD و TSS در منابع آلاینده نقطه‌ای صنعتی و بیانگر بار آلاینده با ماهیت CBOD، NO_3 ، PO_4 ، NH_4 و T. Coliform در منابع آلاینده نقطه‌ای شهری می‌باشد. در این مساله نیز، متغیرهای تصمیم درصد حذف هر آلاینده موجود در منابع آلاینده نقطه‌ای می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به ماهیت فاضلاب شهری و صنعتی، تعداد آلاینده‌های موجود در هر یک متفاوت است. پس از تعیین درصد حذف هر آلاینده در منابع آلاینده نقطه‌ای توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw فراخوانی می‌گردد. سپس این تغییرات در صفحه Point Source بر میزان بار آلودگی ورودی به پیکره آبی (رودخانه قشلاق در این مساله) اعمال و نیز تابع هزینه احداث، بهره‌برداری و نگهداری از تصفیه‌خانه‌ها محاسبه می‌گردد. پس از اتمام شبیه‌سازی، غلظت مربوط به آلاینده‌های

مختلف از روی صفحه WQ Output استخراج و در صفحه دیگری به نام WQ Output Analysis روند محاسبه شاخص تجمعی کیفی آب طی می‌شود (بر اساس معادله ۱۴).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل شبیه‌سازی یک بعدی و دائمی کیفیت آب QUAL2KW

پس از وارد نمودن داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، کیفی و شیمیایی رودخانه به عنوان ورودی به مدل، شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل صورت می‌پذیرد. داده‌های اکسیژن محلول و نیاز اکسیژن خواهی بیولوژیکی به منظور داده‌های کالیبراسیون در رودخانه قشلاق در ۱۰ نقطه کنترل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با تنظیم پارامترهای ضریب هواگیری، ضریب تجزیه ماده آلی و ... فرآیند کالیبراسیون دنبال و سعی گردید همگرایی مناسبی میان داده‌های اندازه‌گیری شده (میدانی) و نتایج شبیه‌سازی ایجاد گردد.

همانگونه که در شکل ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌گردد تطابق مناسبی میان داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های میدانی در نقاط کنترل ایجاد گردیده است. افت غلظت اکسیژن محلول در فاصله کیلومتر ۱۰ تا کیلومتر ۳۰ به میزان کمتر از حد مجاز و نیز افزایش غلظت CBOD به دلیل ورود منابع آلاینده به خصوص فاضلاب شهر سنندج (واقع در کیلومتر ۲۲/۹۵ از پایین دست) است که شدت جرمی بالایی از CBOD را در مقایسه با سایر واحدهای آلاینده، به رودخانه قشلاق وارد می‌نماید.

۳-۲- نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چندهدفه توسعه داده شده در این تحقیق

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه هوش جمعی ذرات، توابع ZDT1 و ZDT2 توسط این الگوریتم مورد آزمون قرار گرفتند. اعضای جبهه پرتو هر یک از توابع در شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. نمودارهای فوق جواب قابل قبولی برای حل مسائل مطرح شده ارائه می‌دهند و با توجه به تفاوت جزئی در ضرایب آنها، انعطاف‌پذیری و توانایی الگوریتم MOPSO توسعه داده شده در این تحقیق، مناسب تشخیص داده شد. همچنین نتایج ارائه شده بر اساس آنالیز حساسیت گسترده‌ای است که بر ضرایب اینرسی ماکزیمم و مینیمم، ضرایب شناختی و اجتماعی و تعداد تکرارها انجام گردیده‌اند.

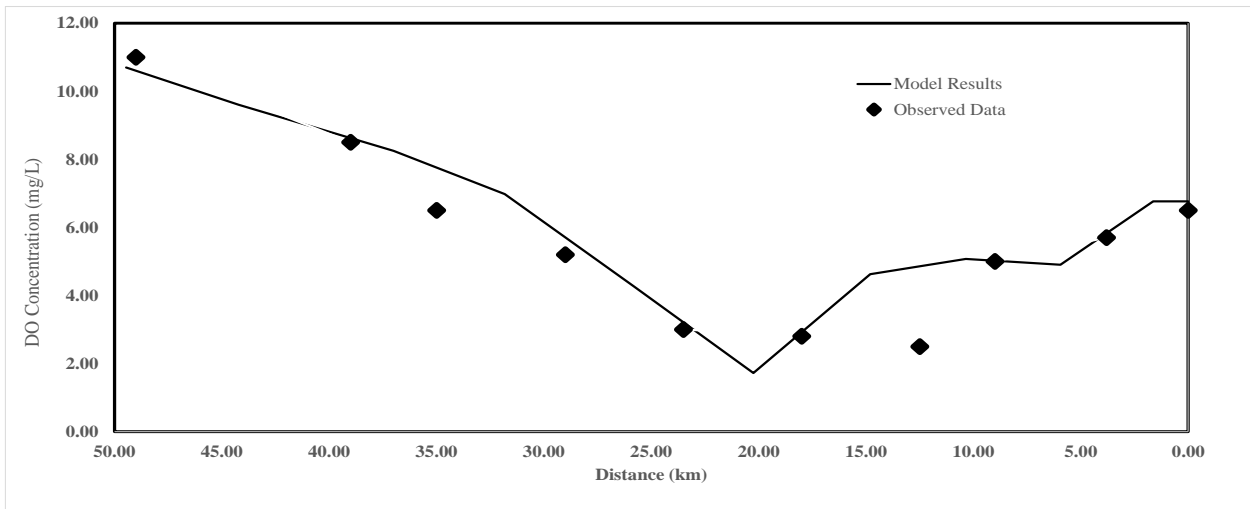


Fig. 3- Comparing simulation results and observed data for DO along Geshlagh River
 شکل ۳- مقایسه داده‌های میدانی و شبیه‌سازی اکسیژن محلول طول رودخانه قشلاق

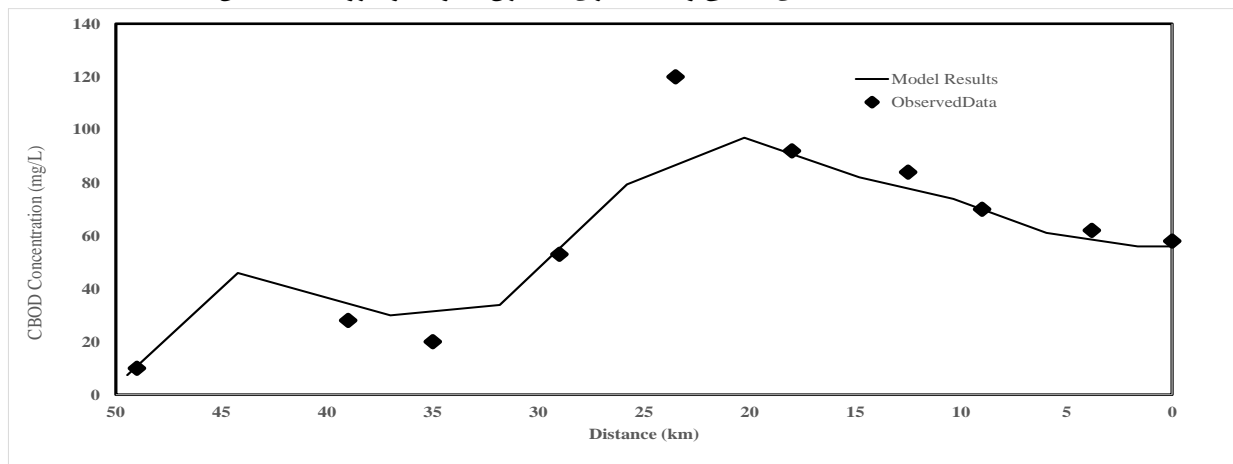


Fig. 4- Comparison simulation results and observed data of CBOD along Geshlagh River
 شکل ۴- مقایسه CBOD شبیه‌سازی شده و داده‌های میدانی طول رودخانه قشلاق

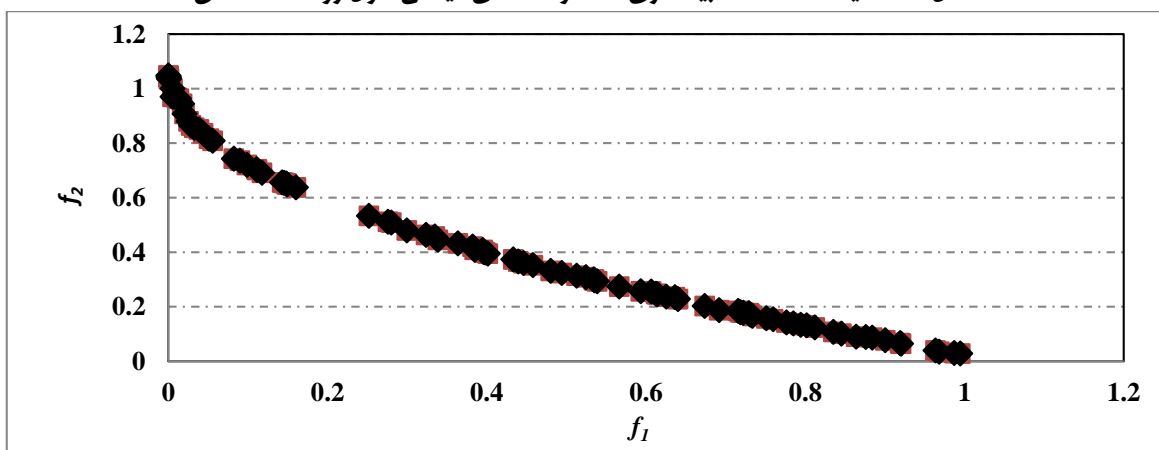


Fig. 5- Optimal Pareto front for ZDT1 function resulted from MOPSO algorithm
 شکل ۵- پاسخ‌های بهینه پرتو حاصل از الگوریتم MOPSO برای تابع ZDT1

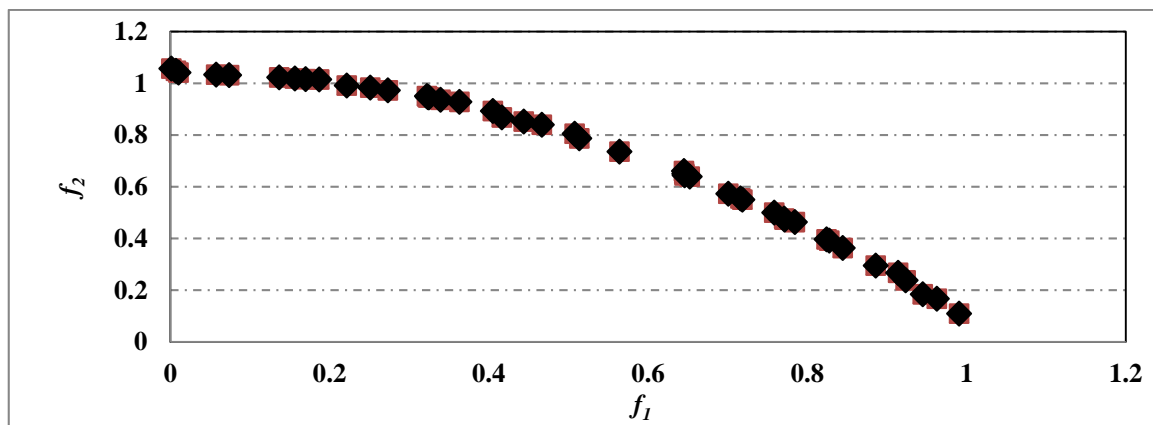


Fig. 6- Optimal Pareto front for ZDT2 function resulted from MOPSO algorithm

شکل ۶- پاسخ‌های بهینه پرتو حاصل از الگوریتم MOPSO برای تابع ZDT2

بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که در صورت عدم تصفیه مجموع قدر مطلق تخطی اکسیژن محلول از مقدار استاندارد در کلیه نقاط کنترل حدود ۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر و در صورت عدم تخطی از حد مجاز استاندارد، مجموع هزینه احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها در مدت ۲۵ سال حدود ۲۹۰ میلیارد ریال خواهد بود. نمودار پرتوی حاصل‌شده به خوبی تضاد میان افزایش هزینه‌های احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها را با کاهش مجموع تخطی غلظت اکسیژن محلول از مقدار مجاز استاندارد را نمایش می‌دهد. در جدول ۶ مقادیر حذف آلودگی از واحدهای آلاینده CBOD در رودخانه قشلاق به ترتیب از بالادست به پایین دست (از چپ به راست جدول) و توابع هدف کیفی و کمی محاسبه شده از معادله ۸ و معادله ۹ برای چند نقطه از اعضای جبهه پرتو نمایش داده شده در شکل ۷، ارائه شده است. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۳، واحدهای آلاینده ۵، ۷ و ۱، شدت جرمی آلاینده CBOD بالاتری را وارد رودخانه می‌نمایند (مقادیر بالای دبی یا غلظت بالای CBOD) و در نظر گرفتن نسبت‌های حذف قابل توجه برای هر یک از این واحدها، سبب افزایش قابل توجه هزینه خواهد گردید اما بهبود شرایط کیفی را به دنبال خواهد داشت.

۳-۳-۲- مسأله تخصیص بار آلاینده CBOD- مسأله؛ مسأله یک-دو

مسأله یک-دو با ساختار مینیمم نمودن هزینه‌های احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها و مینیمم نمودن مجموع مجذور تخطی غلظت اکسیژن محلول از مقدار استاندارد در نقاط کنترل با ابزارهای پیشنهادی مشابه مسأله یک-یک حل گردید. نتایج حاصل از حل این مسأله نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است.

۳-۳-۳- مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در امتداد رودخانه قشلاق

۳-۳-۱- مسأله تخصیص بار آلاینده CBOD- مسأله یک-یک

مسأله اول تخصیص بار آلودگی در این تحقیق با هدف مینیمم نمودن هزینه‌های تصفیه آلاینده نقطه‌ای CBOD از ۸ منبع آلاینده نقطه‌ای و مینیمم نمودن مجموع تخطی اکسیژن محلول از حد مجاز ۵ میلی‌گرم بر لیتر در ۱۰ نقطه پایش رودخانه قشلاق، مورد توجه قرار می‌گیرد. تعداد ۸ متغیر تصمیم در این مسأله که متناظر با مقادیر حذف آلودگی‌های نقطه‌ای فاضلاب‌های CBOD در امتداد رودخانه قشلاق هستند. الگوریتم با ایجاد ۵۰ ذره و ۳۰۰ تکرار آغاز می‌گردد به نحوی که انتخاب ذرات اولیه (درصدهای حذف آلودگی) به صورت تصادفی در بازه (۰،۱) صورت می‌گیرد. سرعت اولیه در تکرار اول برابر ۰/۶٪ بردار تصادفی انتخاب شده برای هر ذره در نظر گرفته شده است. وزن اینرسی از مقدار اولیه ۰/۹ تا مقدار نهایی ۰/۵، ضریب جزء شناختی C_1 از مقدار اولیه ۲/۷ تا مقدار نهایی ۰/۷ کاهش می‌یابد، در حالی که ضریب جزء اجتماعی C_2 از مقدار اولیه ۰/۵ تا مقدار نهایی ۲ افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در تکرارهای اولیه حرکت ذرات با نسبت بیشتری براساس بهترین موقعیت فردی خود صورت می‌گیرد و با افزایش تعداد تکرارها، بهترین موقعیت کل تمام ذرات، در حرکت کلیه ذرات مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد.

همچنین محدوده‌ای را برای اندازه سرعت و مقادیر ذرات (درصدهای حذف آلودگی) در طی تکرار ذرات تعریف گردیده است تا سرعت و مقادیر حذف از حدود ماکزیمم و مینیمم تعیین شده، تجاوز ننمایند.

Table 6- Detailed Design of some alternatives presented in Fig. 7

جدول ۶- جزئیات طراحی چند گزینه از جبهه پرتو ارائه شده شکل ۷

Removal rates of CBOD pollution sources respectively from upstream (1 to 8 point sources)								Cost function (billion Rial)	Quality function
0.14	0.32	0.41	0.47	0.17	0.46	0.07	0.04	228.34	1.14
0.24	0.02	0.10	0.31	0	0.20	0.07	0	134.46	2.38
0.86	0	0.15	0.11	0.37	0.08	0.13	0.095	54.39	3.45
0	0	0	0	0.15	0	0	0	0.09	4.49
0.26	0.11	0.53	0.75	0.16	0.26	0	0.06	289.7	0

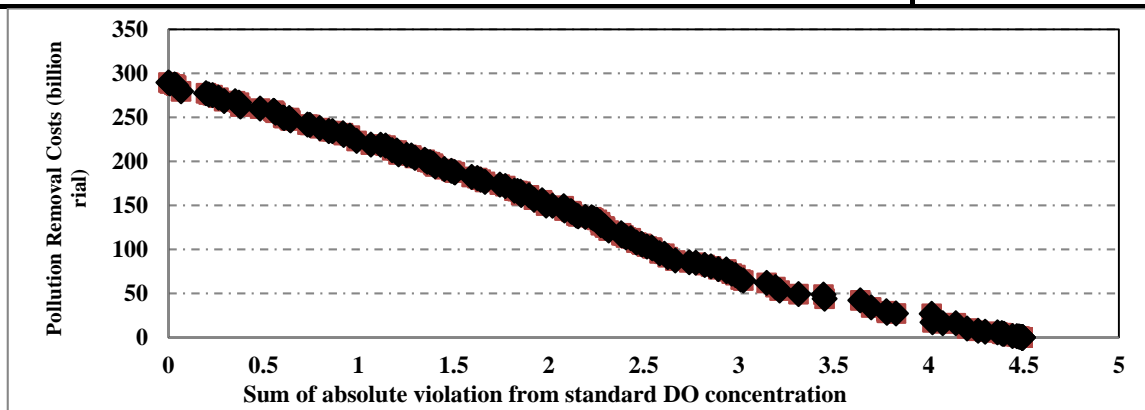


Fig. 7- Optimal Pareto front of problem 1-1; minimizing treatment costs and enhancing water quality

شکل ۷- جبهه پرتو بهینه مسأله ۱-۱؛ کاهش هزینه‌های تصفیه و بهبود کیفیت رودخانه

هدف کیفی و کمی محاسبه شده از معادله ۹ و معادله ۱۲ نیز در این جدول نمایش ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده حذف CBOD از واحدهای آلاینده ۱ و ۵ (واحدهای وارد کننده شدت جرمی بالای CBOD) سبب بهبود کیفیت رودخانه بر اساس شاخص اکسیژن محلول می‌گردند اگرچه هزینه‌های اجراء و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه را افزایش می‌دهند.

بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که در صورت عدم تصفیه مجموع مجذور تخطی از اکسیژن محلول از مقدار استاندارد در ۱۰ نقطه کنترل در رودخانه قشلاق حدود ۱۱/۵ و در صورت عدم تخطی از حد مجاز استاندارد، مجموع هزینه احداث و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه در مدت ۲۵ سال حدود ۲۹۰ میلیارد ریال خواهد بود. در جدول ۷ مقادیر درصد حذف آلاینده CBOD متناظر با برخی گزینه‌های مطلوب ارائه شده در جبهه پرتو شکل ۸ نمایش می‌دهد. همچنین مقادیر توابع

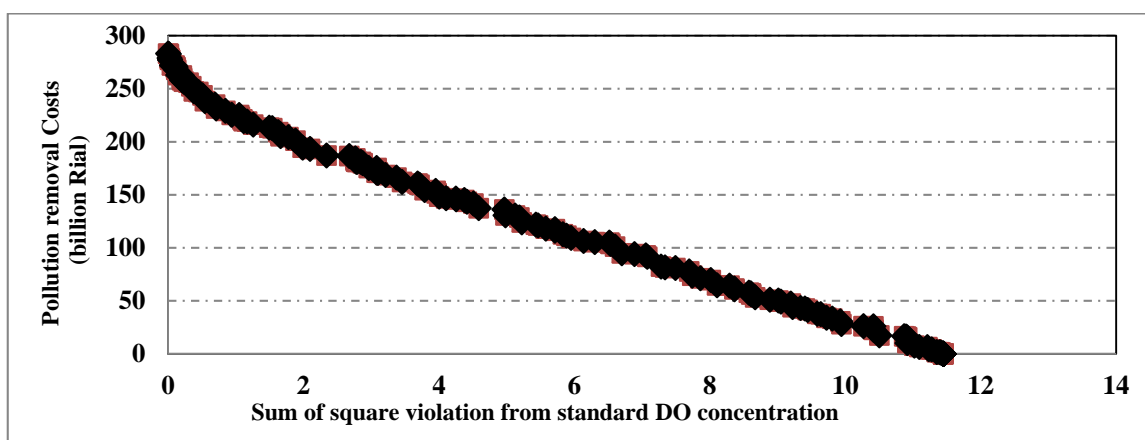


Fig. 8- Optimal Pareto front of problem 1-2; minimizing treatment costs and enhancing water quality

شکل ۸- جبهه پرتو بهینه مسأله ۱-۲؛ کاهش هزینه‌های تصفیه و بهبود کیفیت رودخانه

Table 7- Detailed design of some alternatives presented in Fig. 8

جدول ۷- جزئیات طراحی چند گزینه از جبهه پرتو ارائه شده شکل ۸

Removal rates of CBOD pollution sources respectively from upstream (1 to 8 point sources)								Cost function (billion Rial)	Quality function
0	0	0	0.005	0	0	0	0	2.02	11.35
0	0	0	0.18	0	0	0	0	74.9	8.11
0	0	0.36	0.19	0.005	0.08	0	0.05	81.56	7.86
0.09	0	0	0.35	0.02	0.06	0	0	143.25	5.22
0.04	0	0.33	0.55	0	0.74	0.19	0.18	247.0	1.49

۳-۳-۳- مسأله تخصیص بار چند آلاینده

مسئله دوم تخصیص بهینه بار آلودگی با هدف مینیمم نمودن هزینه‌های تصفیه و بهبود شاخص کیفیت آب رودخانه قشلاق (تجمیع پارامترهای کیفی اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، ذرات معلق، کلیفرم و BOD بر اساس (Swamee and Tyagi (2000) در حالتی که ورود آلودگی‌هایی با ماهیت‌های متفاوت از واحدهای صنعتی و شهری به رودخانه امکان‌پذیر است، مورد توجه قرار گرفت. بر اساس داده‌های گردآوری شده واحدهای آلاینده صنعتی دارای آلودگی‌های CBOD، COD و ذرات معلق جامد و واحدهای آلاینده شهری دارای آلودگی‌هایی با ماهیت NH_4-N ، NO_3-N ، PO_4-P ، Total Colif. و CBOD می‌باشند. به این ترتیب ۸ واحد آلاینده که دو واحد دارای ۵ نوع آلودگی و ۶ واحد آلاینده دارای ۳ نوع آلودگی هستند، باعث ایجاد کیفیت نامطلوب در آب رودخانه قشلاق می‌گردند. برای حل این مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی، ۲۸ متغیر تصمیم که بیانگر درصد حذف هر آلاینده در منابع بارگذاری نقطه‌ای می‌باشند، می‌باید توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین گردند. برای حل این مسأله تعداد ۵۰ ذره اولیه در ۵۰۰ تکرار، توسط الگوریتم دوهدفه

هوش جمعی ذرات تولید می‌گردد. بر اساس آنالیز حساسیتهای صورت گرفته، وزن اینرسی از مقدار اولیه ۰/۹ تا مقدار نهایی ۰/۳ تغییر و همچنین ضریب جزء شناختی C1 از مقدار اولیه ۲/۸ تا مقدار نهایی ۰/۷ کاهش و ضریب جزء اجتماعی C2 از مقدار ابتدایی ۰/۵ تا مقدار پایانی ۲/۴ افزایش می‌یابد. نتایج حل این مسأله در شکل ۹ نمایش داده شده است.

همانگونه که در شکل ۹ نمایان است بهترین مقدار شاخص کیفی آب رودخانه قشلاق با تخصیص بهینه بار آلودگی در این مسأله مقدار ۰/۲۳ حاصل گردیده است که نمایانگر تاثیرپذیری رودخانه از آلودگی‌های زمینی و بالادست محدوده مطالعات می‌تواند باشد. در این حالت هزینه احداث، نگهداری و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه‌خانه این واحدهای آلاینده برای افق ۲۵ ساله با توجه به فرضیات مسأله، حدود ۴۲۰/۰۰۰ میلیارد ریال تخمین زده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد منظور نمودن آلودگی‌های مختلف در مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی، سبب صرف هزینه‌های به مراتب بالاتری در سیستم مورد مطالعه می‌گردد.

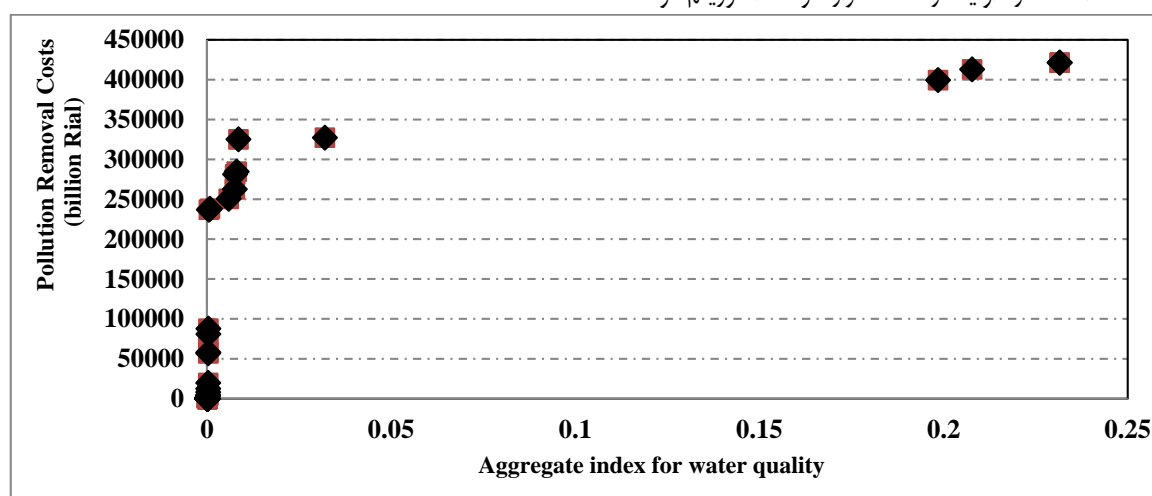


Fig. 9- Optimal Pareto front of multi-waste load allocation problem

شکل ۹- جبهه پرتو بهینه مسأله تخصیص بار آلودگی چند آلاینده

Table 8-Detailed design for industrial pollution sources in some alternatives presented in Fig. 9

جدول ۸- جزئیات طراحی فاضلاب صنعتی گزینه‌هایی از جبهه پرتو ارائه شده شکل ۹

TSS removal rate						CBOD removal rate						COD removal rate						Cost function (billion Rial)	Quality function
2	3	4	6	7	8	2	3	4	6	7	8	2	3	4	6	7	8		
0.93	0.96	0.98	0.94	0.99	0.99	1	1	0.92	1	0.8	1	1	0.97	1	0.94	1	1	447713.0	0.23
0.09	0.08	0	0.27	0.25	0	0.27	0.11	0.38	0.60	0.06	0.09	0.37	0.13	0	0	0.57	0	376468.10	0.01
0.02	0	0.32	0.58	0	0.10	0.39	0	0.48	0.54	0.07	0	0.4	0	0	0	1	0.34	5366.00	0.00033
0	0.03	0	0	0	0	0.31	0.08	0	0.17	0	0.23	0	0.14	0	0.05	0.16	0	76.80	0.0001

Table 9- Detailed design for municipal pollution sources in in some presented alternatives in Fig. 9

جدول ۹- جزئیات طراحی فاضلاب شهری گزینه‌هایی از جبهه پرتو ارائه شده شکل ۹

CBOD5 removal rate		NH4 removal rate		NO3 removal rate		PO4 removal rate		Coliform removal rate		Cost function (billion Rial)	Quality function
1	5	1	5	1	5	1	5	1	5		
1	1	0.65	1	1	0.31	1	1	1	1	447713.0	0.23
0.7	0.4	0.07	1	0.25	0.29	0	0.36	0.22	0	376468.10	0.01
0	0.02	0	0	0.25	0	0.03	0	0.06	0.78	5366.00	0.00033
0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	76.80	0.0001

دائمی شبیه‌سازی کیفیت آب با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه هوش جمعی ذرات برای حل مسأله پیشنهادی در این تحقیق، مورد استفاده قرار گرفتند. مسأله تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه قشلاق با در نظر گرفتن تنها بار آلودگی CBOD از منابع آلاینده نقطه‌ای واقع در امتداد آن، کنترل غلظت اکسیژن محلول در نقاط پایش رودخانه، کاهش تخطی این پارامتر کیفی از استانداردهای مجاز و کاهش هزینه‌های احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها در غالب مسأله تخصیص بهینه بار یک آلاینده دنبال گردید. همچنین با استفاده از مطالعات گذشته و سهم منابع مختلف در تولید آلودگی، مقادیر بار آلودگی از منابع آلاینده با در نظر گرفتن نوع شهری و صنعتی آنها و با در نظر گرفتن ماهیت‌های متفاوت مورد محاسبه قرار گرفت. سپس مسأله تخصیص بهینه بار چندآلاینده (NO₃-N، NH₄-N، PO₄-P، TSS، COD، BOD، کلیفرم) با اهداف بهبود شاخص کیفی تجمیع یافته کیفیت آب و کاهش هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری تصفیه‌خانه‌های حذف آلاینده‌های مرور شده، حل گردید. مسأله دوم تخصیص بار آلودگی تعریف شده در این تحقیق با ۲۸ متغیر تصمیم نسبت به مسأله نخست با ۸ متغیر تصمیم، مسأله به مراتب پیچیده‌تری بوده است.

بر اساس نتایج حاصل در حالت تخصیص بهینه بار چند آلودگی

همچنین بر اساس نتایج حاصل در مسأله تخصیص بار چند آلاینده، سیاستهای تخصیص بهینه بار آلودگی می‌باید در محدوده گسترده‌تری از رودخانه و کنترل منابع آلاینده بیشتری دنبال گردد. در جدول ۸ و جدول ۹ مقادیر حذف آلاینده‌های مختلف در فاضلابهای شهری (واحدهای ۱ و ۵) و صنعتی (واحدهای ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸) و هزینه‌ها و شاخص کیفی متناظر آنها در برخی گزینه‌های ارائه شده در شکل ۹ ارائه شده است. توابع هدف شاخص کیفی و هزینه بر اساس معادله ۱۳ و معادله ۱۵ محاسبه گردیدند. همانگونه که در قسمت روش تحقیق و جدول ۳ عنوان گردید واحدهای آلاینده ۱ و ۵ فاضلابهای شهری بوده و حاوی آلاینده‌های CBOD₅، آمونیم، نیترات، فسفات و کلیفرم می‌باشند. بقیه واحدهای آلاینده، صنعتی بوده و حاوی آلاینده‌های CBOD₅، COD و ذرات معلق می‌باشند. همانگونه که در نتایج این جدول مشاهده می‌گردد انتخاب درصد‌های بالای حذف آلودگی از واحدهای آلاینده ۱، ۵ و ۷ سبب بهبود شاخص کیفی آب مورد مطالعه در این تحقیق می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در اینکار تحقیقاتی، مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی ۸ منبع نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دنبال گردید. مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw، مدل یک‌بعدی و

Afshar A, Masoumi F (2016) Waste load reallocation in river-reservoir systems: simulation-optimization approach. *Environmental Earth Science* 75:53, doi:10.1007/s12665-015-4812-x

Asheghmoala M, Fazel AM, Homami M (2014) The effect of river assimilative capacity in determination of allowable water quality parameters in sewages. *Environmental Science and Engineering* 1(4):37-49 (In Persian)

Ashtiani F, Niksokhan MH, Ardestani M (2015) Multi-objective waste load allocation in river system by MOPSO algorithm. *International Journal of Environmental Research* 9(1):69-76

Berger CJ, Annear RL, Wells SA (2002) Willamette river and Columbia river waste load allocation model. In: Proc. of the 2nd Federal Inter Agency Hydrologic Modeling Conference, July 28-Aug 1, Las Vegas, USA

Jafari Salim B (2009) Identification of pollution sources and pollution load determination in Gheshlagh river. MS. Thesis, College of Environment, Tehran University (In Persian)

Pelletier G, Chapra S (2008) QUAL2Kw: Theory and documentation; a modeling framework for simulating river and stream water quality: documentation and user's manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA

Chen CF, Ma HW (2008) The uncertainty effects of design flow on water quality management. *Environmental Monitoring and Assessment* 144:81-91

Cho JH, Ahn KH, Chung WJ, Gwon EM (2003) Waste load allocation for water quality management of a heavily polluted river using linear programming. *Water Science and Technology* 48(10):185-90

Damghani KK, Abtahi AR, Tavana M (2013) A new multi-objective particle swarm optimization method for solving reliability redundancy allocation problems. *Reliability Engineering & System Safety* 111:58-75

De Andrade LN, Mauri GR, Mendonça ASF (2013) General multiobjective model and simulated annealing algorithm for waste-load allocation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 139(3):339-344

Hernandez EA, Uddameri V (2013) An assessment of optimal waste load allocation and assimilation characteristics in the Arroyo Colorado river watershed: TX along the US-Mexico Border. *Clean Technology Environmental Policy* 15:617-631

هزینه‌های احداث، نگهداری و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه‌خانه نسبت به حالت مطالعه تنها یک نوع آلودگی، افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین به دلیل گستره محدود انتخاب شده در مسأله تخصیص چند نوع بار آلودگی و به دنبال آن وجود آلودگی‌های زمینه، بهبود مطلق شاخص کیفیت آب تعریف شده در این تحقیق میسر نگردد. به عبارتی به منظور عاری نمودن رودخانه از کلیه آلودگی‌های مورد مطالعه، می‌باید گستره طولی وسیع‌تری از رودخانه مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین استفاده از رویکرد پیشنهادی در محدوده مطالعاتی گسترده‌تر و در نظر گرفتن سایر پیکره‌های آبی مانند مخزن، تالاب و... همراه با رودخانه و در ساختاری یکپارچه پیشنهاد می‌گردد. جهت ادامه تحقیقات در این حوزه در آینده لازم است منابع آلاینده غیرنقطه‌ای (زهابهای کشاورزی، روانابهای شهری و...) در کنار منابع آلاینده نقطه‌ای و عدم قطعیت‌ها لحاظ گردند. به عبارتی می‌توان با شبیه‌سازی دینامیک متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی و نیز کیفی، اثر تغییرات وابسته به زمان این مؤلفه‌ها را در نظر گرفت. برای این منظور، می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرو دینامیک و کیفیت آب چندبعدی مانند CE-QUAL-W2، Mike Basin، WASP و... جهت شبیه‌سازی رفتار پیکره آبی در ساختاری چند بعدی و /یا دینامیک بهره برد. همچنین بکارگیری تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یا تئوری بازیها می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان حوزه مدیریت کیفی منابع آب را در انتخاب گزینه ارجح از میان گزینه‌های متعدد ارائه شده در جبهه پرتو مسأله بهینه‌سازی چندهدفه یاری نماید.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Assimilative Capacity
- 2- Optimum Waste Load Allocations
- 3- Willamette River
- 4- Oregon
- 5- Gyungan River
- 6- Multi-Objective Ant Colony Optimization
- 7- Multi-Objective Simulated Annealing
- 8- Arroyo Colorado
- 9- Santa Maria da Vitória

۵- مراجع

Afshar A, Kazemi H, Saadatpour M (2011) Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): application to Karkkeh reservoir, Iran. *Water Resource Management* 25:2613-2632

- Sharifi F, Fang L, Afshar A (2010) A negotiation based approach to waste load allocation problems. In: Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 10-13, Istanbul, Turkey
- Swamee PK, Tyagi A (2000) Describing water quality with aggregate index. *Journal of Environmental Engineering* 126:451-455
- Vasudevan M, Nambi IM, Kumar GS (2011) Application of QUAL2K for assessing waste loading scenario in river Yamuna. *International Journal of Advanced Engineering Technology* 2(2):336-344
- Yandamuri SRM, Srinivasan K, Bhallamudi SM (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
- Zewdie M, Bhallamudi SM (2011) Multi objective optimization model for waste load allocation in a tidal river. In: Proc. of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference, June 19-24, Skiathos, Greece
- Hosseinzadeh H, Afshar A, Sharifi F (2010) Multiobjective waste load allocation using multicolony ant algorithm. *Iran-Water Resources Research* 6(2):1-3
- Kumar KP (2014) Development and application of multiobjective fuzzy waste load allocation model. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science* 2(9):127-138
- Mostafavi SA, Afshar A (2011) Waste load allocation using non-dominated archiving multi-colony ant algorithm. *Procedia Computer Science* 3:64-69
- Saadatpour M (2004) Simulation-optimization model in fuzzy waste load allocation. MS Thesis, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (In Persian)
- Saadatpour M, Afshar A (2013) Multi objective simulation-optimization approach in pollution spill response management model in reservoirs. *Water Resource Management* 27:1851-1865
- Saremi A, Sedghi H, Manshouri M, Kave F (2010) Development of multi-objective optimal waste model for Haraz river. *World Applied Sciences Journal* 11(8):924-929