

## Research Paper

# An optimization model for green water and wastewater network redesign considering different quality of returned wastewater

Zahra Ebrahimi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Gholamian<sup>2\*</sup>, Mahsa Arabi<sup>3</sup>

1. MSc of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2. Associate Prof. of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3. PhD Candidate of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Received: 2019/11/15

Revised: 2020/02/01

Accepted: 2021/02/21

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/wej.2023.5828](https://doi.org/10.30495/wej.2023.5828)

### Keywords:

Water/Wastewater Network, Green Supply Chain, Multi-Objective Optimization,  $\epsilon$ -Constraint Method, Quality of Returns

### Abstract

**Introduction:** Expansion of urbanization, increasing in the population of planet, excessive exploitation of water resources and wastewater release in nature have negative and irreversible impacts on the environment. The present research has been carried out in order to optimize the redesign model of the green water and wastewater network.

**Methods:** In this research, a bi-objective optimization model for the green redesign of the water and wastewater network is proposed. The model includes locating the optimal place of storage ponds and also optimally allocating the treated wastewater to agricultural areas and industrial settlements in order to mitigate the devastating effects of discharging industrial wastewater into the municipal wastewater treatment plants and eventually mitigating the entry of such pollutants into the environment. The proposed model, has been solved using the  $\epsilon$ -constraint method.

**Findings:** Accordingly, the total system cost is minimized, the demand is met and simultaneously the environmental issues are met and the environmental pollution load of the network is minimized, because of network redesign. Also, a sensitivity analysis is performed on some important parameters.

**Conclusion:** The results showed that the proposed model can help the designers in this field to design the distribution network, because despite the increase in costs the environmental pollution is reduced by installing COD meters and performing environmental disinfection. In addition, in this model, it has been tried to compensate part of the increased costs by selling activated sludge.

**Citation:** Ebrahimi Z, Gholamian MR, Arabi M. An optimization model for green water and wastewater network redesign considering different quality of returned wastewater. Water Resources Engineering Journal. 2023; 16(57): 103- 120.

**\*Corresponding author:** Mohammad Reza Gholamian

**Address:** School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

**Tell:** +982173225067

**Email:** Gholamian@iust.ac.ir

## Extended Abstract

### Introduction

Water has always been one of the most important resources for economic-social development and keeping the environment healthy. The increase in various usages of water on one hand and development of the agricultural and industrial sectors on other hand have led to an increase in water consumption and the creation of a water shortage crisis in recent years. So, it seems that paying attention to this issue, to be vital. Also, It should be paying attention to other related issues such as increasing raw wastewater, dry and semi-arid climates in countries like Iran, and trying to avoid excessive use of purified water resources for agriculture and industrial sections. On the other hand, in some treatment plants, industrial wastewaters with municipal wastewaters are entered simultaneously into the treatment system. The important issue is that the exact quality of wastewater at any moment is unknown due to its combination with municipal wastewater, that leads to the high environmental pollution caused by the inability to treat it in urban treatment plants. Unfortunately, there is a wide range of wastewater pollution which includes organic and inorganic substances suspended or dissolved in water with different densities and sizes. Sometimes substances with high nitrogen or high sulfate as well as non-biodegradable pollutants are also observed in these wastewaters. As a result, in this research, in order to decide on installing equipments or performing disinfection with ozone gas, a mathematical model has been developed.

### Materials and Methods

This research aims to redesign a water and wastewater network from the stage of water supply and treatment to collection and inspection and to the stage of wastewater treatment and redistribution to candidate points and finally receiving wastewater,

taking into account the reduction of harmful effects on the environment. One of the advantages of this type of integrated design is to prevent sub-optimality which leads to economic savings. So far, various tools have been used to make such decisions, one of the most widely used of which is the operation research approach. To this end in this research, a mathematical model has been presented with the aim of minimization of total cost along with minimization of harmful environmental effects in the form of bi-objective programming model. Also, in order to optimize the structure of water and waste water network, the optimal location of storage ponds for planning after water consumption and optimal allocation of wastewater flow between facilities have been determined. Meanwhile, the very important issue of using the produced activated sludge along with the issues raised in the design of the activated sludge system and decontamination have been considered for the first time.

### Findings

In the developed model, South Tehran Refinery, with 6 counties in South of Tehran as agricultural hubs, and 2 industrial settlements as wastewater requesting industries have been selected for case study. It should be noted that the problem was designed and solved based on real information and field researches, which has inevitably led to the consideration of many assumptions for the problem. When the model is optimized without considering water pollution and only with the aim of reducing costs, a pond with a capacity of 45 million cubic meters should be built and a channel should be created between this pond and all agricultural areas (except #4). Also, Industrial settlements as consumers of treated wastewater can be connected to this pond. At result, cost can be decreased about 70%. On the other hand, when the model is optimized only with the aim of reducing water pollution, it is necessary to install COD meters and carry out decontamination in all channels. Again, a pond with a capacity of 45

million cubic meters should be built and a channel should be created between this pond and all agricultural areas; but water pollution would be reduced from 30187 into 13643 units. All solutions between these two extreme conditions also can be considered by the managers and decision makers.

### Discussion

As expected, if we are not able to compensate for the increase in costs, the amount of pollution will also increase, which means that if we do not accept the increase in costs, we will inevitably witness water and environment pollution. This issue is important since it demonstrates the role of legislative and responsible institutions in environmental aspects. In fact, if the water and wastewater companies cannot somehow compensate for this increase in costs, the government and other social organizations should participate in programs to protect the water pollution in order to achieve at least the same level of pollution as before this increase. Also, by examining the effect of changes in the efficiency of water transmission, it was found that increasing the efficiency of transmission reduces costs and also reduces water pollution. Another important topic of this research is determining the optimal age of sludge, due to income generated from the sale of sludge. But it was observed that by increasing age of the sludge, the total cost will be increased. Finally, as expected, the objective functions are in conflict with each other, which means that in order to reduce the environmental effects, we need to increase the costs by equipping the treatment plants, with COD meters or disinfection and so on; and vice versa. It is up to managers to select the best trade-off between total cost and level of environmental effects based on managerial conditions.

### Conclusion

This research, in the form of presenting a comprehensive mathematical model and in accordance with the real conditions to deal with the conditions of lack of information and other limitations of the problem, can be used to determine the locations of construction of storage ponds and possibility of providing wastewater to the applicants (farmers and industries) according to the environmental conditions. In general, the overall optimization results of green redesign of the water and wastewater closed loop network and the distribution of treated municipal wastewater for agricultural and industrial purposes, will help the decision makers in this field.

### Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

No funding.

### Authors' contributions

Design and conceptualization: Zahra Ebrahimi, Mohammad Reza Gholamian.

Methodology and data analysis: Zahra Ebrahimi, Mohammad Reza Gholamian, Mahsa Arabi.

Supervision and final writing: Zahra Ebrahimi, Mohammad Reza Gholamian, Mahsa Arabi.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## مدل بهینه‌سازی بازطراحی شبکه سبز آب و فاضلاب با در نظر گرفتن کیفیت متفاوت پساب بازگشتی

زهرا ابراهیمی<sup>۱</sup>، محمدرضا غلامیان<sup>۲\*</sup>، مهسا عربی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

**مقدمه:** گسترش شهرنشینی، افزایش جمعیت کره زمین، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی و رهاسازی فاضلاب در طبیعت تأثیرات منفی و جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست برجا گذاشته است. تحقیق حاضر به منظور بهینه‌سازی مدل بازطراحی شبکه سبز آب و فاضلاب انجام گرفته است.

**روش:** در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه جهت بازطراحی شبکه آب و فاضلاب شامل مکان‌یابی حوضچه‌های ذخیره و نیز امکان تخصیص بهینه پساب تصفیه‌شده به مناطق کشاورزی و شهرک‌های صنعتی با رویکرد کاهش اثرات ویرانگر تخلیه فاضلاب‌های صنعتی واردشده به تصفیه‌خانه شهری و درنهایت ورود این‌گونه آلاینده‌ها به محیط‌زیست ارائه شده است. مدل ارائه شده به کمک روش به کمک روش اپسیلون محدودیت حل گردیده است.

**یافته‌ها:** بر این اساس، هزینه کل سیستم حداقل گردیده، تقاضا پاسخ‌داده‌شده و هم‌زمان مسائل زیست‌محیطی در طول بازطراحی شبکه رعایت شده و بار آلودگی زیست‌محیطی شبکه به حداقل میزان خود می‌رسد. همچنین، تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای مهم انجام شده است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند به طراحان در این حوزه جهت طراحی شبکه توزیع کمک شایانی کند، چراکه علی‌رغم افزایش هزینه‌ها با نصب COD متر و انجام گندزدایی، آلودگی محیط‌زیست کاهش می‌یابد. ضمن آنکه در این مدل سعی شده بخشی از افزایش هزینه‌ها را با فروش لجن فعال جبران نمود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۴

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/wej.2023.5828](https://doi.org/10.30495/wej.2023.5828)

## واژه‌های کلیدی:

شبکه آب و فاضلاب، زنجیره تأمین سبز، بهینه‌سازی چندهدفه، روش اپسیلون محدودیت، کیفیت بازگشتی‌ها.

\* نویسنده مسئول: محمدرضا غلامیان

نشانی: دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۵۰۶۷

پست الکترونیکی: Gholamian@iust.ac.ir

## مقدمه

آب همواره یکی از مهم‌ترین منابع برای توسعه‌ی اقتصادی - اجتماعی و سالم نگه‌داشتن محیط‌زیست بوده است. افزایش مصارف آب از طرفی و توسعه‌ی بخش کشاورزی و صنعتی از طرف دیگر منجر به افزایش مصرف آب و ایجاد بحران کم‌آبی در سالیان اخیر شده است. مصرف‌کنندگان در یک شبکه توزیع آب و فاضلاب به‌طور معمول عبارت‌اند از: ۱- بخش شهری ۲- بخش کشاورزی ۳- بخش صنعت که البته عمده‌ترین نیاز مربوط به بخش شهری هست. این پژوهش قصد دارد یک شبکه آب و فاضلاب را از مرحله تأمین و تصفیه آب تا جمع‌آوری و بازرسی و تا مرحله تصفیه فاضلاب و توزیع مجدد به نقاط کاندیدا و نهایتاً دریافت پساب با در نظرگیری کاهش اثرات مخرب وارده به محیط‌زیست بازطراحی کند. یکی از مزایای این نوع طراحی یکپارچه، جلوگیری از زیر بهینگی و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی هست. از طرفی باهم زمانی ورود گاه‌به‌گاه انواع فاضلاب‌ها مانند شهری و صنعتی، کارشناسان تصفیه‌خانه ممکن است با کمبود اطلاعات در مورد مشخصات و کیفیت فاضلاب ورودی مواجه شوند. این مسئله مهم با استفاده از برخی تجهیزات اندازه‌گیری آنلاین قابل بررسی در لحظه است و در نتیجه می‌توان تصمیمات بهتری در این زمینه اتخاذ نمود تا علاوه بر بهبود عملیات تصفیه، آسیب و صدمات به محیط‌زیست کمتر شود. تاکنون برای اتخاذ چنین تصمیماتی از ابزارهای متنوعی استفاده شده است که یکی از پرکاربردترین آن‌ها رویکرد تحقیق در عملیات بوده است که شاید بتوان گفت قدمت ۴۰ ساله دارد (۱). وابسته بودن حیات به آب، اهمیت مدیریت صحیح منابع آب را در میان موارد ذکر شده در دستیابی به توسعه پایدار به‌خوبی روشن می‌سازد، از این رو جمع‌آوری و تصفیه صحیح فاضلاب شهری هم می‌تواند مانع آلودگی محیط‌زیست از جمله منابع آب زیرزمینی شود و هم در صورت برنامه‌ریزی صحیح می‌تواند جایگزین ارزان و مناسبی برای مصارف مختلف باشد. در نتیجه منابع ارزشمند آب شیرین برای نسل‌های بعد نیز باقی خواهند ماند و از پساب تصفیه‌شده در امر کشاورزی و صنایع استفاده خواهد شد که خود سبب افزایش محصولات کشاورزی و نیز حفظ منابع آب در صنایع خواهد بود.

در زمینه مدیریت منابع آب و استفاده از پساب، مطالعات متعددی توسط محققین انجام شده است. ارائه مدل‌های بهینه‌سازی برای سیستم‌های جمع‌آوری پساب منطقه‌ای تقریباً از دهه ۶۰ با مقاله دینگر (۲) آغاز شد. آن‌ها از برنامه‌ریزی خطی برای طراحی سیستم جمع‌آوری پساب و انتقال آن استفاده کردند. مدل آن‌ها بسیار ساده و ابتدایی بوده است. پس‌از آن اسمیرز (۳) با الهام از تحقیقات قبلی و توسعه آن‌ها از برنامه‌ریزی غیرخطی برای این کار استفاده کرد. ژانگ (۴) در تحقیق خود سعی بر برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده مجدد از فاضلاب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی با تأکید بر مسائل عدم قطعیت در ارتباط با تقاضای آب داشته‌اند.

داندی و همکاران (۵) در مقاله خود با در نظر گرفتن تراکم قابل پیش‌بینی منطقه مسکونی به طراحی سیستم آب آشامیدنی و جمع‌آوری فاضلاب در یک سطح پرداخته و در طرح خود سعی در ترکیب دو مدل توزیع و جمع‌آوری نمودند، به‌گونه‌ای که تصفیه‌خانه‌ها با بیشترین

سازگاری ممکن نسبت به دو مدل انتخاب شوند. چانگ و همکاران (۶) مدلی برای طراحی شبکه توزیع آب ارائه دادند که دارای پارامترهای غیرقطعی نظیر میزان بارش، تقاضا و میزان آب وارداتی بود. ری و همکاران (۷) یک سیستم یکپارچه آب و فاضلاب در لبنان در نظر گرفتند و مدلی با در نظر گرفتن چندین کیفیت برای آب آشامیدنی در شرایط قطعی ارائه می‌نمایند. لئو و همکاران (۸) یک رویکرد بهینه‌سازی برای مدیریت یکپارچه منابع آب از جمله آب‌های شیرین شده، فاضلاب و آب بازیافت شده برای مناطق درگیر با کمبود آب بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه می‌کنند. در طول سالیان اخیر تعدادی از متدهای بهینه‌سازی برای مقابله با عدم قطعیت در مدیریت منابع آب پیشنهاد شده است. برای مثال گو و همکاران (۹) یک رویکرد برنامه‌ریزی غیرقطعی در مرحله‌ای فازی برای مدیریت منابع آب تحت عدم قطعیت‌های چندگانه با مشخصه‌های تصادفی و فازی توسعه دادند. ژو و همکاران (۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی فازی برای تصمیم‌گیری یکپارچه برای سیستم عملیاتی آب شهری ارائه دادند. هم‌چنین آن‌ها برخی پارامترهای موجود مانند تقاضای آب، ظرفیت تصفیه‌خانه و مخازن، هزینه انتقال آب و نرخ نشت آب را به‌صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفتند. مرتضوی نائینی و همکاران (۱۱) برای طراحی شبکه آب‌رسانی شهری با قابلیت اطمینان بالا و در شرایط عدم قطعیت برای تغییرات شرایط آب و هوایی در آینده، به ارائه مدلی تصادفی چندهدفه به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو می‌پردازند. ایشان با در نظر گرفتن تابع هزینه به مدل‌سازی سیستم تأمین آب پرداختند. الظهرانی و همکاران (۱۲) با کمک یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی آرمانی در شرایط عدم قطعیت برای پارامترهایی همچون تقاضا، پویایی جمعیت، الگوهای مصرف آب، کیفیت آب و ارزیابی هزینه‌ها با در نظر گرفتن منابع مختلف آبی به بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در ریاض عربستان می‌پردازند. قلیچی و همکاران (۱۳) در پژوهش خود به بررسی و ارائه یک مدل استوار جدید چند دوره‌ای باهدف کمینه کردن هزینه‌ها برای یک سیستم یکپارچه توزیع آب (آشامیدنی و غیر آشامیدنی) با در نظر گرفتن تقاضا و میزان بارش به‌صورت غیرقطعی پرداختند. عبدالباکی و همکاران (۱۴) در مقاله خود به بحث تخصیص بهینه منابع آبی به کمک برنامه‌ریزی خطی پرداختند. ایشان ضمن حداقل کردن هزینه‌ها به کمینه کردن هزینه‌های زیست‌محیطی (اثرات کربن) توجه نموده‌اند. رضایی و همکاران (۱۵) در تحقیق خود یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای به حداقل رساندن هزینه‌ها و نیز اثرات کربن (به‌عنوان یک شاخص زیست‌محیطی) با تعیین محل تصفیه‌خانه، ارائه نمودند. در این تحقیق ظرفیت تصفیه‌خانه، انتخاب تکنولوژی تصفیه و تخصیص مشتری (مصرف‌کنندگان آب قابل استفاده در سطح نهایی) و همچنین تأثیر تراکم جمعیت موردبررسی قرار گرفتند. قاسمی و همکاران (۱۶) به بررسی مسئله مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن یک شبکه یکپارچه سیستم آب حلقه بسته شامل تسهیلات آب، منابع، مصرف‌کنندگان نهایی و دستگاه‌های فاضلاب می‌پردازند. در پژوهش حاضر از مدل ارائه‌شده در مقاله آن‌ها الهام گرفته شده است.

بررسی مطالعات کیفی انجام‌شده با مشخص کردن مضرات و منافع بالقوه انتقال پساب به مناطق کشاورزی و صنعتی در حقیقت پشتوانه

نهایت دقت مبذول گردیده و سعی شود نگاه زیست‌محیطی در سرتاسر مدیریت زنجیره تأمین داشت تا از این منابع محدود حفاظت گردد. از سال ۱۹۹۰ میلادی، مسائل مربوط به زنجیره تأمین سبز (با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی) به‌طور فزاینده‌ای توسط دولت‌ها، مردم، صنایع و دانشمندان در طراحی و برنامه‌ریزی مسائل در هر دو سطح خرد و کلان در نظر گرفته شده است و دولت‌ها، شرکت‌ها را مجبور به کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های خود کردند و از همه این تولیدکنندگان خواسته شده که مسائل زیست‌محیطی را در زنجیره تأمین خود در نظر بگیرند؛ بنابراین می‌توان گفت این نوع زنجیره تأمین به‌نوعی زیرمجموعه زنجیره تأمین پایدار است. لذا از آنجا که در این مقاله هم‌زمان با مسائل اقتصادی، به مسائل زیست‌محیطی و آلودگی‌های احتمالی نیز توجه شده است بازطراحی زنجیره تأمین انجام شده از نوع سبز می‌باشد.

### بیان مسئله

امروزه توجه به مسئله بحران آب، افزایش روزافزون فاضلاب خام و قرار گرفتن کشورهایی همانند ایران در مناطقی با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک و تلاش جهت عدم استفاده بسیار از منابع آب تصفیه شده برای کشاورزی و مناطق صنعتی، حیاتی به نظر می‌رسد. از طرفی در برخی از تصفیه‌خانه‌ها، هم‌زمان با فاضلاب شهری، فاضلاب‌های صنعتی نیز وارد سیستم تصفیه می‌شوند و مسئله مهم در این مورد مشخص نبودن کیفیت دقیق فاضلاب در هر لحظه به دلیل ترکیب آن با فاضلاب شهری می‌باشد و در این صورت نکته قابل توجه آلودگی‌های زیست‌محیطی بسیار زیاد، ناشی از عدم توانایی تصفیه آن در تصفیه‌خانه‌های شهری است. با توجه به نگرانی‌های موجود در مورد کمیت و کیفیت فاضلاب‌های صنعتی و عوارض شناخته شده آن بر روی انسان و محیط زیست و نیز وجود مواد آلاینده متفاوت و گاهی خطرناک در این فاضلاب و با توجه به احتمال اختلاط فاضلاب صنعتی و خانگی در هنگام ورود به تصفیه خانه، بالا بودن COD<sup>۱</sup> فاضلاب ورودی به عنوان شاخص اندازه‌گیری سطح آلودگی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. متأسفانه آلودگی‌های فاضلاب بسیار متنوع بوده و شامل مواد آلی و غیرآلی معلق یا محلول در آب با دانسیته و اندازه‌های متفاوت می‌باشند. بعضاً موادی با نیتروژن بالا یا سولفات بالا و همچنین آلاینده‌های غیرقابل تجزیه بیولوژیکی هم در این فاضلاب‌ها مشاهده می‌شوند. شاخص COD از این جهت انتخاب شده است که برخلاف BOD<sup>۲</sup>، امکان اکسیژن دهی به کلیه ترکیبات آلی را محاسبه می‌نماید و بعلاوه همچون TSS<sup>۳</sup> و TDS<sup>۴</sup> محدود به نوع خاصی از جامدات موجود در فاضلاب نیست.

مشکل عمده در نحوه برخورد با این وضعیت می‌باشد. در نتیجه، در این تحقیق در جهت تصمیم‌گیری در مورد نصب تجهیزات و یا انجام گندزدایی با گاز ازن به ارائه مدل ریاضی پرداخته می‌شود که علاوه بر

محکمی برای تحقیقات کمی می‌باشد و کمک شایانی به تصمیم‌گیران این حوزه در تهیه طرح توجیهی قابل قبول پیش از هرگونه اقدام عملی خواهد کرد که در ادامه تعدادی از این تحقیقات ارائه خواهد شد. هاو و همکاران (۱۷) به ارزیابی کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه و پساب خروجی از آن پرداخته‌اند که به پارامترهای بسیاری مرتبط است. آن‌ها توانستند از داده‌هایی که از چهار تصفیه‌خانه در شمال چین جمع‌آوری شد و با بررسی یازده شاخص اثرگذار بر کیفیت آب چهار جزء اصلی که می‌تواند اکثر اطلاعات کیفیت آب را نشان دهد به دست بیاورند.

با توجه به اینکه حدود ۲۰ میلیون هکتار از اراضی سراسر جهان توسط پساب تغذیه می‌شوند، پاسخ به این سؤال که آیا استفاده از پساب جهت آبیاری مناطق حاشیه‌ای شهرها تحت مدیریتی مستمر باشد موضوع کار تحقیقی کوریان و همکارانش (۱۸) بوده است. آن‌ها از جمله مزایای آبیاری با پساب را بالا بودن مزایای اقتصادی استفاده از پساب، نقش فعالیت‌های کشاورزی و بازار و تنوع محصول بر انتخاب پساب برای آبیاری، برشمردند.

همچنین استفاده مجدد از پساب تصفیه شده در صنایع نیز بسیار مورد توجه است زیرا هم سبب صرفه‌جویی در میزان مصرف آب و در نتیجه کاهش فشار بر منابع آبی می‌شود هم با امکان بازچرخانی مجدد این پساب در واحدهای صنعتی از آلودگی بیشتر محیط‌زیست جلوگیری می‌شود. نیاز صنایع به میزان آب مصرفی با توجه به رشد و توسعه صنایع بیشتر شده است و با توجه به مصارف مختلف هم در برج‌های خنک‌کننده هم آب دیگ بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصغری مقدم و همکارانش (۱۹) امکان‌سنجی استفاده مجدد از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز را برای مصارف کشاورزی و صنعتی بررسی کردند و معیارهای کیفی لازم جهت استفاده از پساب در شهرک‌های صنعتی و مناطق کشاورزی را تعیین نمودند.

### توسعه پایدار و ابعاد آن

توسعه پایدار توسعه‌ای است که نیازهای نسل حاضر را برآورده سازد، بدون اینکه توانایی نسل آینده را در برآورده ساختن نیازهای خویش محدود نماید. راهبرد اصلی توسعه پایدار این است که رشد اقتصادی را با عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست همراه گرداند. توسعه پایدار دارای سه اصل پایداری اقتصادی، پایداری اجتماعی و پایداری محیط‌زیست است.

### زنجیره تأمین سبز

طراحی و بهره‌برداری زنجیره‌های تأمین به‌طور سنتی بر اساس اهداف اقتصادی و فناوری مانند به حداکثر رساندن درآمد/به حداقل رساندن هزینه، به حداکثر رساندن پاسخ‌دهی، افزایش انعطاف‌پذیری و غیره است. در اکثر کشورها به این نتیجه رسیده‌اند که توسعه زمانی مداوم و پایدار می‌گردد که هنگام استفاده از منابع محدود و غیرقابل تجدید،

<sup>۳</sup> TSS: Total Suspended Solids

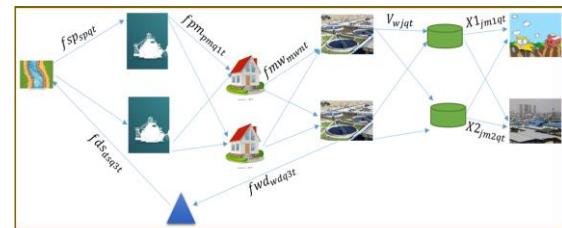
<sup>۴</sup> TDS: Total Dissolved Solids

<sup>۱</sup> COD: Chemical Oxygen Demand

<sup>۲</sup> BOD: Biochemical Oxygen Demand

حداکثر میزان فاضلاب قابل پذیرش در تصفیه‌خانه فاضلاب $w$	$MW_w$
حداکثر ظرفیت پذیرش پساب در سیستم تخلیه $d$	$MD_d$
حداکثر جریان آب از منبع $s$ به تصفیه‌خانه $p$	$MSP_{sp}$
حداکثر جریان آب از تصفیه‌خانه $p$ به مصرف‌کننده $m$	$MPM_{pm}$
حداکثر جریان فاضلاب از مصرف‌کننده $m$ به تصفیه‌خانه فاضلاب $w$	$MMW_{mw}$
حداکثر جریان پساب از تصفیه‌خانه فاضلاب $w$ به سیستم تخلیه $d$	$MWD_{wd}$
حداکثر جریان مجاز از تصفیه‌خانه $w$ به حوضچه $j$	$MWJ_{wj}$
حداکثر جریان پساب از سیستم تخلیه $d$ به منبع $s$	$MDS_{ds}$
عدد ثابت بزرگ	$M$
هزینه ثابت ذخیره هر واحد آب برای مصرف‌کننده $m$ در دوره $t$	$CMF_{mt}$
هزینه متغیر ذخیره هر واحد آب برای مصرف‌کننده $m$ در دوره $t$	$CMV_{mt}$
هزینه استخراج و حمل هر واحد آب از منبع $s$ به تصفیه‌خانه $p$ در دوره $t$	$CSP_{spt}$
هزینه حمل هر واحد آب از تصفیه‌خانه $p$ به مصرف‌کننده $m$ در دوره $t$	$CPM_{pmt}$
هزینه حمل هر واحد فاضلاب از مصرف‌کننده $m$ به تصفیه‌خانه $w$ در دوره $t$	$CMW_{mwt}$
هزینه حمل هر واحد پساب از تصفیه‌خانه $w$ به سیستم تخلیه $d$ در دوره $t$	$CWD_{wdt}$
هزینه حمل هر واحد پساب از سیستم تخلیه $d$ به منبع $s$ در دوره $t$	$CDS_{dst}$
هزینه ثابت تصفیه آب و تغییر کیفیت آن از $q$ به $q_1$ در تصفیه‌خانه $p$ در دوره $t$	$CPF_{qq_1pt}$
هزینه متغیر تصفیه آب و تغییر کیفیت آن از $q$ به $q_1$ در تصفیه‌خانه $p$ در دوره $t$	$CPV_{qq_1pt}$
هزینه ثابت تصفیه هر واحد فاضلاب در تصفیه‌خانه $w$ در دوره $t$	$CWF_{wt}$
هزینه متغیر تصفیه هر واحد فاضلاب در تصفیه‌خانه $w$ در دوره $t$	$CWV_{wt}$
هزینه ثابت احداث حوضچه ذخیره $j$	$CB_j$
هزینه ثابت احداث یک متر کانال بین تصفیه‌خانه $w$ و حوضچه ذخیره $j$ پساب	$A1_{wj}$
هزینه ثابت احداث یک متر کانال بین حوضچه ذخیره $j$ و منطقه تقاضای $m_1$ برای پساب با کیفیت $q_f$	$A2_{m_1q_fj}$

منظور نمودن توابع هدف متضاد یعنی (۱) کمینه‌سازی هزینه‌های کل و (۲) کمینه‌سازی تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، در راستای بهینه‌سازی ساختار این شبکه، ایجاد حوضچه‌های ذخیره جهت برنامه‌ریزی پس از مصرف آب و جریان پساب بین تسهیلات، به مسئله بسیار حائز اهمیت بهره‌برداری از لجن فعال تولیدشده به همراه مباحث مطرح در طراحی سیستم لجن فعال و گنداب زدایی برای نخستین بار پرداخته است. شبکه موردنظر در شکل ۱ نشان داده شده است.



نشانه	توضیحات	نشانه	توضیحات
	منبع آب		تصفیه‌خانه فاضلاب
	مركز لجن		حوضچه ذخیره پساب
	تصفیه‌خانه آب		منطقه کشاورزی
	مصرف‌کننده آب		منطقه صنعتی

شکل ۱- شبکه آب و فاضلاب مورد بررسی

## فرمول بندی مسئله

### اندیس‌ها

$S$ : مجموعه منابع آبی در دسترس ( $s=1, \dots, S$ )  
 $p$ : مجموعه تصفیه‌خانه‌های آب در شبکه ( $p=1, \dots, P$ )  
 $w$ : مجموعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در شبکه ( $w=1, \dots, W$ )  
 $z$ : مجموعه حوضچه‌های ذخیره در شبکه ( $j=1, \dots, J$ )  
 $m$ : مجموعه مصرف‌کنندگان نهایی در شبکه ( $m=1, \dots, M$ )  
 $m_1$ : مجموعه کشاورزان در شبکه ( $m_1=1, \dots, M_1$ )  
 $m_2$ : مجموعه صنایع در شبکه ( $m_2=1, \dots, M_2$ )  
 $d$ : مجموعه سیستم تخلیه و امحا در شبکه ( $d=1, \dots, D$ )  
 $q$ : مجموعه کیفیت آب تصفیه نشده ( $q=1, \dots, Q$ )  
 $q_1$ : مجموعه کیفیت آب تصفیه شده ( $q_1=1, \dots, Q_1$ )  
 $q_3$ : مجموعه کیفیت پساب امحا شده ( $q_3=1, \dots, Q_3$ )  
 $q_f$ : مجموعه کیفیت پساب مورد تقاضای کشاورزان ( $q_f=1, \dots, Q_f$ )  
 $q_e$ : مجموعه کیفیت پساب مورد تقاضای صنایع ( $q_e=1, \dots, Q_e$ )

### پارامترهای ورودی

حداکثر ظرفیت ذخیره آب مصرف‌کننده نهایی $m$	$MM_m$
حداکثر میزان آب تخلیه‌شده از ذخیره مصرف‌کننده $m$	$MID_m$
حداکثر میزان آب مجاز برداشت از منبع $s$	$MS_s$
حداکثر میزان آب قابل پذیرش در تصفیه‌خانه آب $p$	$MP_p$

نسبت جرم غذای ورودی حوض هوادهی به جرم میکروارگانسیم‌های تحت هوادهی در تصفیه‌خانه	F/M	هزینه ثابت احداث یک متر کانال بین حوضچه ذخیره ز و منطقه تقاضای m2 برای پساب	$A3_{m_2q_e}$
میزان از بین بردن مواد جامد با توجه به مقدار F/M در فرایند لجن فعال	R	باکیفیت $q_e$	
بازده لجن فعال	Yobs	هزینه نگهداری هر مترمکعب پساب در تصفیه‌خانه w در پایان دوره.	$D1_w$
آستانه بحرانی محیط‌زیست	$q_c$	هزینه نگهداری هر مترمکعب پساب در حوضچه ذخیره z در پایان دوره.	$D2_j$
حداقل مقدار COD آب در مجراهای فاضلاب	q	هزینه عملیاتی هر مترمکعب پساب در حوضچه ذخیره z	$am_j$
حداکثر COD آب در مجراهای فاضلاب	$x_{end}$	هزینه انتقال هر مترمکعب پساب از تصفیه‌خانه w به حوضچه ذخیره z	$hz 1_{wj}$
دبی ورودی فاضلاب در روز	Q	هزینه انتقال هر مترمکعب پساب از حوضچه ذخیره z به منطقه تقاضای کشاورزی	$hz 2_{jm_1}$
غلظت لجن فعال	MLVSS	هزینه انتقال هر مترمکعب پساب از حوضچه ذخیره z به منطقه تقاضای صنعتی	$hz 3_{jm_2}$
شاخص سن لجن	MCRT	هزینه نصب COD متر	$C_{COD}$
<b>متغیرهای تصمیم</b>			
میزان آب جاری باکیفیت q بین منبع s و تصفیه‌خانه p در زمان t	$f_{sp_{spqt}}$	هزینه متغیر انجام عملیات گندزدایی فاضلاب	$C_{CR}$
میزان آب تصفیه‌شده و تغییر کیفیت داده‌شده از q به $q_1$ در تصفیه‌خانه p در زمان t	$ap_{qq_1pt}$	هزینه ثابت انجام عملیات گندزدایی فاضلاب	$C_{FCR}$
میزان آب جاری باکیفیت $q_1$ بین تصفیه‌خانه p و مصرف‌کننده نهایی m در زمان t	$f_{pm_{pmqt}}$	قیمت خرید هر واحد لجن فعال اولیه	SCR
متغیر باینری جهت نشان دادن اینکه آیا با انجام تصفیه کیفیت آب از q به $q_1$ در تصفیه‌خانه p در زمان t تغییر می‌کند؟	$x_{p_{qq_1pt}}$	فاصله تصفیه‌خانه W و حوضچه ذخیره z	$P1_{wj}$
میزان فاضلاب جاری بین مصرف‌کننده نهایی m و تصفیه‌خانه فاضلاب w در زمان t.	$f_{mw_{mw t}}$	فاصله حوضچه ذخیره z و منطقه تقاضای m1	$P2_{m_1j}$
مقدار آب باکیفیت $q_1$ که در انتهای دوره t در منبع ذخیره مصرف‌کننده ذخیره می‌شود.	$ulm_{mq_1t}$	فاصله حوضچه ذخیره z و منطقه تقاضای m2	$P3_{m_2j}$
میزان پساب جاری باکیفیت $q_3$ بین تصفیه‌خانه فاضلاب w و سیستم تخلیه d در زمان t	$f_{wd_{wdq_3t}}$	کارایی حمل آب از منبع S به تصفیه‌خانه	$ESP_{sp}$
میزان پساب جاری باکیفیت $q_3$ بین سیستم تخلیه d و منبع s در زمان t	$f_{ds_{dsq_3t}}$	کارایی حمل آب از تصفیه‌خانه p به مصرف‌کننده m	$EPM_{pm}$
متغیر باینری نشان‌دهنده اینکه آیا فاضلاب در تصفیه‌خانه فاضلاب w تصفیه‌شده در زمان t متغیر نشان‌دهنده میزان آب ذخیره‌شده در تصفیه‌خانه w در دوره t	$xw_{wt}$	کارایی حمل فاضلاب از مصرف‌کننده m به تصفیه‌خانه فاضلاب w	$EMW_{mw}$
موجودی پساب در حوضچه ذخیره z در انتهای دوره t	$b_{wt}$	کارایی حمل پساب از تصفیه‌خانه فاضلاب w به سیستم تخلیه d	$EWD_{wd}$
حجم پساب انتقالی از تصفیه‌خانه w به حوضچه ذخیره z در پایان دوره	$bsp_{j,t}$	کارایی حمل پساب از سیستم تخلیه d به منبع s	$EDS_{ds}$
حجم پساب انتقالی نوع $q_f$ از حوضچه ذخیره z به منطقه کشاورزی m1 در پایان دوره	$v_{wjt}$	درصد هدر رفت آب در زمان مصرف توسط مصرف‌کننده نهایی m	$LM_m$
حجم پساب انتقالی نوع $q_e$ از حوضچه ذخیره z به منطقه صنعتی m2 در پایان دوره	$x1_{jm_1q_f t}$	ضریب هدر رفت پساب در شبکه	$\lambda_1$
حجم پساب انتقالی نوع $q_e$ از حوضچه ذخیره z به منطقه صنعتی m2 در پایان دوره	$x2_{jm_2q_e t}$	تقاضای مصرف‌کننده نهایی m از آب باکیفیت $q_1$ در زمان t	$DM_{mq_1t}$
اگر حوضچه ذخیره در محل z تأسیس شود ۱ در غیر این صورت ۰	$o_j$	تقاضای منطقه کشاورزی m1 از پساب نوع $q_f$	$dem_{m_1q_f t}$
		تقاضای منطقه صنعتی m2 از پساب نوع $q_e$	$dem_{m_2q_e t}$
		ظرفیت نگهداری پساب در حوضچه ذخیره z	$y_j^j$
		درآمد فروش هر واحد لجن فعال تولیدشده	ISR
		احتمال تشخیص آلودگی آب از مجرای m به تصفیه‌خانه w	$P_{mw}$
		حجم حوضچه هوادهی در تصفیه‌خانه w	Vw



مرتبط با نصب COD متر و گنداب زدایی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نشان داده شده است. رابطه (۵)، هزینه‌های ثابت و متغیر تصفیه آب غیر آلوده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را نشان می‌دهد. در رابطه (۶)، هزینه احداث کانال از تصفیه‌خانه فاضلاب تا حوضچه‌ها، هزینه حمل‌ونقل از تصفیه‌خانه فاضلاب تا حوضچه‌ها و هزینه نگهداری در تصفیه‌خانه فاضلاب مشخص شده است. در رابطه (۷)، هزینه انتقال از تصفیه‌خانه به سیستم تخلیه و از سیستم تخلیه به منابع نشان داده شده است. رابطه (۸)، هزینه هدر رفت آب در مسیر انتقال از مصرف‌کنندگان به تصفیه‌خانه فاضلاب را نشان می‌دهد. در رابطه (۹)، هزینه احداث حوضچه‌ها بعلاوه هزینه نگهداری در حوضچه‌ها بیان شده است. رابطه (۱۰)، هزینه احداث کانال از حوضچه‌ها به مصرف‌کنندگان صنعتی و کشاورزی پساب‌های فاضلاب را نشان می‌دهد. در رابطه (۱۱)، هزینه عملیاتی تبدیل آب به کیفیت موردنظر کشاورزان و مناطق صنعتی به‌عنوان مشتری پساب‌های تصفیه‌خانه فاضلاب مشخص شده است. رابطه (۱۲)، هزینه انتقال پساب از حوضچه‌ها به مناطق کشاورزی و مناطق صنعتی را در نظر می‌گیرد. در رابطه (۱۳) هزینه‌های مربوط به پردازش لجن‌های تصفیه‌خانه فاضلاب نشان داده شده است که از درآمد فروش لجن‌ها کسر شده است. در نهایت رابطه (۱۴) تابع هدف دوم مسئله را نشان می‌دهد که کاهش آلودگی ایجادشده از فعالیت‌های مخرب محیط‌زیست را مشخص می‌کند که حاصل از فاضلاب با COD غیرمجاز است.

اجزای روابط (۱۳) و (۱۴) در ادامه با جزئیات لازم توضیح داده می‌شود.

$$\text{Min } z_1 = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \text{CSP}_{sp} \times \text{fsp}_{spqt} \quad (1)$$

$$+ \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \text{CPM}_{pm} \times \text{fpm}_{pmqt} \quad (2)$$

$$+ \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (\text{CPF}_{qq,p} \times \text{xp}_{qq,pt} + \text{CPV}_{qq,p} \times \text{ap}_{qq,pt})$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \text{CMV}_m \times \text{ulm}_{mqt} \quad (3)$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \text{CMW}_{mw} \times \text{fmw}_{mwt}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T (\text{C}_{CR} \times \text{sv}_{mwt} + \text{C}_{FCR} \times \text{X}_{mwt}) \quad (4)$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \text{COD}_w \times \text{Y}_{mw, \text{COD}}$$

$$+ \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T (\text{CWF}_w \times \text{xw}_{wt}) + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{CWW}_w \times \text{V}_{wjt} \quad (5)$$

$$+ \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{A}1_{wj} \times \text{P}1_{wj} \times \text{u}_{wj} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{h}z1_{wj} \times \text{v}_{wjt} \quad (6)$$

$$+ \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \text{D}1_w \times \text{b}_{wt}$$

$$+ \sum_{w=1}^W \sum_{d=1}^D \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \text{CWD}_{wd} \times \text{fwd}_{wdqt} \quad (7)$$

$$+ \sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \text{CDS}_{ds} \times \text{fds}_{dsqt}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \text{PM}_{mw} \times \text{fmw}_{mwt} \times (1 - \text{EMW}_{mw}) \quad (8)$$

اگر کانالی بین تصفیه‌خانه W و حوضچه Z جهت انتقال پساب تأسیس شود ۱ و در غیر این صورت

$u_{wj}$

اگر کانالی بین حوضچه Z و منطقه کشاورزی  $m_1$  جهت انتقال پساب نوع  $q_f$  تأسیس شود ۱ در غیر این صورت

$l_{jm_1q_f}$

اگر کانالی بین حوضچه Z و منطقه صنعتی  $m_2$  جهت انتقال پساب نوع  $q_e$  تأسیس شود ۱ در غیر این صورت

$s_{jm_2q_e}$

اگر گندزایی فاضلاب در دوره t انجام شود برابر ۱ و در غیر این صورت

$x_{mwt}$

در صورت نصب COD متر برابر ۱ و در غیر این صورت

$y_{mw, \text{COD}}$

متغیر باینری با مقدار ۱ در صورت نصب COD متر و انجام گندزایی در دوره t

$U_{mwt}$

مقدار آب گندزایی شده در دوره t متوسط میزان COD غیرمجاز در صورت عدم

$sv_{mwt}$

انجام گندزایی آب ورودی به تصفیه‌خانه W از مجرای m در دوره t

$\pi_{mwt}^{nc}$

متوسط میزان COD غیرمجاز در صورت انجام گندزایی آب ورودی به تصفیه‌خانه W از مجرای m در دوره

$\pi_{mwt}^c$

میزان لجن فعال خریداری شده در دوره t توسط تصفیه‌خانه W

$SSR_{wt}$

مازاد لجن فعال در تصفیه‌خانه W در دوره t میزان لجن دفع شده در تصفیه‌خانه W در دوره t

$ASR_{wt}$

میزان لجن موردنیاز تصفیه‌خانه W در دوره t احتمال آلودگی فاضلاب ورودی از مجرای m به

$DSR_{wt}$

تصفیه‌خانه W در دوره t میزان لجن موجود در تصفیه‌خانه W در انتهای

$SR_{wt}$

دوره t میزان لجن فعال تولیدشده که در دوره t در تصفیه‌خانه W بفروش می‌رسد

$XC_{mwt}$

$SL_{wt}$

$CSR_{wt}$

## توابع هدف

روابط (۱) تا (۱۴) به ارائه‌ی جملات مختلف تابع هدف اول ( $\text{Min}Z_1$ ) که مربوط به کمینه‌سازی هزینه زنجیره تأمین فاضلاب است، می‌پردازند. به همین ترتیب، رابطه (۱) هزینه متغیر انتقال آب از منابع به تصفیه‌خانه‌های آب را نشان می‌دهد. در رابطه (۲)، هزینه‌های انتقال آب از تصفیه‌خانه به مصرف‌کنندگان و هزینه ثابت و متغیر تغییر کیفیت آب در تصفیه‌خانه‌ها نشان داده شده است. رابطه (۳)، هزینه نگهداری ذخیره مصرف‌کنندگان و هزینه حمل‌ونقل از مصرف‌کنندگان به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را نشان می‌دهد. در رابطه (۴)، هزینه‌های

و آب خروجی به مشتریان در رابطه (۲۱) برقرار می‌شود.

$$\sum_{q_1=1}^Q ap_{qq_1pt} = \sum_{m=1}^M fpm_{pmq_1t} \quad \forall p, q_1, t \quad (21)$$

محدودیت (۲۲) مشخص می‌کند که آیا تصفیه‌خانه pام قادر به تغییر کیفیت آب از q به q1 می‌باشد یا نه.

$$ap_{qq_1pt} \leq M \times xp_{qq_1pt} \quad \forall q, q_1, p, t \quad (22)$$

محدودیت (۲۳) مربوط به تعادل میزان آب ورودی و خروجی هر مصرف‌کننده نهایی می‌باشد.

$$\sum_{q_1=1}^Q DM_{mq_1t} \times (1 - LM_m) = \sum_{w=1}^W fmw_{mwtt} \quad \forall m, p, t \quad (23)$$

محدودیت (۲۴) مربوط به تقاضای مصرف‌کنندگان است که میزان ذخیره آب باکیفیت q1 مصرف‌کنندگان را نشان می‌دهد.

$$ulm_{mq_1t} - ulm_{mq_1(t-1)} + \sum_{p=1}^P fpm_{pmq_1t} \times EPM_{pm} \geq DM_{mq_1t} \quad \forall m, q_1, t \quad (24)$$

محدودیت (۲۵) مشخص می‌کند که آیا تصفیه‌خانه فاضلاب wام قادر به تصفیه فاضلاب می‌باشد یا نه.

$$\sum_{j=1}^J V_{wjt} \leq M * xw_{wt} \quad \forall w, t \quad (25)$$

در صورتی که تجهیزات خاصی به منظور اندازه‌گیری COD آب مانند COD متر نصب نشود، تشخیص آلودگی آب از روی رنگ آن میسر می‌باشد که بدین منظور احتمال pmw برای تشخیص آلودگی آب از مجرای m به w در نظر گرفته می‌شود. در صورت کشف آلودگی چه به صورت شهودی و چه با استفاده از COD متر، باید تصمیم گرفت که آیا گندزدایی انجام شود و هزینه مربوطه تقبل شود یا خیر؛ برای تخمین توزیع COD ورودی به فاضلاب با کمک نرم‌افزار Arena و داده‌های تاریخی موجود مقدار COD فاضلاب (xi) از تابع توزیع نمایی بریده‌شده پیروی می‌کند. به نحوی که حداقل مقدار COD ورودی برابر q و حداکثر مقدار COD برابر xend می‌باشد. در این صورت برای مشخص کردن توزیع COD ورودی از روابط زیر بهره می‌گیریم.

$$X(x_i) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x_i} * \frac{1}{e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}}} & q \leq x_i \leq x_{end} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (26)$$

qc را آستانه بحرانی محیط‌زیست معرفی می‌کنیم بنابراین احتمال بحرانی بودن مقدار COD آب را xc را از نظر می‌گیریم که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_c = p(q_c \leq x_i \leq x_{end}) = \frac{e^{-\lambda q_c} - e^{-\lambda x_{end}}}{e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}}} \quad (27)$$

حال اگر آلودگی در آب مشاهده گردید، آب ورودی به جای ذخیره در تصفیه‌خانه به سمت محلی که برای گندزدایی در نظر گرفته شده است، می‌رود. بنابراین، احتمال آلوده بودن آب فرض می‌شود که برابر xcmt باشد. با توضیحات فوق، میزان آبی که گندزدایی می‌شود را با متغیر svmwmt نشان داده و با استفاده از رابطه (۲۷)، به دست می‌آوریم:

$$\sum_{j=1}^J CB_j \times o_j + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T D2_j \times bsp_{jt} \quad (9)$$

$$+ \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{q_1=1}^Q \sum_{j=1}^J A2_{m_1q_1j} \times l_{jm_1q_1} \times P2_{m_1j} \quad (10)$$

$$+ \sum_{m_2=1}^{M_2} \sum_{q_2=1}^Q \sum_{j=1}^J A3_{m_2q_2j} \times s_{jm_2q_2} \times P3_{m_2j} \quad (11)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \left( \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{q_1=1}^Q \sum_{t=1}^T am_j \times X1_{jm_1q_1t} + \sum_{m_2=1}^{M_2} \sum_{q_2=1}^Q \sum_{t=1}^T am_j \times X2_{jm_2q_2t} \right) \quad (12)$$

$$+ \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{q_1=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Hz2_{jm_1q_1t} \times X1_{jm_1q_1t} + \sum_{m_2=1}^{M_2} \sum_{q_2=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Hz3_{jm_2q_2t} \times X2_{jm_2q_2t} \quad (13)$$

$$+ \sum_w \sum_t (SCR \times SSR_{wt} - ISR \times DSR_{wt}) \quad (14)$$

$$Min z_2 = \sum_{m,w} \sum_{s,t} \left( (1 - pmw) \cdot (U_{mwtt}) \cdot (\pi_{mwtt}^c - \pi_{mwtt}^{nc}) + (pmw) \cdot (X_{mwst}) \cdot (\pi_{mwtt}^c - \pi_{mwtt}^{nc}) + \pi_{mwtt}^{nc} \right) \quad (14)$$

### محدودیت‌ها

محدودیت (۱۵) که معادله برداشت است، بیان می‌کند که میزان آب برداشتی از هر منبع باید کمتر از حداکثر برداشت مجاز از آن منبع باشد.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q fsp_{spqt} \leq MS_s \quad \forall s, t \quad (15)$$

از جمله محدودیت‌های جریان می‌توان به روابط (۱۶) و (۱۷) اشاره نمود. محدودیت (۱۶)، بیان می‌کند که میزان جریان آب از هر منبع به هر تصفیه‌خانه آب باید کمتر از حداکثر جریان مجاز بین منابع و تصفیه‌خانه‌ها باشد.

$$\sum_{q=1}^Q fsp_{spqt} \leq MSP_{sp} \quad \forall s, p, t \quad (16)$$

محدودیت (۱۷)، بیان می‌کند که میزان جریان آب از هر تصفیه‌خانه‌ها هر مصرف‌کننده آب باید کمتر از حداکثر جریان مجاز بین تصفیه‌خانه‌ها و مصرف‌کنندگان نهایی باشد:

$$\sum_{q_1=1}^Q fpm_{pmq_1t} \leq MPM_{pm} \quad \forall m, p, t \quad (17)$$

همچنین محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) مربوط به ظرفیت می‌باشند. محدودیت (۱۸)، نشان می‌دهد که میزان مجموع جریان آب ورودی از منابع از هر منبع به هر تصفیه‌خانه آب باید کمتر از حداکثر ظرفیت آن تصفیه‌خانه باشد.

$$\sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q fsp_{spqt} \leq Mpp \quad \forall p, t \quad (18)$$

طبق محدودیت (۱۹)، حداکثر ذخیره آب باکیفیت q1 مشتری m نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت آن منبع ذخیره باشد.

$$ulm_{mq_1t} \leq MM_m \quad \forall m, q_1, t \quad (19)$$

همچنین محدودیت‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۳ محدودیت‌های تعادلی می‌باشند. محدودیت تعادل میزان آب ورودی و خروجی هر تصفیه‌خانه را رابطه (۲۰) مشخص می‌کند.

$$\sum_{s=1}^S fsp_{spqt} \times ESP_{sp} = \sum_{q_1=1}^Q ap_{qq_1pt} \quad \forall p, q, t \quad (20)$$

محدودیت تعادل بین میزان آب تبدیل شده به کیفیت موردنظر مشتریان

### تابع هدف دوم: کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی

علاوه بر میزان آب ذخیره‌شده در تصفیه‌خانه فاضلاب، تأثیر نصب COD متر و انجام گندزدایی بر کاهش COD و اثرات زیست‌محیطی باید مورد مطالعه قرار گیرند. مجدداً، اگر فرض شود که تابع احتمال مربوط به میزان COD به صورت  $\frac{1}{e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}}}$  باشد و مقدار COD و میزان کاهش COD در اثر گندزدایی را برابر r در نظر گرفته شود، آنگاه میزان COD غیرمجاز مربوط به آب ورودی از مجرای m به w در دوره t یعنی  $\pi_{mwt}^c$  به‌عنوان یکی دیگر از اهداف تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد که با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\pi_{mwt}^c = \int_{q_c}^{x_{end}} (x_i - r) \cdot EMW_{mw} \cdot f_{mw_{mwt}} \cdot \lambda e^{-\lambda x_i} \cdot \frac{1}{e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}}} dx_i = \frac{EMW_{mw} \cdot f_{mw_{mwt}} \cdot (e^{-\lambda q_c} (\lambda q_c + 1) - e^{-\lambda x_{end}} (\lambda x_{end} + 1)) - r \cdot \lambda (e^{-\lambda q_c} - e^{-\lambda x_{end}})}{\lambda (e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}})} \quad (39)$$

و در صورت عدم انجام اقدام اصلاحی، میزان COD نشر شده یعنی  $\pi_{mwt}^{nc}$  به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\pi_{mwt}^{nc} = \int_{q_c}^{x_{end}} x_i \cdot EMW_{mw} \cdot f_{mw_{mwt}} \cdot \lambda e^{-\lambda x_i} \cdot \frac{1}{e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}}} dx_i = \frac{EMW_{mw} \cdot f_{mw_{mwt}} \cdot (e^{-\lambda q_c} (\lambda q_c + 1) - e^{-\lambda x_{end}} (\lambda x_{end} + 1))}{\lambda (e^{-\lambda q} - e^{-\lambda x_{end}})} \quad (40)$$

محدودیت‌های مربوط به لجن فعال به شرح زیر است:

در حوضچه هوادهی یک نسبت خیلی مهم، نسبت جرم غذای ورودی حوض هوادهی به جرم میکروارگانیسم‌های تحت هوادهی می‌باشد که برابر است با:

$$F / M = \frac{COD \times Q}{MLVSS \times V} \quad (41)$$

حال با در نظر گرفتن مقدار مطلوب و رابطه (41)، می‌توان غلظت مطلوب لجن در فاضلاب ورودی را مشخص کرد. شاخص مهم دیگر در طراحی سیستم لجن فعال در فاضلاب، سن لجن می‌باشد که آن را با پارامتر MCRT در متون مختلف نشان می‌دهند رابطه‌ای که برای سن لجن وجود دارد به صورت (42) می‌باشد:

$$MCRT = \frac{V \times X_1}{Q_w \times X_w + Q_e \times X_e} \quad (42)$$

مواد جامد ورودی به فاضلاب بعد از جذب شدن توسط باکتری‌ها مجدداً به تولید لجن می‌پردازند. بخشی از لجن تولیدی نیز غیرفعال می‌باشد که قابل استفاده نمی‌باشد. مقدار لجن تولیدی فعال را با استفاده از رابطه (43) می‌توان مشخص کرد:

$$P_{X,VSS} = Y_{obs} \times Q \times (S_0 - S) \quad (43)$$

حال فرض می‌کنیم که لجن موجود در انتهای دوره t در تصفیه‌خانه w برابر  $SL_{wt}$  باشد. مقدار آب ورودی به تصفیه‌خانه w در دوره t نیز برابر  $EMW_{mw} \times f_{mw_{mwt}} - sv_{mwt}$  می‌باشد؛ بنابراین، مقدار مورد نیاز از لجن برای تصفیه این میزان آب  $SR_{w,t}$  با استفاده از رابطه (44) به صورت

$$sv_{mwt} = xc_{mwt} \times EMW_{mw} \times f_{mw_{mwt}} \times X_{mwt} \times (Y_{mw,COD} + (1 - Y_{mw,COD}) \times P_{mw}) \quad \forall m, w, t \quad (28)$$

در رابطه فوق عبارات  $X_{mwt} \times (1 - Y_{mw,COD})$ ،  $X_{mwt} \times Y_{mw,COD}$  غیرخطی شدن مدل می‌شود. به‌منظور اجتناب از این روابط غیرخطی، با توجه به مقاله کریمی و همکاران (20)، با معرفی متغیر باینری  $U_{mwt}$  محدودیت زیر را به مدل اضافه می‌کنیم:

$$Y_{mw,COD} + X_{mwt} - 1 \leq U_{mwt} \leq \frac{Y_{mw,COD} + X_{mwt}}{2} \quad (29)$$

با معرفی متغیر  $U_{mwt}$ ، رابطه (27) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$sv_{mwt} = xc_{mwt} \times EMW_{mw} \times f_{mw_{mwt}} \times (U_{mwt} + p_{mw} \times (X_{mwt} - U_{mwt})) \quad \forall m, w, t \quad (30)$$

در رابطه (30)، مجدداً عبارات  $f_{mw_{mwt}} \times X_{mwt}$  و  $f_{mw_{mwt}} \times U_{mwt}$  داریم که حاصل ضرب متغیر حقیقی در متغیرهای باینری می‌باشند. به‌منظور خطی سازی روابط فوق با فرض اینکه x یک متغیر حقیقی و y یک متغیر باینری باشد، متغیر u به صورت زیر به صورت  $u = xy$  تعریف می‌شود که به جای رابطه حاصل ضرب، روابط زیر تعریف u را برقرار می‌کنند:

$$u \leq M \cdot y \quad (31)$$

$$x - M \cdot (1 - y) \leq u \leq x + M \cdot (1 - y)$$

بنابراین دو متغیر به صورت  $IX_{mwt} = f_{mw_{mwt}} \times X_{mwt}$  و  $IU_{mwt} = f_{mw_{mwt}} \times U_{mwt}$  تعریف می‌کنیم که با تعریف این متغیرها، رابطه (30) به صورت رابطه (32) بازنویسی می‌شود.

$$sv_{mwt} = xc_{mwt} \times EMW_{mw} \times ((1 - p_{mw}) \times IU_{mwt} + p_{mw} \times IX_{mwt}) \quad \forall m, w, t \quad (32)$$

با در نظر گرفتن روابط نشان داده‌شده در (31)، محدودیت‌های (33) تا (36) به مدل اضافه می‌شود:

$$IX_{mwt} \leq M \times X_{mwt} \quad \forall m, w, t \quad (33)$$

$$f_{mw_{mwt}} - M(1 - X_{mwt}) \leq IX_{mwt} \leq f_{mw_{mwt}} + M(1 - X_{mwt}) \quad \forall m, w, t \quad (34)$$

$$IU_{mwt} \leq M \times U_{mwt} \quad \forall m, w, t \quad (35)$$

$$f_{mw_{mwt}} - M(1 - U_{mwt}) \leq IU_{mwt} \leq f_{mw_{mwt}} + M(1 - U_{mwt}) \quad \forall m, w, t \quad (36)$$

روابط (37) و (38) محدودیت‌های ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها می‌باشند. با تعریف متغیر  $sv_{mwt}$ ، میزان ذخیره در تصفیه‌خانه فاضلاب در هر دوره به شرح رابطه (37) مشخص می‌گردد.

$$b_{wt} = b_{wt-1} + \sum_{m=1}^M (EMW_{mw} \times f_{mw_{mwt}} - sv_{mwt}) - \sum_{j=1}^W v_{wjt} - \sum_{d=1}^D \sum_{q_3=1}^{Q_3} (1 - \lambda_1) \times f_{wdq_3t} \quad \forall w, t \quad (37)$$

$$b_{wt} \leq MW_w \quad \forall w, t \quad (38)$$

محدودیت (37)، میزان آب ذخیره‌شده در تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد و در محدودیت (38)، محدود به ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها می‌شود.

محدودیت (۵۰) بیان می‌کند، در صورت تأسیس حوضچه ذخیره، پساب ذخیره‌شده در آن نباید از ظرفیتش بیشتر باشد.

$$bsp_{jt} \leq y_j \times o_j \quad \forall j, t \quad (50)$$

محدودیت (۵۱) بیان می‌کند، مجموع پساب ارسالی از تصفیه‌خانه به حوضچه از ظرفیت آن نباید بیشتر باشد.

$$\sum_{w=1}^W v_{wjt} \leq y_j \quad \forall j, t \quad (51)$$

محدودیت‌های (۵۲) تا (۵۴) به ترتیب، برقراری جریان بین تسهیلات را منوط به احداث کانال بین این تسهیلات می‌کند.

$$v_{wjt} \leq M \times u_{wj} \quad \forall w, j, t \quad (52)$$

$$X 1_{jm_{qf}t} \leq M \times l_{jm_1} \quad \forall j, q_f, m_1, t \quad (53)$$

$$X 2_{jm_{qe}t} \leq M \times s_{jm_2} \quad \forall j, q_e, m_2, t \quad (54)$$

محدودیت‌های (۵۵) تا (۵۷)، احداث هر کانال بین تسهیلات را مشروط به احداث حوضچه می‌کنند.

$$u_{wj} \leq o_j \quad \forall w, j \quad (55)$$

$$l_{jm_{qf}} \leq o_j \quad \forall j, m_1, q_f \quad (56)$$

$$s_{jm_{qe}} \leq o_j \quad \forall j, m_2, q_e \quad (57)$$

همچنین روابط (۵۸) و (۵۹) محدودیت‌های تقاضای مناطق کشاورزی و صنعتی می‌باشند. در واقع این محدودیت‌ها، ارضای تقاضای مناطق کشاورزی و صنعتی از پساب‌های خروجی حوضچه‌ها را نشان می‌دهند.

$$\sum_{j=1}^J (1-\lambda) \times X 1_{jm_{qf}t} \geq dem_{m_{qf}t} \quad \forall m_1, q_f, t \quad (58)$$

$$\sum_{j=1}^J (1-\lambda) \times X 2_{jm_{qe}t} \geq dem_{m_{qe}t} \quad \forall m_2, q_e, t \quad (59)$$

محدودیت تعادلی جریان مربوط به سیستم امحا در رابطه (۶۰) نمایش داده‌شده است.

$$\sum_{w=1}^W \sum_{q_3=1}^Q f w d_{w d q_3 t} \times E W D_{w d} = \sum_{s=1}^S \sum_{q_3=1}^Q f d s_{d s q_3 t} \quad \forall d, t \quad (60)$$

محدودیت‌های (۶۱) و (۶۲) مربوط به ظرفیت می‌باشند. محدودیت (۶۱)، جریان ورودی به سیستم تخلیه را محدود به ظرفیت آن سیستم می‌کند.

$$\sum_{s=1}^S \sum_{q_3=1}^Q f d s_{d s q_3 t} \times E D S_{d s} \leq M D_d \quad \forall d, t \quad (61)$$

در محدودیت (۶۲) میزان جریان آب از سیستم امحا به منبع S ام کمتر از ظرفیت آن است.

$$\sum_{q_3=1}^Q f d s_{d s q_3 t} \leq M D S_{d s} \quad \forall d, s, t \quad (62)$$

محدودیت (۶۳) میزان جریان مجاز میان مصرف‌کننده و فاضلاب را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که جریان از مصرف‌کننده به فاضلاب از حداکثر جریان مجاز نمی‌تواند بیشتر باشد:

$$f m w_{m w t} \leq M M W_{m w} \quad \forall m, w, t \quad (63)$$

زیر مشخص می‌گردد.

$$S R_{w t} = \frac{C O D \times (E M W_{m w} \times f m w_{m w t} - s v_{m w t})}{\frac{F}{M} \times V_w} \quad \forall m, w, t \quad (44)$$

فرض می‌شود که میزان از بین بردن مواد جامد با توجه به این مقدار F/M برابر r درصد باشد. در این صورت، لجن مصرف‌شده در رابطه (۴۴) بعد از تصفیه آب رشد کرده و مازاد لجن فعالی  $ASR_{wt}$  که در این فرایند تولید می‌شود به صورت رابطه (۴۵) خواهد بود:

$$A S R_{w t} = r \times C O D \times Y_{o b s} \times (E M W_{m w} \times f m w_{m w t} - s v_{m w t}) \quad \forall m, w, t \quad (45)$$

در جدول (۱)، بازده فرایند لجن فعال به ازای مقادیر مختلف سن لجن نشان داده‌شده است.

جدول ۱- رابطه سن لجن و میزان بازده آن

سن لجن (روز)	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
بازده	۰٫۸	۰٫۷۵	۰٫۶۸	۰٫۶۵	۰٫۶۲	۰٫۶	۰٫۵۸

بنابراین لجن موجود در انتهای یک دوره را می‌توان با استفاده از روابط زیر مشخص کرد:

$$S L_{w t} = (S L_{w t-1} + A S R_{w t}) \left(1 - \frac{1}{M C R T}\right) + S S R_{w t} - C S R_{w t} \quad \forall w, t \quad (46)$$

قسمت اول در رابطه (۴۶)، مقدار لجنی که از قبل باقی‌مانده و مقدار لجن تولیدشده در فرایند لجن فعال را نشان می‌دهد که به منظور تعیین عمر مناسب لجن درصدی از آن کسر شده است. از سوی دیگر، میزان لجن دفع شده در هر دوره  $DSR_{wt}$  در هر تصفیه‌خانه را می‌توان با استفاده از رابطه (۴۷) نشان داد.

$$D S R_{w t} = (S L_{w t-1} + A S R_{w t}) \left(\frac{1}{M C R T}\right) + C S R_{w t} \quad \forall w, t \quad (47)$$

همچنین باید توجه داشت که لجن باقی‌مانده در انتهای یک دوره در یک تصفیه‌خانه باید کفاف لجن موردنیاز در تصفیه‌خانه را داشته باشد. از این رو محدودیت (۴۸) را نیز وضع می‌کنیم:

$$S L_{w t} \geq S R_{w t+1} \quad \forall w, t \quad (48)$$

در نهایت در تابع هزینه عایدی حاصل از فروش لجن فعال به شرح رابطه (۱۳) در تابع هدف اول تحقیق مشخص می‌گردد.

محدودیت‌های مربوط به حوضچه‌های ذخیره به شرح زیر است: محدودیت (۴۹)، موجودی ذخیره‌شده در حوضچه‌ها در یک دوره را نشان می‌دهد.

$$b s p_{j t} = b s p_{j t-1} + \sum_{w=1}^W (1-\lambda_1) \times v_{w j t} - \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{q_f=1}^{Q_f} X 1_{j m_{q_f} t} - \sum_{m_2=1}^{M_2} \sum_{q_e=1}^{Q_e} X 2_{j m_{q_e} t} \quad \forall j, t \quad (49)$$

زدایی در مجراهای بین مصرف‌کنندگان و فاضلاب ضروری می‌باشد. در این حالت، حوضچه با ظرفیت ۴۵ میلیون مترمکعب احداث می‌گردد و ایجاد کانال بین حوضچه و همه مناطق کشاورزی و صنعتی در راه‌حل بهینه وجود خواهد داشت. مقدار هر کدام از توابع هدف در این راه‌حل نیز به صورت زیر است:

تابع هدف هزینه در راه‌حل ایده آل آلودگی: ۱۵۵۱۰۴۱۴۴۱۷  
تابع هدف آلودگی آب در راه‌حل ایده آل آلودگی: ۱۳۶۴۳

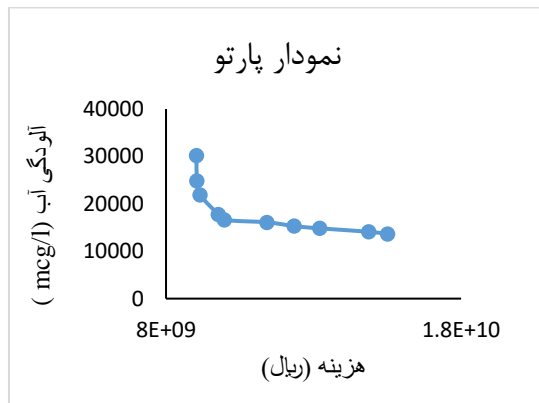
### راه‌حل‌های پارتویی مطابق با روش اپسیلون محدودیت

مطابق با روش اپسیلون محدودیت مقادیر مختلف توابع هدف در جواب‌های پارتویی به شرح جدول (۲) حاصل می‌شود.

جدول ۲- پاسخ‌های پارتویی مسئله

راه‌حل پارتویی	تابع هدف هزینه (ریال)	تابع هدف آلودگی (میکرو گرم بر لیتر)
۱	۹۰۳۱۹۹۷۸۳۹	۳۰۱۸۷
۲	۹۰۴۸۰۰۲۹۲۶	۲۴۸۲۸
۳	۹۱۵۵۹۰۵۷۳۱	۲۱۸۷۳
۴	۹۷۷۲۰۰۹۶۲۷	۱۷۷۷۰
۵	۹۹۸۱۶۰۱۹۸۴	۱۶۵۸۸
۶	۱۱۴۲۱۲۴۱۷۰۴	۱۶۰۸۹
۷	۱۲۳۴۰۶۸۵۶۱۶	۱۵۳۱۴
۸	۱۳۲۱۵۶۶۲۸۵۱	۱۴۸۱۶
۹	۱۴۸۷۱۶۲۲۱۳۲	۱۴۱۰۶
۱۰	۱۵۵۱۰۴۱۴۴۱۷	۱۳۶۴۳
میانگین	۱۱۴۳۴۹۱۴۴۸۳	۱۸۵۲۱

جواب‌های نشان داده‌شده در جدول (۲) می‌تواند به‌عنوان جواب نهایی موردنظر تصمیم‌گیرندگان انتخاب شوند. در شکل (۲) نمودار پارتویی جواب‌ها نشان داده‌شده است.



شکل ۲- نمودار پاسخ‌های پارتویی مسئله

محدودیت (۶۴)، حداکثر جریان از تصفیه‌خانه فاضلاب به حوضچه را محدود به حداکثر جریان مجاز می‌کند.

$$v_{wj} \leq MWJ_{wj} \quad \forall j, w, t \quad (64)$$

### بحث و تحلیل نتایج

در مدل فوق، تصفیه‌خانه جنوب تهران، ۶ شهرستان جنوب تهران به‌عنوان قطب‌های کشاورزی و ۲ شهرک صنعتی به‌عنوان صنایع متقاضی پساب جهت مطالعه موردی انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است که مسئله بر اساس اطلاعات و مطالعات میدانی واقعی طراحی و حل شده است که لاجرم منجر به در نظر گرفتن مفروضات بسیاری برای مسئله شده است. در واقع برخی از مکان‌یابی‌ها و برخی از تخصیص‌های موجود به صورت پیش فرض از قبل تعیین شده‌اند و لذا با این فرضیات، حل مسئله به کمک نرم افزار گمز و به کمک روش اپسیلون محدودیت با پیچیدگی بسیار زیادی مواجه نگردید. البته در نظر گیری مسئله با فرض باطراحی کلی (شامل مکان‌یابی و تخصیص در همه سطوح) منجر به مسئله‌ای با ابعاد بزرگ و پیچیدگی بالا می‌گردد که حل آن با استفاده از مدل‌های دقیق امکان‌پذیر نبوده و نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد. ضمن آنکه باید توجه داشت که در اینصورت، نتایج حل نیز در عمل قابل اجرا و پیاده‌سازی نمی‌باشد.

### حل ایده آل تابع هزینه

زمانی که بدون در نظر گرفتن آلودگی آب و فقط باهدف کاهش هزینه به بهینه‌سازی زنجیره تأمین فاضلاب مورد مطالعه می‌پردازیم، مقدار ایده آل تابع هزینه و مقدار ضد ایده آل تابع آلودگی به صورت زیر حاصل می‌شود:

تابع هدف هزینه در راه‌حل ایده آل هزینه: ۹۰۳۱۹۹۷۸۳۹

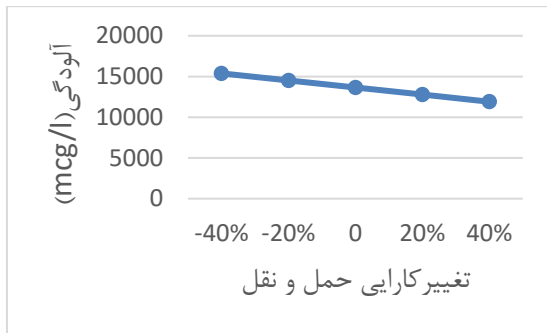
تابع هدف آلودگی آب در راه‌حل ایده آل هزینه: ۳۰۱۸۷

در راه‌حل بهینه در این حالت، حوضچه با ظرفیت ۴۵ میلیون مترمکعب احداث می‌گردد و تنها بین این حوضچه و سایر مناطق کشاورزی و صنعتی ایجاد نمی‌شود ولی بین حوضچه و سایر مناطق کشاورزی و صنعتی به‌عنوان مصرف‌کنندگان فاضلاب تصفیه‌شده کانال باید کشیده شود. علاوه بر این در این راه‌حل نیازی به نصب COD متر نمی‌باشد و در صورت مشاهده آب آلوده نیز گنداب زدایی در هیچ‌کدام از مجراها پیشنهاد نمی‌شود چراکه هزینه‌های مازاد در این حالت با توجه به بهینگی تابع هزینه توجیهی نخواهد داشت.

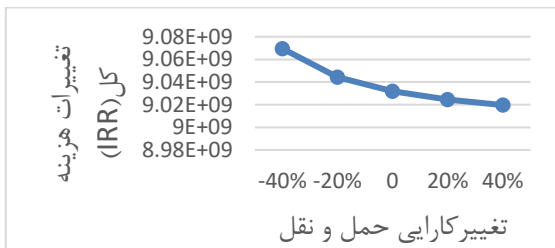
### حل ایده آل تابع آلودگی آب

زمانی که طراحی شبکه زنجیره تأمین فاضلاب را تنها باهدف کاهش آلودگی آب مورد مطالعه قرار می‌دهیم، نصب COD متر و انجام گنداب

انتقال در نهایت منجر به کاهش آب‌های آلوده می‌گردد چراکه نسبت به قبل، آب کمتری در مسیل‌های سیستم فاضلاب جابجا می‌شود.



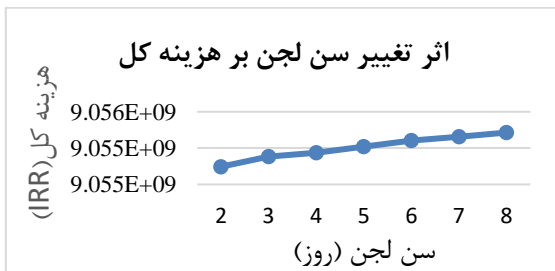
شکل ۴- اثرات تغییرات کارایی حمل و نقل بر هزینه کل



شکل ۵- اثرات تغییرات کارایی حمل و نقل بر آلودگی

### تغییر سن لجن

از دیگر مباحث مطرح شده در تحقیق حاضر، فرایند تصفیه و نقش لجن فعال در این فرایند بود. از تصمیمات عملیاتی در این فرایند که می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و بر هزینه‌ها یا درآمدهای حاصل از تبدیل لجن فعال به کود تأثیر دارد، سن لجن می‌باشد. با توجه به اینکه در گنداب زدایی از روش ازن‌زنی استفاده شده است و فرایند لجن فعال نقشی در آلودگی آب‌ها و کاهش یا افزایش آن نداشت، با ثابت در نظر گرفتن سطح آلودگی آب، اثر تغییرات سن لجن بر هزینه و متغیرهای مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶- اثر تغییرات سن لجن (روز) بر هزینه کل

### مقایسه راه‌حل پیشنهادی با وضعیت موجود

به منظور اعتبار سنجی عملکرد مدل پیشنهادی، به مقایسه نتایج راه‌حل‌های پیشنهادی با راه‌حل‌های زیر که نشان‌دهنده وضعیت موجود است پرداخته می‌شود.

### تحلیل حساسیت

با توجه به مفهوم جواب‌های پارتویی، اطمینان خواهیم داشت که جوابی وجود نخواهد داشت که در هر دو تابع هدف عملکرد بهتری نسبت به این جواب داشته باشد. با این وجود، باید توجه داشت که برخی از پارامترهای مدل ممکن است در واقعیت دچار تغییر و نوسان گردند و از این رو مدیران باید بیش از کافی در مورد چنین تغییراتی داشته باشند تا عکس‌العمل و تمهیدات مناسب را اعمال کنند. لذا تغییرات پارامترهای تأثیرگذار را در این بخش مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

### اثرات تغییر هزینه‌ها بر تابع هدف کاهش آلودگی

شکل (۳) به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش هر کدام از اجزای هزینه‌های عملیاتی، در صورتی که تمهیدی برای فراهم کردن هزینه مازاد اندیشیده نشود، با کاهش هزینه تجهیزات مربوط تصفیه آب‌های آلوده، باعث می‌شود که سطح آلودگی‌ها و اثرات مخرب بر محیط زیست افزایش یابد.



شکل ۳- اثرات تغییرات هزینه‌های متغیر تصفیه خانه‌ها بر آلودگی

### تغییر در کارایی حمل و نقل شبکه

از مشکلات مربوط به سیستم آب و فاضلاب در کشور، هدر رفت آب در انتقال بین مسیل‌های آب می‌باشد. در این قسمت افزایش و کاهش هدر رفت آب در مسیرهای انتقال آب و همچنین تأثیر آن بر هزینه‌های مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج شکل‌های ۵ و ۴ نشان‌دهنده این حقیقت است که افزایش کارایی حمل و نقل، باعث کاهش هزینه‌ها و همچنین آلودگی آب‌ها می‌شود. بیشترین مزایای ایجاد شده را می‌توان ناشی از کاهش جریمه‌های حاصل از هدر رفت آب بیان کرد. همچنین مزایای دیگری مانند کاهش انتقال آب از منبع اصلی به مصرف‌کنندگان و کاهش انتقال بین سایر کانال‌های سیستم فاضلاب را با افزایش کارایی حمل و نقل شاهد هستیم که این به نوبه خود منجر به کاهش هزینه‌های مدل می‌شود. این کاهش

می‌دهد. در حقیقت، در صورتی که مسئولان شرکت‌های فاضلاب نتوانند این افزایش هزینه را به نحوی جبران کنند دولت و سایر سازمان‌های اجتماعی باید در برنامه‌های حمایت از محیط‌زیست فاضلاب مشارکت کنند تا حداقل به همان سطح از آلودگی آب که قبل از افزایش هزینه مطلوب سازمان مربوطه بوده است دست‌یابی پیدا کرد. همچنین با بررسی اثر تغییر در کارایی حمل‌ونقل آب مشخص شد که افزایش کارایی حمل‌ونقل، باعث کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش آلودگی آب‌ها می‌شود؛ و از مزایای دیگر می‌توان به کاهش جریمه‌های حاصل از هدر رفت آب اشاره کرد. از دیگر موضوعات مهم این پژوهش تعیین مقدار بهینه سن لجن (که بیشترین درآمد فروش لجن را به همراه دارد) می‌باشد. در حقیقت، تحلیل حساسیت نه تنها اعتبار نتایج مدل را با ارائه نتایج قابل‌انتظار افزایش می‌داد بلکه بینش‌های مدیریتی ارزنده در خصوص نقش نهادهای قانون‌گذار در بهبود عملکرد زیست‌محیطی و تأثیر تخمین‌های نادرستی که به‌ناچار می‌تواند مدیران و دست‌اندرکاران را مجبور به کاهش عملکرد زیست‌محیطی در قبال جبران هزینه کند ارائه می‌نمود. همان‌طور که انتظار می‌رود توابع هدف مدل ریاضی ارائه‌شده با یکدیگر در تضاد می‌باشند، بدین معنا که در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی نیازمند افزایش هزینه‌ها برای تجهیز تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان مثال توسط COD متر و یا انجام گندزدایی هستیم و بالعکس. نهایتاً موارد ذیل می‌توانند به‌عنوان پیشنهادات آتی منظور گردند:

- در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت برای سایر پارامترهای مسئله از جمله آب‌وهوا، تقاضای پساب، هزینه‌های احداث، میزان ورودی‌های هر تصفیه‌خانه، همچنین میزان مصرف آب و یا آب‌بها و ...
- در نظر گرفتن برخی از مسائل هیدرولیکی مانند فشار، اصطکاک، جاذبه در مدل.
- منظور نمودن مسائل اجتماعی مانند تأثیر آلودگی هوا ناشی از انتشار بوی بد فاضلاب بر زندگی مردم نزدیک به فاضلاب و راهکارهای جلوگیری یا کاهش اثرات آن.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

مقاله فاقد حامی مالی است.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: زهرا ابراهیمی، محمدرضا غلامیان؛

۱. در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب فرایند تهیه کود از لجن فعال مازاد انجام نمی‌شود و این لجن به‌عنوان زباله دفن می‌گردد.
۲. تجهیزات COD متر برای کنترل آلودگی آب‌های ورودی به تصفیه‌خانه‌ها استفاده نمی‌شود و تنها بازرسی چشمی که تغییر رنگ آب را نشان می‌دهد استفاده می‌گردد.
۳. زمانی که هر دو حالت فوق اتفاق افتد.

در حالت اول، میانگین تابع هدف اول برای جواب‌های پارتویی برابر ۱۱۴۹۸۲۴۴۳۶۳ و مقدار متوسط آلودگی برابر ۱۸۵۲۱ می‌باشد. در این حالت ملاحظه می‌شود که جواب حاصل نسبت به جواب‌های پارتویی تابع هزینه به‌مراتب بیشتری دارد.

در حالت دوم، مقدار تابع هدف هزینه برابر ۹۰۳۱۹۹۷۸۳۹ و مقدار تابع هدف مربوط به آلودگی برابر ۳۰۱۸۷ حاصل شد. مقدار آلودگی به‌دست‌آمده در این حالت، بیشترین میزان آلودگی ممکن می‌باشد که به ازای آن، هیچ COD متری در هیچ‌کدام از مجراها نصب نمی‌گردد. این مقدار آلودگی ممکن است مطلوب تصمیم‌گیرندگان نباشد. اگر راه‌حل پارتویی ۲ را در نظر بگیریم، میزان آلودگی برابر ۲۴۸۲۸ بود. با این وجود این میزان آلودگی نسبت به آلودگی مربوط به عدم نصب COD متر به میزان ۵۳۵۹ اختلاف داشت؛ بنابراین در صورت در نظر گرفتن امکان نصب COD متر در مدل، بدترین جواب پارتویی از نظر آلودگی نسبت به عدم نصب COD متر مقدار آلودگی قابل‌توجه کمتری دارد که می‌تواند از نظر تصمیم‌گیرندگان مطلوب‌تر باشد. حالت سوم بیشترین میزان آلودگی را همان‌طور که انتظار داریم نتیجه می‌دهد و از سوی دیگر هزینه آن نسبت به حالت دوم نیز به‌مراتب بیشتر می‌باشد؛ بنابراین چنین حالتی هرگز مطلوب نمی‌باشد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این پژوهش در قالب ارائه مدل ریاضی جامع و منطبق با شرایط واقعی جهت مقابله با شرایط عدم وجود اطلاعات واقعی و با در نظر گرفتن سایر محدودیت‌های مسئله می‌تواند جهت تعیین نقاط احداث حوضچه‌های ذخیره و انتخاب امکان ارائه پساب به متقاضیان (کشاورزان و صنایع) با توجه به شرایط زیست‌محیطی و به‌طور کلی بازطراحی کلی پایدار شبکه حلقه بسته آب و فاضلاب و توزیع پساب شهری برای مصارف کشاورزی و صنعتی به تصمیم‌گیران این حوزه کمک نماید. همان‌طور که انتظار می‌رود اگر قادر به جبران افزایش هزینه‌ها نباشیم میزان آلودگی نیز افزایش خواهد یافت، بدان معنا که در صورت عدم تقبل افزایش هزینه‌ها، به‌ناچار شاهد آلودگی آب و محیط‌زیست خواهیم بود. مورد اخیر از آن جهت حائز اهمیت است که نقش نهادهای قانون‌گذار و مسئول در مباحث زیست‌محیطی را نشان

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: زهرا ابراهیمی، محمدرضا غلامیان، مهسا عربی؛  
نظارت و نگارش نهایی: زهرا ابراهیمی، محمدرضا غلامیان، مهسا عربی.

### References

- Gupta, I., 1969. Linear programming analysis of a water supply system. *AIIE Transactions*, 1(1): p. 56-61. doi: 10.1080/05695556908974414
- Deininger, R., 1965. Water quality management: the planning of economically optimal pollution control systems (PhD Thesis). Northwestern University. Evanston, IL.
- Smeers, A.Y., Tyteca, D., 1982. Optimal location and design of wastewater treatment plants under river quality constraints. in: "Proceedings of I.F.I.P. Working Conference on Environmental Systems Analysis and Management", S. Rinaldi, ed., North-Holland, Amsterdam.
- Zhang, C., 2005. A study on urban water reuse management modeling. Master's thesis, University of Waterloo.
- Dandy, G., Duncker, A., Wilson, J. and Pedoux, X., 2009. An approach for integrated optimization of wastewater, recycled, and potable water networks. In *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers* (pp. 1-11). doi: 10.1061/41036(342)35
- Chung, G., Lansey, K., Bayraksan G., 2009. Reliable water supply system design under uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 24(4): p. 449-462. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.08.007
- Ray, P.A., Kirshen, P.H., Vogel, R.M., 2009. Integrated optimization of a dual quality water and wastewater system. *Journal of water resources planning and management*, 136(1): p. 37-47. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000004
- Liu, S., Konstantopoulou, F., Gikas, P., Papageorgiou, G., 2011. A mixed integer optimisation approach for integrated water resources management. *Computers & Chemical Engineering*, 35(5): p. 858-875. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.032.
- Guo, P., Huang, G.H., Zhu, H., Wang, X., 2010. A two-stage programming approach for water resources management under randomness and fuzziness. *Environmental Modelling & Software*, 25(12): p. 1573-1581. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.018.
- Zhou, X.-c., Zhao, Z., Zhou, K., He, C., 2012. Remanufacturing closed-loop supply chain network design based on genetic particle swarm optimization algorithm. *Journal of Central South University*, 19(2): p. 482-487. doi: 10.1007/s11771-012-1029-y.
- Mortazavi-Naeini, M., Kuczera, G., Kiem, A.S., Henley, B., Berghout, B., Turner, E., 2015. Robust optimization to secure urban bulk water supply against extreme drought and uncertain climate change. *Environmental Modelling & Software*, 69: p. 437-451. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.02.021.
- Al-Zahrani, M., Musa, A., Chowdhury, S., 2016. Multi-objective optimization model for water resource management: a case study for Riyadh, Saudi Arabia. *Environment, development and sustainability*, 18(3): p. 777-798. doi: 10.1007/s10668-015-9677-3.
- Ghelichi, Z., Tajik, J., Pishvae, M.S., 2018. A novel robust optimization approach for an integrated municipal water distribution system design under uncertainty: A case study of Mashhad. *Computers & Chemical Engineering*, 110: p. 13-34. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.11.017.
- Abdulbaki, D., Alhinidi, M., Yasinie, A., Abu najm, M., 2017. An optimization model for the allocation of water resources. *Journal of Cleaner Production*, 164: p. 994-1006. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.024.
- Rezaei, N., Sierra-Altamiranda, A., Diaz-Elsayed, N., Charkhgard, H., Zhang, Q.,



2019. A multi-objective optimization model for decision support in water reclamation system planning. *Journal of Cleaner Production*, 240: p. 118227. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118227.
16. Ghassemi, A., Hu, M., Zhou, Z., 2017. Robust planning decision model for an integrated water system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(5): p. 05017002. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000757.
17. Hao, R., Li, M., Li, J B., Zhang, QK., Liu, F., 2013. Water Quality Assessment for Wastewater Reclamation Using Principal Component Analysis. *Journal of Environmental Informatics*, 21. (1). doi:10.3808/jei.201300231.
18. Kurian, M., Reddy, VR., Dietz, T., Brdjanovic, D., 2013. Wastewater re-use for peri-urban agriculture: a viable option for adaptive water management? *Sustainability science*, 8(1): p. 47-59 doi:10.1007/s11625-012-0178-0.
19. Asghari Moghadam, A., Shokri, S., Vaezi Heer, A., Kazemian, N., 2013. Feasibility of Reusing Tabriz Refinery Wastewater for Agricultural and Industrial Uses, First International Specialized Congress of Earth Sciences. [In Persian].
20. Karimi E., Khoshalhan F., Hejazi R., 2011. Designing a New Mathematical Model for Dynamic Cell Formation Problem. *International journal of industrial engineering and production management*, 22 (2) :145-159 URL: <http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-651-fa.html>. [In Persian].
21. Metkaf, 1389. *Wastewater Engineering - Volume 1* - Translated by Abrisham Chi, A., Afshar, A., Jamshid, B. [In Persian].

