dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367693.3299

Case Study

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 3, pp: 57-71

Prioritization of Wastewater Treatment Options in Rural Areas in Various Conditions According to Two Scientific and Executive Perspectives

B. Karimpour[1], A. Dehnavi[2]*, S. Jamshidi[3]

1. MSc. Student in Environmental Engineering (Water and Wastewater), Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
(Corresponding Author) a.dehnavi@eng.ui.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

(Received Nov. 1, 2022 Accepted March 1, 2023)

To cite this article:
Karimpour, B., Dehnavi, A., Jamshidi, S. 2023. "Prioritization of wastewater treatment options in rural areas in various conditions according to two scientific and executive perspectives"
Journal of Water and Wastewater, 34(3), 57-71. Doi: 10.22093/wwj.2023.367693.3299. (In Persian)

Abstract

Nowadays, the importance of ensuring the effluent standards of wastewater treatment plants is obvious. It is necessary to pay attention to the selection of the biological wastewater treatment process by considering different and diverse criteria. Because, the incorrect choice of the process increases costs and does not achieve the desired result. In this research, the technique of analytical hierarchy process and its combination with Taguchi method was used. By weighting and prioritizing the criteria and options by two groups of experts, including the scientific group and the executive group, the weight of each criterion and option was calculated. In the present study, options (in two cases including 7 conventional options and 7 advanced options), criteria (4 items) and comprehensive and complete sub-criteria (13 items) for selecting biological wastewater treatment processes in rural areas under various conditions have been considered. Finally, it was concluded that in both perspectives, the sub-criteria of providing disposal criteria and standards and the ability to reuse wastewater and climatic conditions were placed in the first and second priority. These sub-criteria received weights of 0.113 and 0.108 from the scientific point of view and 0.122 and 0.106 from the executive point of view. Also, the present study showed that the model of combining AHP and Taguchi method is a successful model for determining the method of biological wastewater treatment for various conditions. Finally, according to the results of this study, the prioritization of biological wastewater treatment options for wastewater treatment in Ahar village was done as a case study and the output results showed that the first priority of all experts is the artificial wetland method and MBBR, from a scientific point of view, Extended Aeration and ABR-Wetland, and in the executive point of view, artificial wetland and A^2O methods were prioritized (conventional and advanced methods, respectively).

Keywords: Wastewater Treatment Plant, Multi-Criteria Decision-Making, Taguchi Method, Wastewater Treatment Options.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367693.3299

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۳، صفحه: ۷۱-۵۷

اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه فاضلاب مناطق روستایی در شرایط متنوع به تفکیک دو دیدگاه علمی و اجرایی

بهناز کریم‌پور[۱]، علی دهنوی[۲]*، شروین جمشیدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست (آب و فاضلاب)، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) a.dehnavi@eng.ui.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۰ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۱۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
کریم‌پور، ب.، دهنوی، ع.، جمشیدی، ش.، ۱۴۰۲، "اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه فاضلاب مناطق روستایی در شرایط متنوع به تفکیک دو دیدگاه علمی و اجرایی" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۳)، ۷۱-۵۷. **Doi: 10.22093/wwj.2023.367693.3299**

چکیده

امروزه اهمیت تأمین استانداردهای پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر کسی پوشیده نیست. توجه به انتخاب فرایند تصفیه بیولوژیکی با در نظر گرفتن معیارهای مختلف و متنوع، امری ضروری است. زیرا، انتخاب نادرست فرایند باعث افزایش هزینه‌ها و عدم دستیابی به نتیجه موردنظر می‌شود. در این پژوهش، از تکنیک فرایند تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب آن با روش تاگوچی استفاده شد. با وزن‌دهی و اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌ها توسط دو دسته از کارشناسان شامل گروه علمی و گروه اجرایی، وزن هر معیار و گزینه محاسبه شد. در این پژوهش، گزینه‌ها (در دو حالت شامل ۷ گزینه مرسوم و ۷ گزینه پیشرفته)، معیارها (۴ مورد) و زیرمعیارهای جامع و کاملی (۱۳ مورد) برای انتخاب فرایندهای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب در مناطق روستایی تحت شرایط متنوع، در نظر گرفته شد. در نهایت، نتیجه شد که در هر دو دیدگاه، زیرمعیارهای تأمین ضوابط و استانداردهای دفع و قابلیت استفاده مجدد از پساب و شرایط اقلیمی در اولویت اول و دوم قرار گرفتند. این زیرمعیارها به ترتیب در دیدگاه علمی وزن‌های ۰/۱۱۳ و ۰/۱۰۸ و در دیدگاه اجرایی، وزن‌های ۰/۱۲۲ و ۰/۱۰۶ را کسب کردند. همچنین این پژوهش نشان داد که الگوی تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی و تاگوچی، الگوی موفقی برای تعیین روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب برای لحاظ شرایط متنوع است. در نهایت با توجه به نتایج این پژوهش، اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب برای تصفیه فاضلاب روستای آهار به‌عنوان یک مطالعه موردی انجام شد و نتایج خروجی نشان داد که از دید همه کارشناسان و به ترتیب روش‌های مرسوم و پیشرفته، روش تالاب مصنوعی و راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، از نظر دیدگاه علمی، روش‌های لجن فعال هوادهی گسترده، ترکیب تالاب مصنوعی، راکتور بافل‌دار بی‌هوازی و نیز از نظر دیدگاه اجرایی، روش‌های تالاب مصنوعی و A^2O در اولویت اول قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: تصفیه‌خانه فاضلاب، فاضلاب روستایی، تصمیم‌گیری چند معیاره، روش تاگوچی، گزینه‌های تصفیه فاضلاب

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367693.3299

۱- مقدمه

کمبود آب، یکی از بزرگترین چالش‌های بشر در سده حاضر است که می‌تواند سبب بسیاری از محدودیت‌ها در جهان شود. همچنین، تقاضا برای آب شیرین به‌دلیل رشد اقتصادی و افزایش جمعیت رو به افزایش است (Khazaeai et al., 2019). بنابراین برنامه‌ریزی برای شناسایی و استفاده از منابع آبی نامتعارف، مانند استفاده مجدد از آب خاکستری و پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و روستایی، کمک شایانی به تعدیل کمبود آب خواهد کرد (Izadpanah & Sarrafzadeh, 2020). در نتیجه، تصفیه فاضلاب‌های موردنظر و استفاده مجدد از پساب آنها به‌عنوان یک منبع با ارزش آب برای مصارف مختلف، از مهم‌ترین اهداف تصفیه فاضلاب در مناطق با محدودیت منابع است (Amin et al., 2011).

یکی از بخش‌هایی که در برنامه‌های توسعه باید مورد توجه قرار گیرد، بخش روستایی است (Razmkhah et al., 2007). بررسی وضعیت موجود سیستم‌های تصفیه فاضلاب روستایی نشان می‌دهد که مدیریت آنها و از جمله انتخاب روش مناسب تصفیه، با چالش‌های زیادی روبه‌رو است (Zeng et al., 2007).

انتخاب بهترین روش تصفیه معمولاً فرایندی پیچیده بوده و با عدم قطعیت همراه است. شرکت‌های مشاور معمولاً چند روشی را که بهترین تخصص را در طراحی آن دارند، برای هر منطقه‌ای طراحی و بهترین آنها را به کارفرما پیشنهاد می‌دهند که کار صحیحی به نظر نمی‌رسد و از مشاوری به مشاور دیگر، معمولاً نتیجه متفاوت خواهد بود. به‌دلیل اینکه در مناطق مختلف و با توجه به شرایط ویژه هر منطقه از جمله شرایط اقلیمی، دسترسی به زمین و دسترسی به فناوری‌های روز، روش مناسب تصفیه فاضلاب و خصوصاً تصفیه بیولوژیکی آن می‌تواند متفاوت باشد (Kalbar et al., 2012).

انتخاب اشتباه در این زمینه می‌تواند موجب افزایش هزینه‌ها و عدم دستیابی به نتیجه مناسب از نظر تولید پساب استاندارد شود. در نتیجه، برای انتخاب روش مناسب، باید معیارهای اثرگذار بر انتخاب روش تصفیه تعیین و از آنها استفاده شود. توجه به این معیارها و زیرمعیارها که در مناطق مختلف می‌توانند از نظر سطح و مقدار کاملاً متفاوت باشند، انتخاب‌های متفاوتی را از نظر فرایندهای بیولوژیکی پیش روی تصمیم‌گیران قرار خواهد داد که تاکنون و به‌دلیل زیاد بودن و پیچیدگی، به‌صورت جامع بررسی نشده است. در ادامه برای روشن‌تر شدن مسئله پژوهشی، به برخی از معیارها و زیرمعیارها در مطالعات موردی و نیز عدم توجه به برخی موارد که باعث ایجاد اشکالاتی در فرایندهای تصفیه شده، اشاره شده است.

در پژوهشی از مولینوس و همکاران در سال ۲۰۱۵، به ارزیابی گزینه‌های تصفیه فاضلاب برای جوامع کوچک پرداخته شده است. در این پژوهش و با فرایند تحلیل شبکه[1]، هفت گزینه تصفیه فاضلاب با معیارهای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی در نظر گرفته شده که هر معیار نیز به زیرمعیارهایی گروه‌بندی شده است. در این پژوهش، شرایط متنوع برای زیرمعیارها لحاظ نشده که یکی از نقاط ضعف آن به شمار می‌رود، بنابراین قابلیت کاربرد برای مناطق با شرایط متفاوت را ندارد (Molinos-Senante et al., 2015).

پژوهش دیگری که توسط حیدری و همکاران در سال ۱۳۹۵ انجام شد، ضمن مقایسه روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب، انتخاب گزینه مناسب تصفیه فاضلاب برای مناطق روستایی انجام شد. این پژوهش، با رویکرد کاربردی در روستای سلیمانی استان خراسان رضوی و با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی[2] و با هدف تعیین گزینه برتر تصفیه بیولوژیکی فاضلاب روستای موردنظر انجام شد. در این راستا، پس از در نظر گرفتن عوامل مؤثر، ۳ معیار و ۱۵ زیرمعیار انتخاب و سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، فرایندهای تصفیه فاضلاب اولویت‌بندی شدند. نتایج وزن‌دهی این پژوهش به‌ترتیب روش‌های تالاب، دیسک‌های بیولوژیکی چرخان، هوادهی با بستر گسترده و لجن فعال، ۰/۳۶، ۰/۲۸، ۰/۲ و ۰/۱۵ تعیین شد. در این پژوهش که سه معیار کلی اقتصادی، کارایی فرایند و فنی لحاظ شده، تغییر سطوح در زیرمعیارهای یاد شده با هدف لحاظ شرایط متنوع، مدنظر قرار نگرفت. بنابراین جامعیت لازم برای استفاده از نتایج آن برای مناطق دیگر کشور را ندارد و طبق این الگو، باید برای هر منطقه، معیارها و زیرمعیارها مجدداً بررسی و اولویت گزینه‌ها مشخص شود (Heidari et al., 2016).

وی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰، برای بررسی روش تصفیه بیولوژیکی مطلوب برای فاضلاب کارخانه کک‌سازی با استفاده از

[1] Analytical Network Process (ANP)
[2] Analytical Hierarchy Process (AHP)

فرایند سلسله مراتبی، پژوهش‌هایی انجام دادند. چهار معیار اصلی شامل معیارهای فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی بود که هر کدام شامل زیرمعیارهایی بودند. در این پژوهش نیز شرایط متنوع برای زیرمعیارها لحاظ نشد (Wei et al., 2020).

همان طور که مشخص شد، این پژوهش‌ها برای مطالعات موردی و با درنظر گرفتن چند معیار و زیرمعیار محدود و مناسب شرایط خاص منطقه مورد مطالعه، بررسی شده‌اند و جامعیت لازم برای استفاده تحت شرایط متنوع را ندارند، به این دلیل که زیرمعیارها متنوع و پوشش‌دهنده برای همه مناطق نبوده است. به همین دلیل، در این پژوهش سعی بر این بود که معیارها و زیرمعیارهای جامع و کاملی برای بررسی در نظر گرفته شود تا نتایج آن، جامعیت کافی داشته باشد و بتوان از آن، برای شرایط مختلف استفاده و گزینه‌های تصفیه را اولویت‌بندی و معرفی کرد.

به این منظور و ضمن لحاظ سطوح سه گانه برای ۱۳ زیرمعیار مختلف با هدف ایجاد شرایط متنوع، از تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تاگوچی برای کاهش حالات مورد بررسی بهره برده شد که در جای خود اشاره شده است.

بنابراین، مهمترین نوآوری این پژوهش، لحاظ شرایط متنوع با تعریف زیرمعیارهای کافی و نیز سطوح متفاوت برای آنها از یک طرف و نیز تلفیق روش سلسله مراتبی و تاگوچی از طرف دیگر بود. با این نوآوری، می‌توان با توجه به شرایط هر منطقه، اولویت گزینه‌های تصفیه را برای آن منطقه با شرایط اختصاصی مربوطه تعیین و استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش

تعیین معیارهای اصلی برای مقایسه گزینه‌های تصفیه فاضلاب، اهمیت زیادی دارد. پس از بررسی پژوهش‌های انجام شده، معیارها و زیرمعیارهای پر تکرار و با اهمیت‌تر در دسته‌هایی طبقه‌بندی و در نهایت، چهار معیار شامل: ۱) اقتصادی، ۲) فنی و اجرایی، ۳) محیط‌زیستی و ۴) مدیریت و اجتماعی و ۱۳ زیرمعیار توسط کارشناسان انتخاب شد که در جدول ۱ درج شده‌اند. در این پژوهش و با هدف ایجاد شرایط متنوع برای هر زیرمعیار، سه سطح برای هر کدام لحاظ شد که در همان جدول درج شده است.

۲-۲- معرفی گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی

فرایندهای مختلفی برای تصفیه و خصوصاً کاهش محتوی آلی فاضلاب به‌صورت بیولوژیکی وجود دارد که هر کدام مزایا و معایبی دارند. در این پژوهش، گزینه‌های زیادی برای روش مناسب تصفیه بیولوژیکی فاضلاب مناطق روستایی و در دو بخش مرسوم و پیشرفته بررسی و تعدادی، بر اساس نظر خبرگان انتخاب و استفاده شد. در صورت نیاز به بررسی گزینه‌های دیگر، از الگوی به کار رفته در این پژوهش می‌توان برای اولویت‌بندی آنها استفاده کرد. گزینه‌های مرسوم منتخب این پژوهش شامل: ۱) پکیج‌های تصفیه (پکیج مبتنی بر روش‌های مرسوم، شامل پکیج‌های لجن فعال متعارف، لجن فعال گسترده، تثبیت تماسی)، ۲) لجن فعال متعارف (بدون حذف ازت و فسفر)، ۳) لجن فعال هوادهی گسترده (بدون حذف ازت و فسفر)، ۴) تالاب مصنوعی (شامل انواع تالاب‌های افقی و عمودی و هیبریدی)، ۵) روش‌های ساده طبیعی (شامل برکه بی‌هوازی، اختیاری و هوازی)، ۶) برکه هوادهی، ۷) صافی چکنده بود.

گزینه‌های پیشرفته منتخب نیز شامل: ۱) پکیج مبتنی بر روش‌های پیشرفته رشد معلق با حذف حداقل ازت، ۲) پکیج مبتنی بر روش‌های پیشرفته رشد چسبیده با حذف حداقل ازت، ۳) سیستم راکتور ناپیوسته متوالی[1]، ۴) راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک[2]، ۵) ترکیب راکتور بافل‌دار بی‌هوازی به‌عنوان پیش تصفیه و تالاب مصنوعی به‌عنوان تصفیه تکمیلی (ABR-Wetland[3])، ۶) A^2O[4] و ۷) راکتور بیولوژیکی غشایی[5] بود.

علت بررسی و انتخاب گزینه‌های پیشرفته در کنار گزینه‌های مرسوم، شرایط خاص برخی مناطق و لزوم استفاده از روش‌های پیشرفته بود. برای مثال و در نزدیکی یک منبع سطحی آب شرب، ممکن است استفاده از گزینه‌های مرسوم (مثلاً روش‌های طبیعی که اغلب برای روستاها قابل استفاده است)، امکان‌پذیر نباشد. بنابراین با هدف ایجاد شرایط متنوع، علاوه بر تنوع در سطوح زیرمعیارها، تلاش شد که تنوعی از گزینه‌های مرسوم و پیشرفته نیز مدنظر قرار گیرد.

[1] Sequence Batch Reactor (SBR)
[2] Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)
[3] Anaerobic Baffled Reactor (ABR)
[4] Anaerobic, Anoxic, Aerobic
[5] Membrane Bio Reactor (MBR)

جدول ۱- معیارها، زیرمعیارها و سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای هر یک در این پژوهش

Table 1. Criteria, sub-criteria and the different levels considered for each in the present study

Criteria	No. of Sub-criteria	Sub- criteria title	Sub-criteria levels		
			1	2	3
Economical	1	Financial resources available to initial costs	Low	Medium	High
	2	Financial resources available to the cost of operation	Low	Medium	High
Technical and operational	3	The possibility of providing complex equipment	Low	Medium	High
	4	Dependence on foreign technology	Low	Medium	High
	5	Flexibility of the desired method and reliability of the process	High	Medium	Low
	6	The importance of ease of implementation	High	Medium	Low
	7	Climatic conditions of the project area	Hot and dry or dry and humid climate	Mild and humid	Cold climate
	8	Ease of use and the need for expert personnel	Great simplicity and low number of personnel	Average simplicity and average number of personnel	The simplicity of operation and the number of expert personnel are not important
	9	The need to purify and dispose of sludge	Low	Medium	High
Environmental	10	The importance of the disposal criteria and standards and the ability to reuse the wastewater	High	Medium	Low
	11	Importance of HSE	High	Medium	Low
Managerial and social	12	The importance of public acceptance and social benefits	High	Medium	Low
	13	Improvement of the process	High	Medium	Low

۲-۳- چگونگی کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی، توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ معرفی شد (Satty, 2001). در این پژوهش، از این روش برای مقایسات زوجی و وزن‌دهی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها در تلفیق با روش تاگوچی استفاده شد. برای تعیین وزن معیارها، زیرمعیارها و تعیین وزن گزینه‌ها تحت یک معیار با سطوح مختلف، دوبه‌دو آنها را باهم مقایسه می‌کنند. همچنین برای انجام مقایسات زوجی، پس از تشکیل ماتریس مربوطه و تکمیل آن توسط دو دسته از کارشناسان شامل گروه علمی (اعضای هیئت علمی دانشگاه) و گروه اجرایی (شامل کارشناسان کارفرما و مشاوران)، اهمیت یا وزن هر معیار یا گزینه در سه حالت شامل: ۱) همه کارشناسان، ۲) گروه علمی و ۳) گروه اجرایی محاسبه شد. در پژوهش حاضر و برای وزن‌دهی، از روش میانگین هندسی به علت دقت بیشتر آن، استفاده شد. در این روش، ابتدا میانگین هندسی ردیف‌های ماتریس زوجی تعیین و سپس، بردار وزن از نرمال کردن این اعداد به دست آمد (Zebardast, 2001).

تقریباً تمامی محاسبات مربوط به فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده در قالب ماتریس مقایسات زوجی، انجام می‌شود. هر گونه خطا و ناسازگاری در مقایسه و تعیین اهمیت گزینه‌ها، نتیجه نهایی را مخدوش می‌سازد. نرخ ناسازگاری که در ادامه، نحوه محاسبه آن بیان شده، وسیله‌ای است که سازگاری را مشخص ساخته و تجربه نشان داده که اگر نرخ ناسازگاری کمتر از

۰/۱۰ باشد، سازگاری مقایسات قابل قبول بوده و در غیر این صورت، مقایسه‌ها باید تجدیدنظر شوند. مکانیسمی که ساعتی برای بررسی ناسازگاری در قضاوت‌ها در نظر گرفت، محاسبه ضریبی به نام نرخ ناسازگاری[1] است که مطابق با معادله ۱، از تقسیم شاخص ناسازگاری[2] به شاخص تصادفی بودن[3] حاصل می‌شود.

شاخص II با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد. شاخص تصادفی بودن نیز با توجه به تعداد زیرمعیارها (n)، از جدول ۲ استخراج و استفاده شد (Ataee, 2016)

$$IR = \frac{II}{RI} \quad (۱)$$

$$II = \frac{L-n}{n-1} \quad (۲)$$

برای تعیین پارامتر L در معادله ۲ به‌عنوان عامل بردار ویژه، از معادله ۳ استفاده شد

$$L = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{AW_i}{W_i}\right)\right) \quad (۳)$$

که در آن

AW_i برداری است که از ضرب ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها (ماتریس A) در بردار W_i (بردار وزن زیرمعیارها) به دست می‌آید.

جدول ۲- شاخص تصادفی (Ataee, 2016)

Table 2. Ratio index (Ataee, 2016)

n	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41
n	9	10	11	12	13	14	15
RI	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

۲-۴- چگونگی کاربرد روش تاگوچی

روش تاگوچی یک روش طراحی آزمایش و تجزیه‌وتحلیل آماری است که به منظور صرفه‌جویی در هزینه و نیز کاهش چشمگیر زمان، استفاده می‌شود. بر اساس این روش، فقط تعدادی ترکیب از همه حالات ممکنه، انتخاب و آزمایش یا بررسی می‌شوند. در این پژوهش و با ۱۳ زیرمعیار سه سطحی، بالغ بر ۱۵۹۴۳۲۳ حالت مختلف باید در روش سلسله مراتبی توسط متخصصان بررسی می‌شد که علاوه بر صرف زمان زیاد، عملاً غیرممکن بود. بنابراین با استفاده از روش تاگوچی و با طراحی ماتریس متعامد مربوطه در نرم‌افزار Qualitek-4، این تعداد به ۲۷ حالت (ماتریس متعامد L-27) کاهش یافت. بنابراین در این پژوهش از تلفیق روش تاگوچی با روش تحلیل سلسله مراتبی برای کاهش حالات بررسی شده به نحو مؤثری استفاده شد. می‌توان گفت که مهمترین نوآوری این پژوهش، لحاظ شرایط متنوع در زیرمعیارها (سطوح سه‌گانه هر زیرمعیار) با تلفیق روش تاگوچی و تحلیل سلسله مراتبی بود تا بتوان برای هر شرایطی، گزینه‌های تصفیه مناسب را انتخاب و سپس، طراحی و برآورد اقتصادی کرد و در نهایت بر اساس مهندسی ارزش و یا دیگر روش‌ها، بهترین آنها را انتخاب و اجرا کرد.

۲-۵- روش تعیین اولویت گزینه‌های تصفیه

در این پژوهش و برای تعیین اولویت انتخاب روش‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب در مناطق روستایی تحت شرایط متنوع، هر کارشناس و برای مقایسه زیرمعیارها در سطوح سه گانه و نیز گزینه‌ها در دو روش مرسوم و پیشرفته، در مجموع ۸۰ ماتریس مقایسه زوجی را تکمیل کرد. سپس نتایج وزن‌دهی هر کارشناس به وزن گروهی بر اساس ۱) همه کارشناسان، ۲) گروه علمی و ۳) گروه اجرایی تعمیم داده و بر اساس ترکیبات ۲۷ گانه پیشنهادی روش تاگوچی، ماتریس مربوطه تکمیل و برای استفاده در نرم‌افزار Qualitek-4 آماده شد. برای تهیه نتایج ماتریس موردنیاز برای استفاده در نرم‌افزار موردنظر به تفکیک هر گزینه، ستونی با ۲۷ داده در اکسل بر اساس ۲۷ ترکیب پیشنهادی تاگوچی شکل گرفت. این ستون از میانگین وزنی نظرات کارشناسان برای هر گزینه و به تفکیک سه حالت فوق آماده شد.

برای مثال و فقط برای حالت ۱ (همه کارشناسان) و با هدف اولویت‌بندی کلی بین ۷ گزینه مرسوم، ۷ ستون در اکسل با استفاده از میانگین وزنی همه کارشناسان برای هر ۲۷ ترکیب محاسبه شد. ستون اول به میانگین وزنی گزینه ۱، ستون دوم به میانگین وزنی برای گزینه ۲ و به همین ترتیب، برای دیگر گزینه‌ها اختصاص

[1] Inconsistency Ratio (IR)
[2] Inconsistency Index (II)
[3] Rndom Index (RI)

جدول ۳- مشخصات کارشناسان شرکت‌کننده در تکمیل پرسش‌نامه‌های این پژوهش

Table 3. Specifications of experts who participated in completing the questionnaires of this research

Expert No.	Expert profile	Category
1	PhD., civil engineering-environmental engineering and specialist in water and wastewater	Scientific
2	PhD., environmental engineering - water resources and specialist in water and wastewater	Scientific
3	PhD., civil-water engineering, wastewater treatment plant expert in water and wastewater company	Scientific
4	PhD., environmental engineering - water and wastewater, water and wastewater expert of the country	Scientific
5	Master's degree, environmental health, wastewater treatment plant operation expert in water and wastewater company	Executive
6	Master's degree, water and wastewater engineering, consulting engineer in the field of water and wastewater	Executive
7	Bachelor's degree, water and wastewater engineering, wastewater treatment plant expert in water and wastewater company	Executive

یافت. برای مثال و فقط برای ترکیب شماره ۱ از ۲۷ ترکیب و برای گزینه‌های مرسوم ۱ تا ۷ ارائه شده در بخش ۲-۲، وزن گزینه‌ها از ۱ تا ۷ به ترتیب ۰/۱۲۴، ۰/۱۲۵، ۰/۱۵۰، ۰/۱۷۴، ۰/۱۷۸، ۰/۱۲۳ و ۰/۱۲۶ برای همه کارشناسان به دست آمد که نشان می‌دهد، گزینه ۵ (روش‌های طبیعی تصفیه) با وزن ۰/۱۷۸ به عنوان اولویت اول با اختصاص عدد ۱ به آن و پس از آن، گزینه ۴ (تالاب مصنوعی) با وزن ۰/۱۷۴ به عنوان اولویت دوم با اختصاص عدد ۲ به آن و گزینه ۳ (لجن فعال هوادهی گسترده) با وزن ۰/۱۵۰ به‌عنوان اولویت سوم با اختصاص عدد ۳ به آن، اولویت‌های اول تا سوم هستند. بر همین اساس، شماره گزینه‌ها برای تمام ترکیبات ۲۷ گانه ثبت شد. در نهایت و مثلاً برای اولویت اول در ۲۷ حالت مدنظر که شامل گزینه‌های مختلفی بود، نتایج اولویت‌بندی در نرم‌افزار وارد و علاوه بر تحلیل واریانس ANOVA و تعیین سهم اثر زیرمعیارهای ۱۳ گانه، اولویت اول برای هر یک از ترکیبات ۱۵۹۴۳۲۳تایی ناشی از شرایط متنوع که لازم بود، تعیین شد. برای اولویت‌های بعدی گزینه‌های مرسوم و نیز اولویت‌های گزینه‌های پیشرفته نیز به تفکیک سه حالت مدنظر (همه کارشناسان، گروه علمی و گروه اجرایی)، همین روش به کار رفت.

در ادامه و با هدف مقایسه نتایج با یک نمونه واقعی، نتایج به دست آمده برای روستای آهار از توابع استان تهران که سطوح زیرمعیارهای آن قابل دستیابی بود، به صورت مطالعه موردی تعیین و صحت این روش بر روی این منطقه سنجیده شد. برای اولویت‌بندی گزینه‌ها در این منطقه، نیاز به ایجاد ترکیبی از سطوح زیرمعیارهای منطبق با شرایط موجود بود که با بررسی‌های انجام شده و مشورت با متخصصان، سطوح هریک از زیرمعیارها تعیین و به تفکیک گزینه‌های مرسوم و پیشرفته در نرم‌افزار Qualitek-4 وارد و گزینه‌های دارای اولویت اول احداث برای منطقه موردنظر، تعیین شد. مشخصات کارشناسان تکمیل‌کننده ماتریس‌های وزن‌دهی در جدول ۳ آمده است.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱، میانگین نتایج وزن‌دهی کارشناسان به زیرمعیارهای ۱۳گانه، به صورت کلی برای همه کارشناسان و در دو دسته علمی و اجرایی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در وزن‌دهی زیرمعیارها با دیدگاه علمی، اولویت اول تا سوم، به ترتیب به زیرمعیارهای شماره ۱۰ (تامین ضوابط و استانداردهای دفع و قابلیت استفاده مجدد از پساب) با وزن ۰/۰۳±۰/۱۱۳، شماره ۷

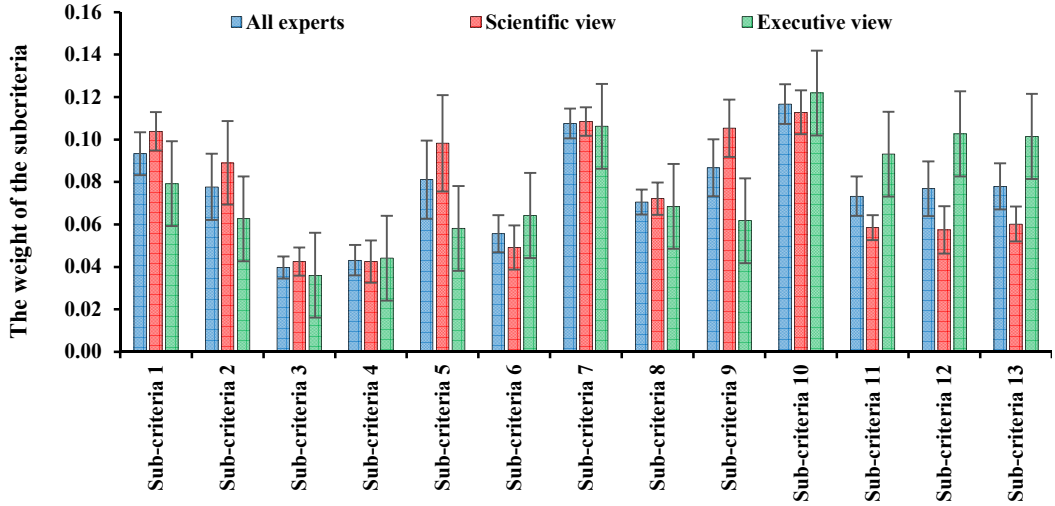

Fig. 1. The results of the weight of the sub-criteria studied in the current research

شکل ۱- نتایج وزن زیرمعیارهای بررسی شده در این پژوهش

(شرایط اقلیمی محدوده طرح) با وزن ۰/۰۲±۰/۱۰۸ و شماره ۹ (نیاز به تصفیه و دفع لجن) با وزن ۰/۰۳±۰/۱۰۵ اختصاص یافت. این در حالی است که در گروه اجرایی، اولویت اول تا سوم به ترتیب در زیرمعیارهای شماره ۱۰ (تأمین ضوابط و استانداردهای دفع و قابلیت استفاده مجدد از پساب) با وزن ۰/۰۲±۰/۱۲۲، شماره ۷ (شرایط اقلیمی محدوده طرح) با وزن ۰/۰۲±۰/۱۰۶ و شماره ۱۲ (مقبولیت عمومی و منافع اجتماعی) با وزن ۰/۰۱±۰/۱۰۳ قرار داشت. در هر دو دیدگاه، مجموع وزن زیرمعیارهای شماره‌های ۷ و ۱۰ به عنوان اولویت اول و دوم، ۰/۲۲۴ از نظر همه کارشناسان، ۰/۲۲۱ در دیدگاه علمی و ۰/۲۲۸ در دیدگاه اجرایی بود که بسیار به هم نزدیک و از این نظر جالب توجه است. ولی در اولویت‌های بعدی، تفاوت‌هایی ایجاد شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای همه کارشناسان، اولویت اول تا سوم به ترتیب در زیرمعیارهای شماره ۱۰(تأمین ضوابط و استانداردهای دفع و قابلیت استفاده مجدد از پساب) با وزن ۰/۰۲±۰/۱۱۷ ، شماره ۷ (شرایط اقلیمی محدوده طرح) با وزن ۰/۰۲±۰/۱۰۷ و شماره ۱ (منابع مالی در دسترس برای تأمین هزینه‌های اولیه) با وزن ۰/۰۲±۰/۰۹۳ بوده که نشان‌دهنده، اولویت سوم به منابع مالی در دسترس اختصاص یافته که کاملاً متفاوت با دو حالت قبلی است.

در پژوهشی که توسط حیدری و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی مناسب‌ترین فرایند تصفیه فاضلاب برای مناطق روستایی پرداخته شد، توانایی تأمین استانداردهای محیط‌زیستی با وزن ۰/۴۳۹، امتیاز بیشتری نسبت به دیگر زیرمعیارها داشت (Heidari et al., 2016).

مقایسه زیرمعیار اول این پژوهش با زیرمعیار اول پژوهش حیدری و همکاران حاکی از این است که هر چند از نظر وزنی تفاوت وجود دارد، اما از نظر اولویت، نتایج یکسان بوده و تأمین ضوابط و استانداردهای محیط‌زیستی و از جمله استانداردهای دفع پساب، اهمیت زیادی در انتخاب گزینه‌های تصفیه دارد. این موضوع نشان می‌دهد که حتماً باید در کنار گزینه‌های مرسوم، گزینه‌های پیشرفته که با کیفیت خروجی بیشتری همراه هستند، مدنظر قرار گیرد تا در صورت نیاز و برای شرایط خاص محیط‌زیستی، بتوانند استفاده شوند (Heidari et al., 2016).

در پژوهش سالامیراد و همکاران با هدف انتخاب گزینه‌های تصفیه فاضلاب با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره که در سال ۲۰۲۱ نتایج آن منتشر شد، از سه معیار اقتصادی با ۵ زیرمعیار، محیط‌زیستی با ۳ زیرمعیار و اجتماعی با ۴ زیرمعیار استفاده شد. در این پژوهش، زیرمعیار هزینه‌های اولیه با وزن ۰/۲۶۰، مصرف انرژی با وزن ۰/۳۶۱ و نیاز نیروی کار با وزن ۰/۳۰۷ که به ترتیب از معیارهای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی هستند، بیشترین وزن در بین سایر زیرمعیارهای هر معیار

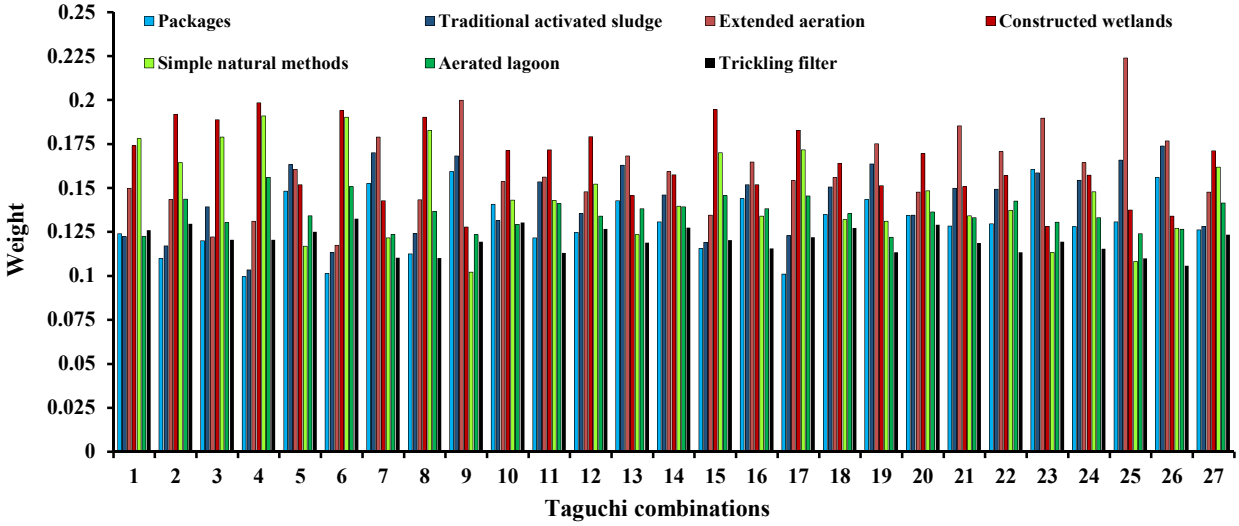

Fig. 2. The weight assigned by all experts to traditional options in 27 combinations of Taguchi method

شکل ۲- وزن اختصاص یافته توسط همه کارشناسان به گزینه‌های مرسوم در ۲۷ ترکیب روش تاگوچی

را داشتند (Salamirad et al., 2023). زیرمعیارهای پژوهش سالامیراد و همکاران، پژوهش در بیشتر موارد با زیرمعیارهای به کار رفته در این پژوهش که عمدتاً بر اساس شرایط عمومی و نه خاص یک پروژه لحاظ شده، متفاوت بوده، بنابراین قابل قیاس با نتایج این پژوهش نیست. نتایج وزن‌دهی گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی و فقط برای روش‌های مرسوم و استفاده از نظرات همه کارشناسان، به‌عنوان نمونه در شکل ۲ درج شده است.

در شکل ۳ نیز فقط برای ترکیب شماره ۱ از ۲۷ ترکیب بررسی شده (به‌عنوان نمونه)، وزن هر گزینه مرسوم تصفیه بیولوژیکی در ترکیب تاگوچی، نشان داده شده است. از این وزن‌ها برای تعیین اولویت گزینه‌ها با رعایت گزینه با وزن بیشتر، اولویت ۱ و گزینه با کمترین وزن، اولویت آخر، استفاده می‌شود. از این شکل به خوبی مشخص است که وزن‌ها از دید همه کارشناسان در بازه ۰/۱۲۲۵ تا ۰/۱۷۸۱ قرار داشته و برای حداقل وزن، لاگون هوادهی با اولویت ۷ و برای حداکثر وزن، روش‌های طبیعی تصفیه با اولویت ۱ پیشنهاد شد. باید توجه داشت که در ترکیب شماره ۱ تاگوچی، همه زیرمعیارها در سطح ۱ قرار داشتند. از جمله منابع مالی برای تأمین هزینه‌های اولیه و بهره‌برداری با محدودیت مواجه بوده، دسترسی به تجهیزات پیچیده محدودیت داشته، سهولت بالایی برای اجرا نیاز بوده و موارد دیگری مدنظر بوده که قبلاً در جدول ۱ مطرح شده است.

بر اساس وزن‌های به دست آمده که در شکل ۲ برای روش‌های مرسوم و از دید همه کارشناسان به عنوان نمونه درج شد، جدول ۴ از دید همه کارشناسان و برای اولویت اول گزینه‌های تصفیه مرسوم و پیشرفته تهیه شد. با کمک ارقام این جدول، نتایج اولویت‌بندی اول گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی به تفکیک روش‌های مرسوم و پیشرفته و نیز به تفکیک سه دیدگاه شامل ۱) همه کارشناسان، ۲) علمی و ۳) اجرایی تهیه و در شکل ۴ و ۵ به‌ترتیب برای فرایندهای مرسوم و پیشرفته آمده است. برای مثال و برای ترکیب شماره ۱، از دید همه کارشناسان و به‌ترتیب روش‌های مرسوم و پیشرفته، گزینه ۵ (روش‌های تصفیه طبیعی) و گزینه ۴ (راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک) به عنوان اولویت اول تعیین شد.

قبلاً بیان شد که در این پژوهش و با توجه به ۱۳ زیرمعیار سه سطحی، کل ترکیباتی که می‌تواند مدنظر قرار گیرد، ۱۵۹۴۳۲۳ حالت مختلف است. اگر در بررسی شرایط یک منطقه برای انتخاب روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب، شرایط مطابق یکی از ۲۷ ترکیب پیشنهادی روش تاگوچی باشد، مستقیم می‌توان از نتایج شکل ۴ یا ۵، گزینه موردنظر در اولویت‌های اول را استخراج و استفاده کرد. در غیر این صورت، با کمک این نتایج و با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4، می‌توان اولویت‌های اول هر یک از ۱۵۹۴۳۲۳ حالت را پیش‌بینی و استفاده کرد. این موضوع برای اولویت‌های بعدی نیز قابل کاربرد است.

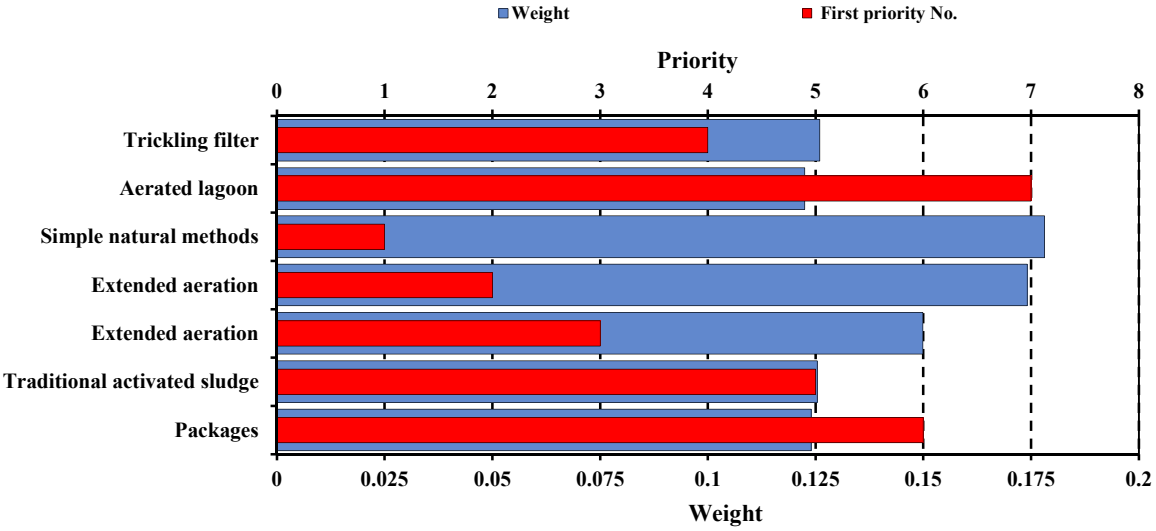

Fig. 3. The weight of the option and its priority in first Taguchi combination as an example for traditional treatment process

شکل ۳- وزن اختصاص یافته توسط همه کارشناسان به فرایندهای مرسوم تصفیه در ۲۷ ترکیب روش تاگوچی

جدول ۴- وزن گزینه‌های اولویت اول تصفیه بیولوژیکی فاضلاب به تفکیک گزینه‌های مرسوم و پیشرفته از دید همه کارشناسان

Table 4. The first priority weight of biological wastewater treatment options based on the all experts' results

27 Taguchi combinations	Conventional process			Advanced process		
	Scientific	Executive	All experts	Scientific	Executive	All experts
1	0.196	0.175	0.178	0.189	0.128	0.168
2	0.209	0.169	0.192	0.179	0.126	0.167
3	0.200	0.205	0.189	0.168	0.115	0.158
4	0.204	0.210	0.198	0.168	0.117	0.163
5	0.167	0.174	0.163	0.151	0.115	0.147
6	0.206	0.206	0.194	0.182	0.134	0.181
7	0.188	0.167	0.179	0.156	0.124	0.155
8	0.199	0.204	0.190	0.180	0.136	0.180
9	0.193	0.209	0.200	0.176	0.130	0.172
10	0.190	0.158	0.171	0.171	0.126	0.169
11	0.180	0.161	0.172	0.164	0.121	0.161
12	0.196	0.158	0.179	0.165	0.121	0.162
13	0.183	0.170	0.168	0.166	0.134	0.171
14	0.169	0.164	0.159	0.173	0.128	0.172
15	0.208	0.178	0.195	0.162	0.119	0.152
16	0.172	0.156	0.165	0.166	0.126	0.166
17	0.196	0.185	0.183	0.159	0.117	0.157
18	0.175	0.167	0.164	0.159	0.128	0.159
19	0.181	0.168	0.175	0.160	0.128	0.159
20	0.181	0.156	0.170	0.178	0.131	0.176
21	0.188	0.182	0.185	0.164	0.131	0.162
22	0.176	0.165	0.171	0.159	0.120	0.156
23	0.195	0.183	0.190	0.173	0.140	0.179
24	0.170	0.162	0.164	0.160	0.126	0.163
25	0.239	0.204	0.224	0.166	0.127	0.164
26	0.190	0.174	0.177	0.157	0.127	0.162
27	0.178	0.167	0.171	0.157	0.115	0.155

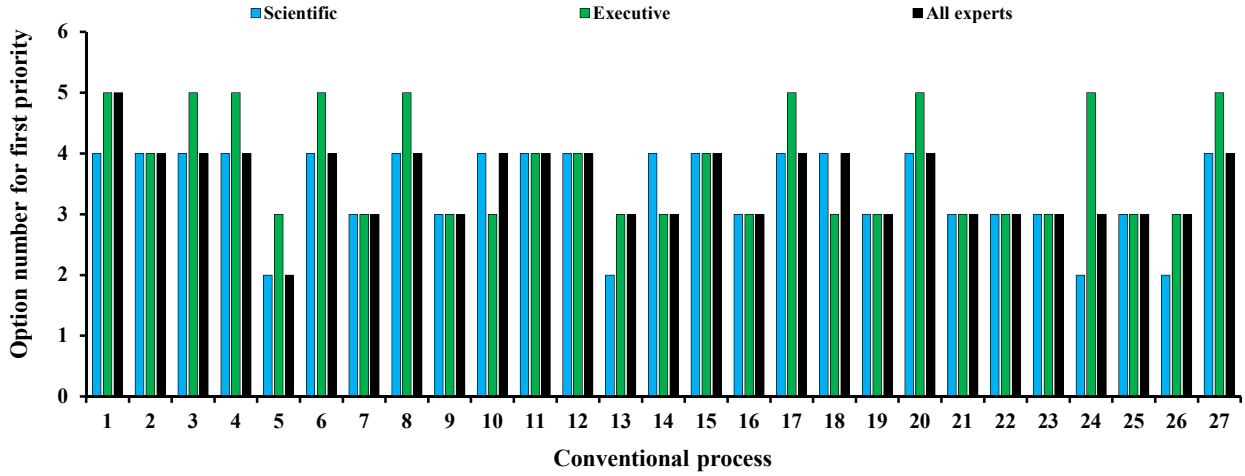

Fig. 4. First priority No. of the traditional biological wastewater treatment options according to 27 Taguchi combinations

شکل ۴- شماره گزینه‌های اولویت اول تصفیه مرسوم بیولوژیکی به تفکیک ۲۷ حالت تاگوچی

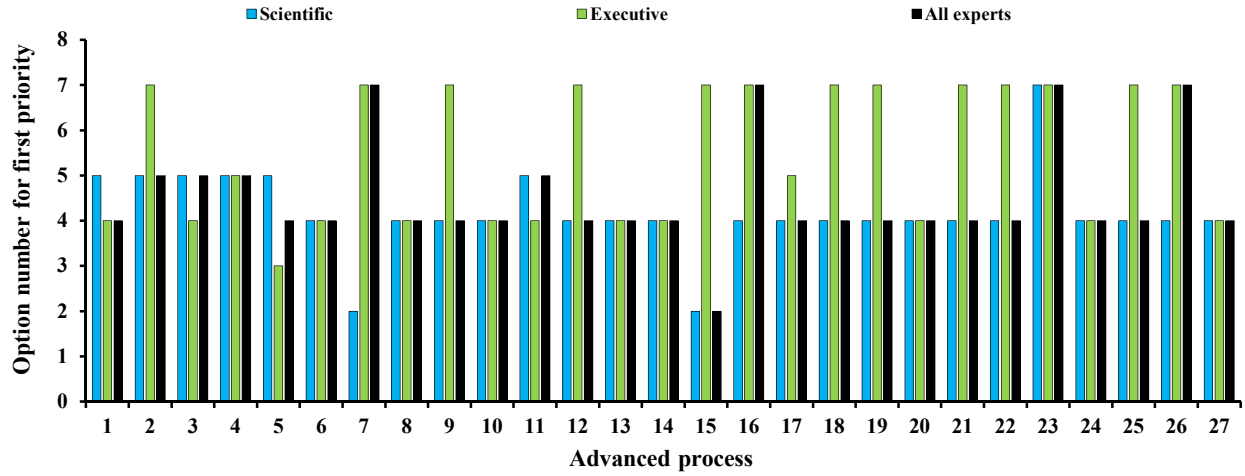

Fig. 5. First priority No. of the advanced biological wastewater treatment options according to 27 Taguchi combinations

شکل ۵- شماره گزینه‌های اولویت اول تصفیه پیشرفته بیولوژیکی به تفکیک ۲۷ حالت تاگوچی

برای مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش برای تعیین گزینه با اولویت بالا، از نتایج پژوهش ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ استفاده شد. در پژوهش آنها یک چارچوب تصمیم‌گیری روش بهینه در مناطق روستایی شیان در بازه‌های زمانی متوالی پیشنهاد شد. در نهایت، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روش پیشرفته راکتور ناپیوسته متوالی به‌عنوان گزینه تصفیه فاضلاب بهینه برای روستای شیان تعیین شد (Zhang et al., 2020).

پیاده‌سازی الگوی به کار رفته در پژوهش‌های انجام شده برای مناطق روستایی شیان با ۱۳ زیرمعیار بررسی شده در این پژوهش نشان داد که به ترتیب بر اساس دیدگاه علمی، اجرایی و کلی (همه کارشناسان) به ترتیب گزینه‌های راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، تالاب مصنوعی در ترکیب با راکتور بافل‌دار بی‌هوازی و راکتور ناپیوسته متوالی از بین گزینه‌های پیشرفته اولویت اول را کسب کردند (Zhang et al., 2020). این موضوع نشان می‌دهد که نتایج کلی با نظرات پژوهش ژنگ و همکاران تطابق دارد.

در پژوهش سالامیراد و همکاران، از بین ۷ گزینه تصفیه

بیولوژیکی مرسوم و پیشرفته شامل: ۱) لاگون هوادهی، ۲) لجن فعال مرسوم، ۳) فیلتر چکنده با نرخ بالا، ۴) حوضچه‌های اکسیداسیون اختیاری، ۵) لجن فعال با مدیای فیلم ثابت، ۶) هاضم بی‌هوازی و ۷) راکتور بافل‌دار بی‌هوازی، اولویت اول و آخر به ترتیب به لجن فعال با مدیای فیلم ثابت و حوضچه‌های اکسیداسیون اختیاری اختصاص یافته است (Salamirad et al., 2023). نوع گزینه انتخابی قطعا درپژوهش‌های مختلف متفاوت بوده و لزوما یکسان نیست.

در پژوهشی دیگر از موسوی و همکاران در سال ۱۳۹۸، انتخاب بهترین روش تصفیه فاضلاب برای مناطق روستایی در شهرستان میبد یزد بررسی شد. در این پژوهش، روش مرسوم تالاب مصنوعی با وزن ۰/۳۷ به عنوان بهترین گزینه برای تصفیه فاضلاب روستایی معرفی شده و روش‌های طبیعی، هوادهی گسترده پیش‌ساخته و هوادهی گسترده بتنی به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۷۶، ۰/۱۷۹ و ۰/۱۷۵ در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. طبق الگوریتم به کار رفته در این پژوهش، بر اساس دیدگاه علمی گزینه تالاب مصنوعی، بر اساس دیدگاه اجرایی، گزینه صافی چکنده و بر اساس نتایج کلی، گزینه روش‌های ساده طبیعی بیشترین امتیاز را به خود اختصاص دادند که در برخی موارد با نتایج موسوی و همکاران در تطابق و با برخی متفاوت است (Moosavi et al., 2019).

همچنین در پژوهشی دیگر، حیدری و همکاران در سال ۱۳۹۵ در مورد انتخاب گزینه مناسب تصفیه فاضلاب در مناطق روستایی به مقایسه روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب پرداختند. این پژوهش در روستای سلیمانی از توابع شهرستان فیروزه در استان خراسان رضوی برای تعیین گزینه برتر انجام شد. در این راستا و پس از در نظر گرفتن عوامل مؤثر، فرایندها اولویت‌بندی شدند. در این پژوهش، نتایج وزن‌دهی در روش‌های تالاب مصنوعی افقی، دیسک‌های بیولوژیکی چرخان، هوادهی گسترده و لجن فعال به‌ترتیب ۰/۳۶، ۰/۲۸، ۰/۲ و ۰/۱۵ به‌دست آمد. طبق الگوریتم به‌دست آمده در این پژوهش، بر اساس دیدگاه علمی گزینه تالاب مصنوعی، بر اساس دیدگاه اجرایی گزینه لاگون هوادهی و بر اساس نتایج کلی، گزینه لجن فعال هوادهی گسترده از بین گزینه‌های مرسوم اولویت اول را کسب کردند که در برخی موارد با نتایج حیدری و همکاران در تطابق و در برخی موارد متفاوت است (Heidari et al., 2016).

در پژوهش دیگری که نتایج آن در سال ۲۰۲۲ توسط عتتری و همکاران به چاپ رسید، از دو روش FMOORA[1] و FTOPSIS[2]، برای اولویت‌بندی روش‌های تصفیه فاضلاب استفاده و چهار معیار شامل پایداری محیط‌زیستی با ۶ زیرمعیار، صرفه اقتصادی با ۴ زیرمعیار، پذیرش اجتماعی با ۳ زیرمعیار و جنبه‌های عملکردی با ۵ زیرمعیار، مدنظر قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی است که ۶ گزینه تصفیه شامل لجن فعال، MBBR، SBR، MBR، FAB[3] و Biopipe که در برخی موارد نیز در این پژوهش مدنظر قرار گرفته، در هر دو حالت FMOORA و FTOPSIS اولویت‌بندی یکسانی داشته و اولویت اول، به گزینه Biopipe اختصاص یافته است. به نظر می‌رسد که روش تلفیقی ارائه شده در این پژوهش، نتایج واقع بینانه‌تری ارائه می‌کند که مهم‌ترین دلیل آن، لحاظ زیرمعیارهای مختلفی است که برای هر منطقه‌ای قابل استفاده است (Attri et al, 2022).

علاوه بر نتایج فوق، نتایج حاصل از سهم اثر ناشی از تحلیل واریانس[4] برای زیرمعیارهای ۱۳ گانه برای اولویت اول گزینه‌های مرسوم و پیشرفته به تفکیک در جدول ۵ آمده است. از ردیف آخر این جدول به خوبی مشخص است که سهم خطا/ سایر عوامل در دو حالت یاد شده ناچیز است. این موضوع حاکی از خطای ناچیز در تحلیل داده‌ها و وزن‌های تعیین شده است. همچنین مشخص است که وزن زیرمعیارها در انتخاب گزینه‌های مرسوم و پیشرفته متفاوت بوده که به نظر منطقی می‌رسد.

برای مثال، در صورت وجود محدودیت در تأمین تجهیزات پیچیده (زیرگزینه ۳)، انتظار می‌رود که این زیرمعیار، اثرات بیشتری در انتخاب گزینه‌های پیشرفته داشته باشد و این در حالی است که در انتخاب گزینه‌های مرسوم، سهم اثر کمتری از آن انتظار می‌رود که چنین است (سهم اثر ۴/۵۵ درصدی گزینه مرسوم در قیاس با ۱۳/۸ درصدی گزینه پیشرفته). هر چند این موضوع نیاز به بررسی بیشتری در پژوهش‌های آینده دارد، اما در صورت تأیید، جداسازی گزینه‌ها در دو دسته مرسوم و پیشرفته را توجیه می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که نتایج پژوهش‌هایی از جمله پژوهش

[1] Fuzzy Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis (FMOORA)
[2] Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS)
[3] Fluidized Aerobic Bed Reactor (FAB)
[4] Analysis of Variance (ANOVA)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367693.3299

جدول ۵- سهم اثر هریک از زیرمعیارها در اولویت اول گزینه‌های مرسوم و پیشرفته تصفیه بیولوژیکی فاضلاب بر اساس تحلیل ANOVA (درصد)

Table 5. The contribution of the sub-criteria effect in the first option of traditional and advanced biological wastewater treatment based on ANOVA analysis (Percent)

Option No. / Sub- criteria No.	Conventional process	Advanced process
1	9.28	11.93
2	4.22	0.74
3	4.55	13.80
4	6.77	7.67
5	3.18	2.89
6	2.89	6.82
7	16.76	3.78
8	10.19	1.39
9	11.96	8.51
10	1.10	26.62
11	19.16	0.06
12	1.92	0.34
13	6.75	9.30
Error/Others	1.28	6.14
Sum	100	100

سالامیراد و همکاران (Salamirad et al., 2023) و نیز عتتری و همکاران (Attri et al., 2022) که مجموعه‌ای از گزینه‌های مرسوم و پیشرفته را در یک گروه، اولویت‌بندی کردند، می‌تواند در صورت مجزا کردن در دو گروه، نتایج متفاوتی ایجاد کند که همچنان که اشاره شد، به بررسی بیشتری نیاز دارد.

۳-۱- نتایج مطالعه موردی

با توجه به نتایج این پژوهش، اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب برای تصفیه فاضلاب روستای آهار در استان تهران به عنوان یکی از مطالعات موردی انجام شده، مدنظر قرار گرفت تا مشخص شود که آیا خروجی الگوی ارائه شده در این پژوهش بر واقعیت و نیز نظر کارشناسی منطبق است یا خیر؟ نتایج خروجی از نرم‌افزار بر اساس زیرمعیارهای این منطقه نشان داد که در اولویت اول، همه کارشناسان روش تالاب مصنوعی را برای روش‌های مرسوم و راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک را برای روش‌های پیشرفته پیشنهاد داده‌اند. همچنین در دیدگاه علمی، روش‌های لجن فعال هوادهی گسترده و ترکیب تالاب مصنوعی و راکتور بافل‌دار بی‌هوازی و در دیدگاه اجرایی، روش‌های تالاب مصنوعی و A^2O در اولویت قرار گرفتند (به‌ترتیب روش‌های مرسوم و پیشرفته). شرکت مهندسین مشاور این تصفیه‌خانه، روش A^2O را برای تصفیه‌خانه آهار در نظر گرفت که یک روش پیشرفته است و فقط با این نتایج از دیدگاه اجرایی در تطابق است.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج حاصل از ماتریس مقایسات زوجی گزینه‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب نشان داد که به دلیل ویژگی‌های متنوع موجود در هر منطقه، انتخاب روش تصفیه بیولوژیکی با لحاظ همه عوامل تأثیرگذار، کار مشکلی است. همچنین، پیدا کردن اولویت هر کدام از این عوامل نسبت به هم، یکی از دغدغه‌های موجود است. بررسی‌ها نشان داد که برای انتخاب روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب، بهتر است چهار معیار در نظر گرفته شود. این معیارها شامل: معیار ۱) اقتصادی، ۲) فنی و اجرایی، ۳) محیط‌زیستی و ۴) مدیریتی و اجتماعی بودند که هر کدام به زیرمعیارهایی تقسیم شدند. در نهایت و با استفاده از معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌های

تعیین شده، به بررسی اولویت هر کدام و وزن‌بندی آنها پرداخته شد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی و تاگوچی، الگوی موفقی برای تعیین روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب است. البته در این پژوهش، بیشتر ارائه الگو مدنظر بود و برای دستیابی به نتایج با قابلیت اطمینان بالا، باید با حضور تعداد زیادی از متخصصان باتجربه در این امر، پرسش‌نامه‌ها تکمیل می‌شد. به این دلیل انتظار می‌رود که نتایج بیش از پیش قابل اطمینان باشد.

۵- قدردانی

این پژوهش با توجه به نیاز تحقیقاتی شرکت آب و فاضلاب استان همدان و حمایت مالی این شرکت ذیل قرارداد پژوهشی به شماره ۱۰۰۱۰۲۱۹۵۷ با دانشگاه اصفهان، تهیه شد که به این وسیله، از این شرکت قدردانی می‌شود.

References

Amin, M. M., Hashemi, H., Ebrahimi, A., Bina, B., Movahhedian Attar, H., Jaberi, A., et al. 2011. Using combined processes of filtration and ultraviolet irradiation for effluent disinfection of Isfahan North wastewater treatment plant in pilot scale. *Journal of Water and Wastewater*, 22(2), 71-77. (In Persian)

Ataee, M. 2016. *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making.* Shahroud University of Technology. Iran. (In Persian)

Attri, S. D., Singh, S., Dhar, A. & Powar, S. 2022. Multi-attribute sustainability assessment of wastewater treatment technologies using combined fuzzy multi-criteria decision-making techniques. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131849. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131849.

Heidari, B., Mehdi Nejad, M. H., Najafpour, A. A., Zafarzadeh, A. & Elahi, H. 2016. A study on application of analytic hierarchy process in selecting the most appropriate wastewater treatment for rural areas (case study Soleimani Village-Firoozeh). *Journal of Research in Environmental Health*, 2(1), 29-37. (In Persian). https://doi.org/10.22038/jreh.2016.7088.

Izadpanah, M. & Sarrafzadeh, M. H. 2020. Investigating the potential of swimming pools sullage reuse for landscape irrigation, case study: Tehran city. *Jouranl of Water and Wastewater,* 31(1), 99-110. (In Persian). https://doi.org/10.22093/wwj.2019.118532.2624.

Kalbar, P. P., Karmakar, S. & Asolekar, S. R. 2012. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. *Technology in Society,* 34(4), 295-302. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2012.10.001.

Khazaeai, S., Raeini Sarjaz, M., Davari, K. & Shafiei, M. 2019. Introducing the water accounting plus (WA+) framework. *Journal of Water and Sustainable Development,* 5, 117-128. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i1.67068.

Molinos-Senante, M., Gómez, T., Caballero, R. & Hernández-Sancho, F. 2015. Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: an analytic network process approach. *Science of the Total Environment,* 532, 676-687. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.059.

Moosavi, H., Amrolahi, M. & Eslami, H. 2019. Application of hierarchical analysis process to select the best wastewater treatment method for rural areas of Meibod Yazd city in 2017: a descriptive study. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 18, 783-796. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.17353165.1398.18.8.5.5.

Razmkhah, N., Nabi, G. & Azimi, A. 2007. Investigating the prioritization of villages in the country in terms of

their need for sewage treatment systems. *Journal of Environmental Science and Technology,* 9(3)**,** 53-60. (In Persian)

Salamirad, A., Kheybari, S., Ishizaka, A. & Farazmand, H. 2023. Wastewater treatment technology selection using a hybrid multicriteria decision-making method. *International Transactions in Operational Research*, 30(3)**,** 1479-1504. https://doi.org/10.1111/itor.12979.

Satty, T. 2001. *Decision Making For Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. RWS Publications. USA.

Wei, C., Wei, J., Kong, Q., Fan, D., Qiu, G., Feng, C., et al. 2020. Selection of optimum biological treatment for coking wastewater using analytic hierarchy process. *Science of the Total Environment*, 742**,** 140400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140400.

Zebardast, A. 2001. Application of hierarchical analysis process in urban and regional sub-program. *Honar Haye Ziba,* 10**,** 13-21. (In Persian)

Zeng, G., Jiang, R. & Haung, G. 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management*, 82(2)**,** 250-259. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.024.

Zhang, F., Ju, Y., Dong, P. & Wang, A. 2020. Multi-period evaluation and selection of rural wastewater treatment technologies: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(36)**,** 45897-45910. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10307-z.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License