محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۰، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۳، صفحهٔ ۷۹۹-۷۸۷

انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور به روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

حسین نایب*[۱]، علی ترابیان[۲]، ناصر مهردادی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست- آب و فاضلاب، دانشکدهٔ محیط‌زیست دانشگاه تهران

۲. استادگروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ محیط‌زیست، دانشگاه تهران atorabi@ut.ac.ir

۳. استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ محیط‌زیست، دانشگاه تهران mehrdadi1@yahoo.com

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۹/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵

چکیده

با توسعهٔ روزافزون جوامع شهری و افزایش جمعیت شهرها و در نتیجه افزایش نیاز آبی، میزان تولید فاضلاب شهری رشد چشمگیری داشته است. از طرفی، افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات آلودگی آب در سال‌های اخیر، تصویب قوانین جدید و سختگیرانهٔ زیست‌محیطی در خصوص تخلیهٔ پساب را در پی داشته که این موضوع سبب افزایش سرعت ساخت و نصب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در کشور شده است. اولین و مهم‌ترین گام در احداث تصفیه‌خانهٔ فاضلاب، انتخاب فرایندی است که علاوه بر داشتن صرفهٔ اقتصادی و کارایی مناسب، با شرایط محیطی و اقلیمی منطقهٔ موردنظر همخوانی داشته باشد. به همین علت در این تحقیق با تقسیم‌بندی اقلیمی ایران به نواحی پنج‌گانه (کوهستانی، خزری، مدیترانه‌ای، نیمه‌بیابانی و بیابانی) و با نظرسنجی از کارشناسان خبرهٔ مقیم در هر اقلیم و استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP بر اساس معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی به انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری از میان چهار روش لجن فعال، لاگون هوادهی، برکهٔ تثبیت و صافی چکنده، در هر یک از اقلیم‌های کشور پرداخته‌ایم. بر اساس نتایج این تحقیق در سه اقلیم کوهستانی، خزری و مدیترانه‌ای کشور فرایند لجن فعال با کسب اوزان ۰/۳۴۷، ۰/۳۴۰ و ۰/۳۳۴ و در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی و بیابانی فرایند برکهٔ تثبیت با اختلاف ناچیز و کسب اوزان ۰/۲۷۶ و ۰/۲۹۲، فرایندهای بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری شناخته شدند. همچنین، بر اساس نتایج هر پنج اقلیم کشور، معیار زیست‌محیطی دارای بیشترین اهمیت بوده است و در پنج اقلیم دیگر به جز اقلیم بیابانی، پس از معیار زیست‌محیطی، معیارهای فنی و اقتصادی در اولویت‌های بعدی اهمیت قرار داشته‌اند.

کلیدواژه

انتخاب فرایند بهینه، تصفیهٔ فاضلاب شهری، تحلیل سلسله‌مراتبی.

۱. سرآغاز

با توسعهٔ روزافزون جوامع شهری و افزایش جمعیت شهرها و در نتیجه افزایش نیاز آبی، میزان تولید فاضلاب شهری رشد چشمگیری داشته است. از طرفی، افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات آلودگی آب، تصویب قوانین جدید و سختگیرانهٔ زیست‌محیطی را در خصوص تخلیهٔ پساب در پی داشته که این موضوع سبب افزایش سرعت ساخت و نصب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری شده است (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۷۹ و Guangming, 2007). در حال حاضر تولید حجم زیاد

* نویسنده مسئول: تلفن تماس: ۰۲۶۳۲۲۱۶۹۰۱ Email: pirnia.nayeb@gmail.com

فاضلاب خانگی و تخلیهٔ کنترل‌نشدهٔ آن به منابع آب پذیرنده و زیرزمینی، مشکلات جدی و قابل طرحی را پیش‌روی برنامه‌ریزان کشور گذاشته است. به طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ حدود ۸۰۰ تصفیه‌خانهٔ شهری در کشور به وجود می‌آید که سرمایه‌گذاری مالی و انسانی عظیمی را در بر خواهد داشت. این سرمایه‌گذاری ایجاب می‌کند که به انتخاب فرایند تصفیه با توجه به معیارهای اقتصادی و مهندسی توجه خاصی مبذول شود (شیرزاد و همکاران، ۱۳۷۸؛ جزایری، ۱۳۸۸). در سال‌های گذشته مطالعات و مدل‌های بهینه‌سازی زیادی برای یافتن بهترین گزینهٔ تصفیهٔ فاضلاب ارائه شده است که اکثر آن‌ها فقط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری توجه کرده‌اند در حالی که همواره بهترین گزینهٔ تصفیه، ارزان‌ترین گزینه نیست (USEPA, 2002 و Tsagarakis et al., 2003). انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری مسئله‌ای مهم و چندبعدی است که به علت خسارات ناشی از گسیختگی طرح نیز اتلاف هزینه‌های آن، جدا از برآورده‌کردن استانداردها و الزامات زیست‌محیطی، نیازمند طی فرایند سیستماتیک و علمی در انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیه است تا در نهایت همراه قابلیت اجرا از لحاظ فنی و اقتصادی کمترین آثار زیست‌محیطی را داشته باشد (Saiedi et al., 2009). در انتخاب گزینهٔ مناسب تصفیه، تعیین فاکتورها و معیارهای تصمیم‌گیری اهمیت فراوانی دارد و به علت آنکه ارتباط بین این معیارها پیچیده است و معمولاً یک معیار در معیار دیگر تأثیر می‌گذارد، ساختن مدل تصمیم و یافتن بهترین گزینه با استفاده از معیارهای مستقل آسان نیست (دباغیان و همکاران، ۱۳۸۸ و Peniwati, 2007). لذا استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] در این خصوص مفید خواهد بود. تاکنون چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند مدل مجموع وزنی[2]، روش TOPSIS[3] و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[4] ارائه شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹). تحلیل سلسله‌مراتبی، روش مفیدی برای کار با اهداف و معیارهای چندگانه در تصمیم‌گیری است که قادر است اهداف مختلف را ارزیابی و تفاوت بین دو گزینه را به وسیلهٔ بردار اولویت مشخص کند (Tsiporkova et al., 2006). هدف نهایی این روش، شناسایی گزینهٔ برتر و تعیین رتبهٔ گزینه‌ها با لحاظ‌کردن هم‌زمان کلیهٔ معیارهای تصمیم‌گیری است (Saaty, 1997).

انتخاب بهترین فرایند برای تصفیهٔ فاضلاب اهمیت بسیاری دارد، اما در این راستا مطالعات کمی با استفاده از تکنولوژی علمی صورت گرفته است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹). در یکی از این مطالعات گانگمینگ و همکاران برای انتخاب بهترین فرایند تصفیهٔ فاضلاب شهری، از روش‌های AHP و GRA[5] به صورت توأمان استفاده کردند. در این مطالعه، چهار گزینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شامل A2/O، نهر اکسیداسیون سه مرحله‌ای، نهر اکسیداسیون بی‌هوازی منفرد و SBR[6] از نظر اقتصادی، فنی و معیارهای مدیریتی، ارزیابی و مقایسه شدند و نهر اکسیداسیون بی‌هوازی منفرد به‌منزلهٔ گزینهٔ بهینهٔ تصفیه انتخاب شد (Guangming, 2007). در مطالعهٔ دباغیان و همکاران انتخاب روش بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب در صنعت آبکاری با استفاده از روش AHP بررسی شده است. در این مطالعه چهار فرایند تصفیه بر اساس معیارهای فنی و کاربردی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی با یکدیگر مقایسه شدند و بهترین گزینهٔ تصفیه انتخاب شد (دباغیان و همکاران، ۱۳۸۸). کریمی و همکاران با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS فرایندهای تصفیهٔ بی‌هوازی در شهرک‌های صنعتی ایران را بررسی کردند. در این مطالعه پنج فرایند تصفیه بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و مدیریتی و زیرمعیارهای مربوطه ارزیابی و گزینهٔ بهینهٔ تصفیه انتخاب شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، فتایی و همکاران با استفاده از روش AHP مناسب‌ترین روش تصفیهٔ فاضلاب شهری در نقاط سردسیر کشور را از میان سه فرایند لجن فعال، لاگون هوادهی و بیولاک بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی انتخاب کردند (فتایی و

همکاران، ۱۳۹۲). در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن همهٔ پارامترهای مؤثر در انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور، پارامترهای مختلف در سه دستهٔ معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین، در این مطالعه علاوه بر انتخاب روش بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف، نتایج با وضعیت موجود فراوانی فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب در اقلیم‌های پنج‌گانهٔ کشور مقایسه شده است.

۲. مواد و روش بررسی

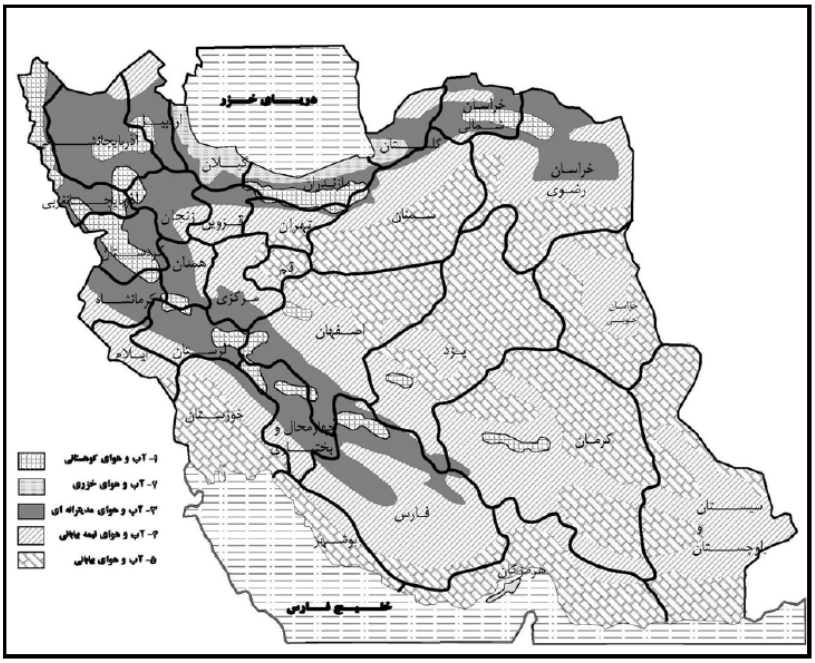
این مطالعه از نوع تحلیلی- توصیفی است که در سال ۱۳۹۲ به منظور انتخاب گزینهٔ بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری و ارزیابی میزان تطبیق فراوانی فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب در اقلیم‌های پنج‌گانهٔ کشور با توجه به نتایج صورت گرفته است. جامعهٔ آماری این تحقیق شامل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در کشور (در حال بهره‌برداری و در دست احداث) بر اساس آخرین آمار منتشرشدهٔ شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور در سال ۱۳۸۹ است.

۲. ۱. تقسیم‌بندی اقلیمی کشور

در انجام هرگونه طرح مطالعاتی، بررسی منطقه و شناخت آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. به عبارت دیگر، هرچه اطلاعات مربوط به شناخت منطقه کامل‌تر و دقیق‌تر تهیه شود، اصول و مبانی طرح مناسب‌تر است و اجرای طرح با مشکلات کمتری مواجه خواهد بود. در این پژوهش، به علت تنوع کم‌نظیر آب و هوایی کشور و به منظور انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب در اقلیم‌های مختلف، بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی در نشریهٔ شمارهٔ ۳-۱۱۷ (بازنگری سال ۱۳۹۲)، کشور به پنج اقلیم کوهستانی، خزری، مدیترانه‌ای، نیمه‌بیابانی و بیابانی تقسیم شده که در شکل ۱ آمده است.

۲. ۲. گزینه‌های تصفیه

با توجه با آمار و اطلاعات، در حال حاضر متداول‌ترین روش‌های تصفیهٔ فاضلاب شهری در کشور شامل چهار فرایند لجن فعال، برکهٔ تثبیت، لاگون هوادهی و فیلتر چکنده است که بیش از ۹۰ درصد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در کشور از یکی از این چهار فرایند بهره می‌برند (شرکت آب و فاضلاب کشور، ۱۳۸۹).

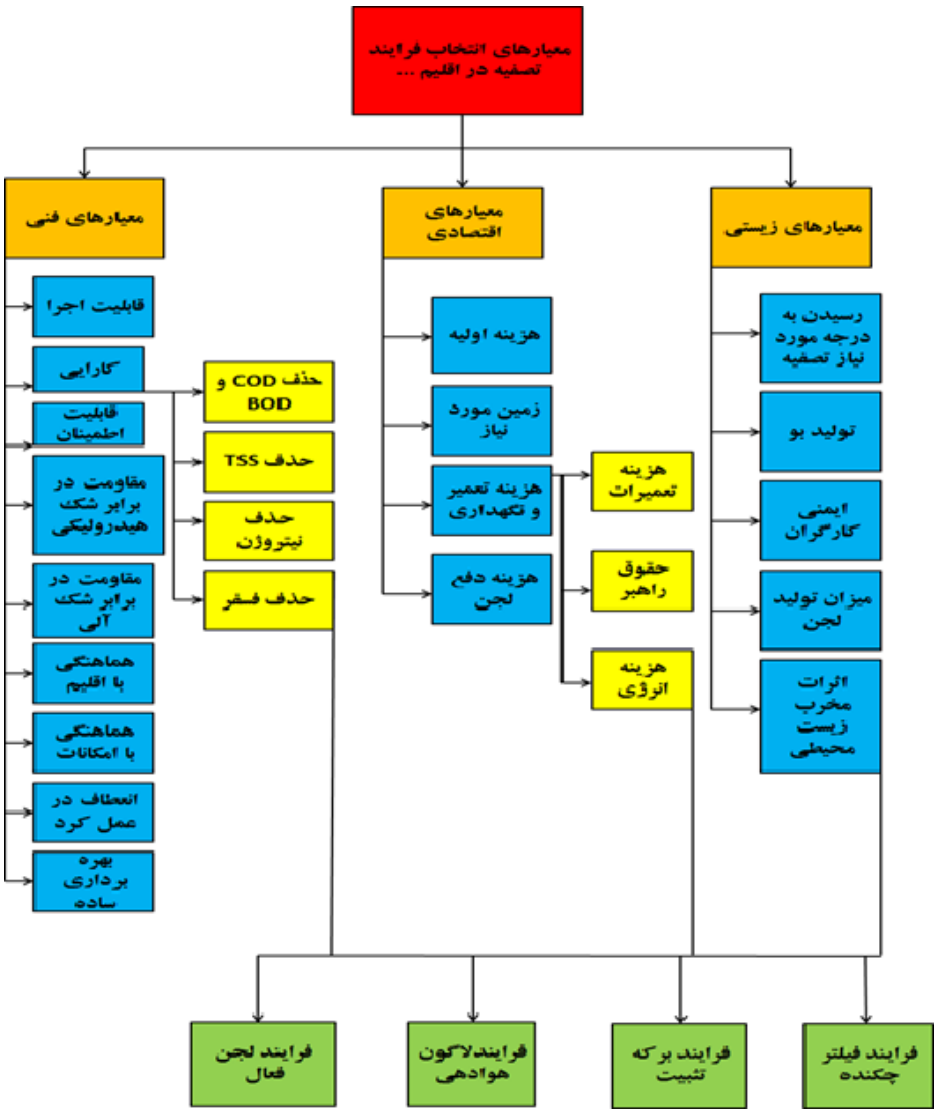


شکل ۱. تقسیم‌بندی اقلیمی ایران (مأخذ: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲)

این مسئله به تنهایی می‌تواند سبب انتخاب این چهار فرایند به‌منزلهٔ گزینه‌های تصفیهٔ مناسب در حوضه‌های عملیاتی مختلف باشد. علاوه بر متداول‌بودن این روش‌ها، دلیل دیگری که سبب انتخاب این فرایندها به‌منزلهٔ گزینه‌های تصفیهٔ مطلوب شده، بومی‌بودن ساخت اکثر تجهیزات و تأسیسات و بخش‌های مورد نیاز این فرایندها و دسترسی به فناوری آن‌ها در کشور است. در شرایط کنونی که کشور تحت تحریم‌های مختلف است دست‌نیافتن به فناوری و تجهیزات فرایند، عملاً استفاده از آن را غیرممکن می‌کند. به همین دلیل فرایندهای مختلف و نوینی که در حال حاضر در کشورهای توسعه‌یافته به‌منزلهٔ فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب شهری به کار گرفته می‌شوند (همچون فرایندهای غشایی) در لیست گزینه‌های انتخاب فرایند مناسب تصفیه قرار نگرفتند.

۳. معیارهای تصمیم‌گیری

بر اساس مطالعات و جمع‌بندی‌های انجام‌شده، معیارهای انتخاب فرایند مناسب تصفیه در هر حوضه در قالب سه معیار زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی تعیین شدند. همچنین، به علت گسترده‌بودن ابعاد هر یک از معیارهای تعریف‌شده، برای هر یک، زیرمعیارهایی برای دستیابی به نتایج بهتر تعریف شد که در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. ساختار سلسله‌مراتبی انتخاب فرایند تصفیه در اقلیم‌های مختلف کشور

۳. ۱. جمع‌آوری داده‌ها و نحوهٔ امتیازدهی به پارامترها

به منظور جمع‌آوری داده‌ها و نظرهای کارشناسان مقیم در هر اقلیم (مجموعاً ۱۵ نفر در هر اقلیم)، از پنج نوع پرسش‌نامه (هر اقلیم یک پرسش‌نامه) استفاده شد که هر یک از این پرسش‌نامه‌ها شامل دو قسمت است که در قسمت اول با استفاده از ۶ ماتریس مقایسهٔ زوجی، اولویت معیارها و زیرمعیارها در اقلیم موردنظر بررسی و در قسمت دوم با استفاده از ۲۳ ماتریس مقایسهٔ زوجی میزان اهمیت گزینه‌های تصفیه نسبت به هر معیار و زیرمعیار در همان اقلیم ارزیابی شده است. پس از جمع‌آوری نظرهای کارشناسان، تیم کارشناسان و استادان خبره اطلاعات به‌دست‌آمده را ارزیابی، اصلاح و تلفیق کردند. همچنین، به منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. نحوهٔ امتیازدهی به پارامترها در ماتریس مقایسهٔ زوجی به این صورت است که پارامترها به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه و طبق جدول ۲ امتیازدهی می‌شوند. در ماتریس مقایسهٔ زوجی (جدول ۱) اگر در مقایسهٔ دو معیار I و J، اهمیت معیار موجود در سطر (I) بیشتر از اهمیت معیار موجود در ستون (J) باشد، میزان اهمیت با عدد صحیح و اگر اهمیت شاخص‌های موجود در ستون (J) بیشتر از شاخص های واقع در سطر (I) باشد، میزان اهمیت با عدد کسری نشان داده می‌شود (مقایسهٔ هر معیار با خودش عدد یک یا اهمیت یکسان را می‌پذیرد). شایان یادآوری است که ماتریس مقایسهٔ زوجی در روش AHP، معکوس است؛ یعنی اگر ترجیح معیار یک به دو، ۳ باشد، ترجیح معیار دو به یک ۱/۳ است.

جدول ۱. ماتریس مقایسهٔ زوجی

	J_1	J_2	J_3
I_1	■		
I_2		■	
I_3			■

جدول ۲. مقیاس ترجیحات بین دو عنصر برای مقایسه‌های زوجی (زنجیرچی، ۱۳۹۰)

ترجیحات (قضاوت شفاهی)		مقدار عددی
کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر	Absolutely More Important	۹
ترجیح یا اهمیّت خیلی قوی	Very Much More Important	۷
ترجیح یا اهمیّت قوی	Much More Important	۵
کمی مرجح یا کمی مهم‌تر	Somewhat More Important	۳
ترجیح یا اهمیّت یکسان	Equal Importance	۱
ترجیحات بین فواصل بالا	Intermediate Values	۲ و ۴ و ۶ و ۸

۳. ۲. تحلیل و مقایسهٔ نتایج به روش تحلیل سلسله‌مراتبی

از آنجا که گام اول در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، تعیین سلسله‌مراتب مقایسه‌هاست (زنجیرچی، ۱۳۹۰)، به منظور تحلیل نتایج در این تحقیق، ابتدا سلسله‌مراتب مقایسه‌ها ساخته شد. در بالاترین بخش این سلسله‌مراتب، هدف تصمیم‌گیری که در این مطالعه انتخاب بهترین فرایند تصفیه در اقلیم مورد نظر بود، قرار داشت. بعد از آن معیارها و زیرمعیارها و در پایین‌ترین بخش گزینه‌ها قرار داشتند (شکل ۲). در گام بعد ماتریس‌های تکمیل‌شده برای معیارهای اصلی و زیرمعیارها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice محاسبه شدند و وزن مربوط به هر یک از معیارها و زیرمعیارها مشخص شد. پس از آن گزینه‌ها با توجه به اطلاعات موجود در خصوص قابلیت هر یک از آن‌ها، به روش دو به دو با یکدیگر مقایسه شدند. سپس، ماتریس حاصل از مقایسهٔ زوجی گزینه‌ها با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ نرمالیزه شد و در نهایت وزن نسبی هر یک از گزینه‌ها با استفاده از رابطهٔ ۳ به دست آمد که در این روابط S مجموع عناصر ستون‌ها، r درایه‌های ماتریس نرمال و W وزن نهایی گزینه‌هاست.

رابطهٔ (۱) $$S_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \qquad i = ۱, ۲, \ldots, \mathrm{n}$$

رابطهٔ (۲) $$r_{ij}^{normal} = \frac{a_{ij}}{s_i}$$

رابطهٔ (۳) $$W_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_{ij}^{normal}}{n}$$

تحلیل سلسله‌مراتبی فرایندی ذهنی است و به جهت بی‌دقتی عددی این روش، امکان بروز خطا در ارزیابی بیشتر از علوم دقیق است. لذا به منظور بررسی میزان خطا، میزان سازگاری در قضاوت‌ها باید سنجیده شود (قدسی‌پور، ۱۳۸۱) و بر اساس تعریف ساعتی سازگاری به صورت زیر تعریف می‌شود (Saaty, 1997):

رابطهٔ (۴) $$\forall i, j, k \qquad a_{ij} * a_{jk} = a_{ik}$$

در صورتی که برای تمامی عناصر، رابطهٔ بالا برقرار باشد، قضاوت‌ها کاملاً سازگارند و با برقرارنشدن رابطهٔ تعدادی از عناصر، قضاوت‌ها به سمت ناسازگاری پیش می‌روند. در حالت کلی می‌توان ثابت کرد که اگر λ_1، λ_2 ... و λ_n مقادیر ویژهٔ ماتریس توافقی باشند، مجموع آن‌ها برابر با n است:

رابطهٔ (۵) $$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = n$$

همچنین، مقادیر ویژه حداکثر ماتریس توافقی نیز همواره بزرگ‌تر یا مساوی n است بنابراین داریم:

رابطهٔ (۶) $$\lambda \max \geq \mathrm{n}$$

در یک ماتریس سازگار، مقادیر ویژهٔ حداکثر ماتریس توافقی برابر با n است. بنابراین، بقیهٔ مقادیر ویژه برابر با صفر به دست می‌آیند. بدین‌ترتیب، اختلاف مقادیر ویژهٔ حداکثر و بعد ماتریس (n) به‌منزلهٔ شاخصی از ناسازگاری مد نظر قرار گرفته است و شاخص ناسازگاری[۷] ماتریس به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۷) $$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max -} \mathrm{n}}{\mathrm{n} - 1}$$

در صورتی که ماتریس کاملاً سازگار باشد، مقدار CI برابر با صفر می‌شود و هرچه انحراف از سازگاری کامل در ماتریس توافقی بیشتر باشد، مقدار آن نیز بیشتر خواهد شد. در صورتی که ماتریسی در بازهٔ مورد قبول سازگاری نداشته باشد، باید دوباره در خصوص قضاوت‌های آن از تصمیم‌گیرنده پرسش شود.

در نهایت با تقسیم مقدار شاخص ناسازگاری (CI) بر شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی (RI)، میزان نرخ ناسازگاری (CR) محاسبه شد (RI عبارت است از شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی که از محاسبهٔ مقادیر شاخص ناسازگاری برای ماتریس‌هایی که اعداد آن‌ها کاملاً تصادفی اختیار شده است محاسبه می‌شود. مقادیر این شاخص براس ماتریس‌های n بعدی مطابق جدول ۳ است).

رابطهٔ (۸) $$CR = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} < 0.1$$

جدول ۳. شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی (Guangming, ۲۰۰۷)

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	.	.	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۵

در این مطالعه در صورتی که نرخ ناسازگاری (CR) کمتر از ۱۰ درصد بود، محاسبات تأیید و در غیر این صورت تحلیل مجدداً انجام می‌شد.

پس از حصول رتبه‌بندی گزینه‌ها و قبل از انتخاب گزینهٔ نهایی، باید تحلیل حساسیت روی مسئله صورت گیرد تا درجهٔ اعتماد نتایج سنجیده شود. تحلیل حساسیت شامل محاسبات مجدد رتبه‌بندی گزینه‌ها با اصلاح وزن هر معیار است. با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice یک تحلیل حساسیت کامل، قابل انجام است. برای انجام این عمل، در حالی که وزن‌های دیگر معیارها ثابت بوده، وزن یک معیار به صورت تدریجی افزایش یا کاهش می‌یابد. بعد از انجام تحلیل حساسیت، رتبه‌بندی گزینه‌ها ممکن است تغییر کند. تحلیل تمام تغییرات ممکن، از طریق نرم‌افزار Expert Choice که دارای مدول تحلیل حساسیت قدرتمند و کاربردوستی است، انجام می‌شود (Aragones-Beltran, et al., 2009).

۴. نتایج

به منظور انتخاب روش بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب در اقلیم‌های پنج‌گانهٔ کشور، در این تحقیق ۴ فرایند تصفیهٔ فاضلاب شهری شامل لجن فعال، لاگون هوادهی، برکهٔ تثبیت و صافی چکنده بر اساس معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی و زیرمعیارهای مربوطه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی ارزیابی شدند. نتایج اقلیم‌های مختلف کشور بر اساس هدف کلی در شکل‌های ۳ تا ۱۳ ارائه شده‌اند. همچنین، اوزان نرمال معیارها و زیرمعیارها در پنج اقلیم کشور در جدول ۴ نشان داده شده است.

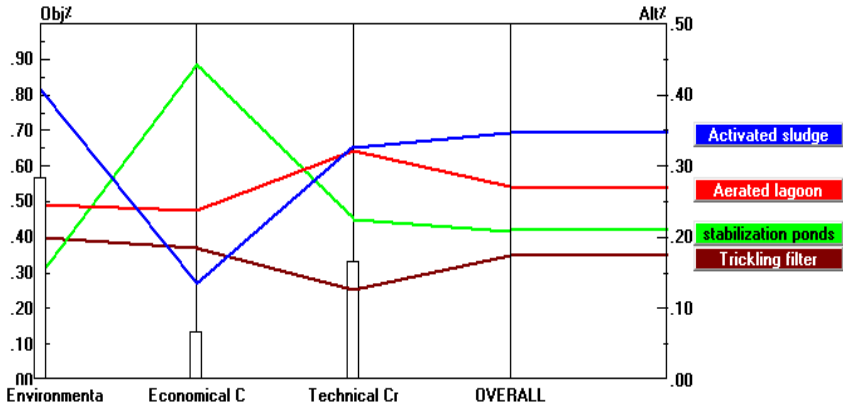
مطابق شکل ۳ و جدول ۴، در اقلیم کوهستانی کشور (تیپ ۱)، فرایندهای لجن فعال، لاگون هوادهی، برکهٔ تثبیت و صافی چکنده به ترتیب اوزان ۰/۳۴۷، ۰/۲۶۹، ۰/۲۰۹ و ۰/۱۷۴ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم، از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۵۵۸ اهمیت بیشتری نسبت به معیارهای دیگر دارد و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۳۲۰ در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفت. بر اساس نتایج این اقلیم، آثار مخرب زیست‌محیطی با به دست آوردن وزن ۰/۳۹۱ به‌منزلهٔ مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شدند. همچنین، هزینهٔ تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۴۲ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۸۰ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجهٔ اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۴ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم کوهستانی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵ و جدول ۴، در اقلیم خزری (تیپ ۲)، فرایندهای لجن فعال، صافی چکنده، لاگون هوادهی و برکهٔ تثبیت به ترتیب اوزان ۰/۳۴۰، ۰/۲۷۳، ۰/۲۰۴ و ۰/۱۸۳ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۶۸۳ نسبت به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۲۰۰ در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، آثار مخرب زیست‌محیطی با به دست آوردن وزن ۰/۳۹۹ به‌منزلهٔ مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شدند. همچنین، هزینهٔ تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۱۹ و قابلیت اجرا با وزن ۰/۲۲۶ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجهٔ اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۶ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم خزری را نشان می‌دهد.

جدول ۴. وزن نرمال معیارها و زیرمعیارها در اقلیم‌های پنج‌گانهٔ کشور

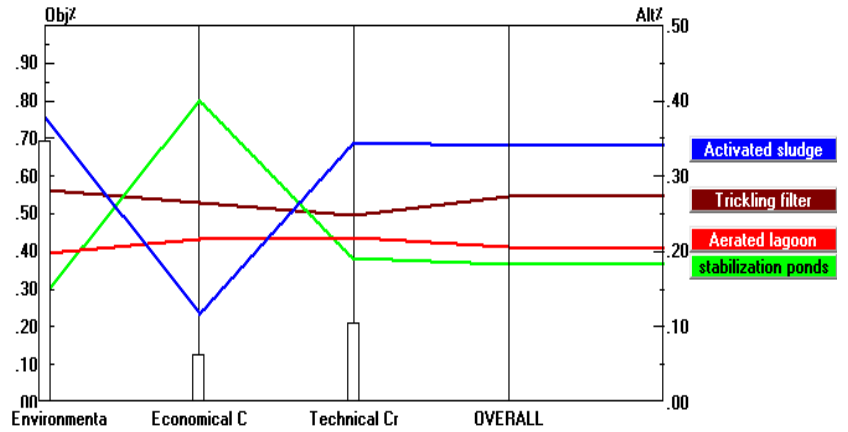
معیارها	کوهستانی (تیپ ۱)	خزری (تیپ۲)	مدیترانه‌ای (تیپ ۳)	نیمه‌بیابانی (تیپ ۴)	بیابانی (تیپ ۵)
زیست‌محیطی (C_1)	۰/۵۵۸	۰/۶۸۳	۰/۵۴۰	۰/۴۹۳	۰/۴۹۳
رسیدن به درجهٔ مورد نیاز تصفیه (I_1)	۰/۲۵۶	۰/۲۵۰	۰/۳۵۹	۰/۳۵۶	۰/۳۵۹
تولید بو (I_2)	۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۰۸۵	۰/۱۱۱	۰/۱۲۱
ایمنی کارگران (I_3)	۰/۱۸۳	۰/۱۸۹	۰/۱۷۲	۰/۱۸۶	۰/۱۹۰
میزان تولید لجن (I_4)	۰/۰۷۰	۰/۰۹۱	۰/۱۱۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹
آثار مخرب زیست‌محیطی (I_5)	۰/۳۹۱	۰/۳۹۹	۰/۲۷۱	۰/۲۶۹	۰/۲۵۱
اقتصادی (C_2)	۰/۱۲۲	۰/۱۱۷	۰/۱۶۳	۰/۱۹۶	۰/۳۱۱
هزینهٔ اولیه (I_6)	۰/۱۵۹	۰/۱۵۸	۰/۱۴۱	۰/۱۵۴	۰/۲۱۱
زمین مورد نیاز (I_7)	۰/۰۸۵	۰/۱۱۲	۰/۲۰۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۱
هزینهٔ تعمیر و نگهداری (I_8)	۰/۵۴۲	۰/۵۱۹	۰/۴۸۵	۰/۵۶۹	۰/۵۷۵
هزینهٔ تعمیرات (I_{81})	۰/۵۵۸	۰/۲۹۷	۰/۵۲۸	۰/۵۶۹	۰/۵۲۸
حقوق راهبر (I_{82})	۰/۱۲۲	۰/۱۶۳	۰/۱۴۰	۰/۱۰۹	۰/۱۴۰
هزینهٔ انرژی (I_{83})	۰/۳۲۰	۰/۵۴۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۱	۰/۳۳۳
هزینهٔ دفع لجن (I_9)	۰/۲۱۳	۰/۲۱۱	۰/۱۷۱	۰/۱۹۴	۰/۱۳۳
فنی (C_3)	۰/۳۲۰	۰/۲۰۰	۰/۲۹۷	۰/۳۱۱	۰/۱۹۶
قابلیت اجرا (I_{10})	۰/۱۱۹	۰/۲۲۶	۰/۱۶۲	۰/۱۴۴	۰/۱۸۶
کارایی (I_{11})	۰/۱۱۹	۰/۰۹۷	۰/۱۶۱	۰/۰۷۶	۰/۰۹۷
حذف BOD و COD (I_{111})	۰/۴۲۸	۰/۴۸۱	۰/۵۳۴	۰/۵۰۲	۰/۴۱۸
حذف TSS (I_{112})	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۱۰۲	۰/۰۸۴	۰/۱۲۰
حذف نیتروژن (I_{113})	۰/۲۰۰	۰/۱۷۰	۰/۱۴۵	۰/۱۷۲	۰/۱۹۱
حذف فسفر (I_{114})	۰/۲۸۴	۰/۲۶۲	۰/۲۱۸	۰/۲۴۲	۰/۲۷۱
قابلیت اطمینان (I_{12})	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۹۹	۰/۱۸۷	۰/۱۱۷
مقاومت در برابر شک هیدرولیکی (I_{13})	۰/۰۷۰	۰/۱۱۱	۰/۰۵۶	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵
مقاومت در برابر شک آلی (I_{14})	۰/۰۶۳	۰/۰۵۴	۰/۰۴۴	۰/۰۶۶	۰/۰۸۲
هماهنگی با اقلیم (I_{15})	۰/۱۷۱	۰/۱۴۰	۰/۱۰۱	۰/۱۴۶	۰/۱۱۲
هماهنگی با امکانات (I_{16})	۰/۱۶۷	۰/۱۰۳	۰/۱۳۳	۰/۱۷۴	۰/۱۶۴
انعطاف در عملکرد (I_{17})	۰/۰۴۰	۰/۰۳۹	۰/۰۷۷	۰/۰۵۱	۰/۰۵۳
بهره‌برداری ساده (I_{18})	۰/۰۶۹	۰/۰۵۰	۰/۰۶۶	۰/۱۱۶	۰/۱۴۳

شکل ۳. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی اقلیم تیپ ۱



شکل ۴. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۱

شکل ۵. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۲



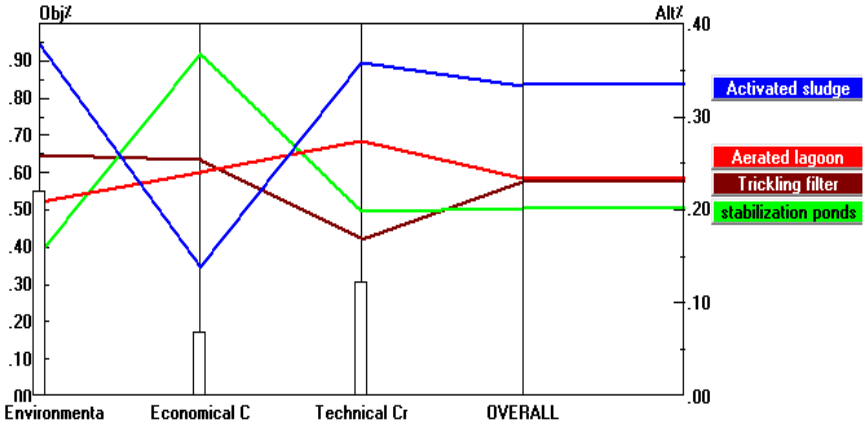
شکل ۶. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۲

مطابق شکل ۷ و جدول ۴، در اقلیم مدیترانه‌ای (تیپ ۳)، فرایندهای لجن فعال، لاگون هوادهی، صافی چکنده و برکهٔ تثبیت به ترتیب اوزان ۰/۳۳۴، ۰/۲۳۴، ۰/۲۳۱ و ۰/۲۰۱ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۵۴۰ نسبت به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۲۹۷ در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجهٔ مورد نیاز تصفیه با به دست آوردن وزن ۰/۳۵۹ به‌منزلهٔ مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینهٔ تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۴۸۵ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۹۹ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجهٔ اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۸ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم مدیترانه‌ای را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۹ و جدول ۴، در اقلیم نیمه‌بیابانی (تیپ ۴)، فرایندهای برکهٔ تثبیت، لجن فعال، صافی چکنده و لاگون هوادهی به ترتیب اوزان ۰/۲۷۶، ۰/۲۷۳، ۰/۲۷۰ و ۰/۱۸۱ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۴۹۳ نسبت

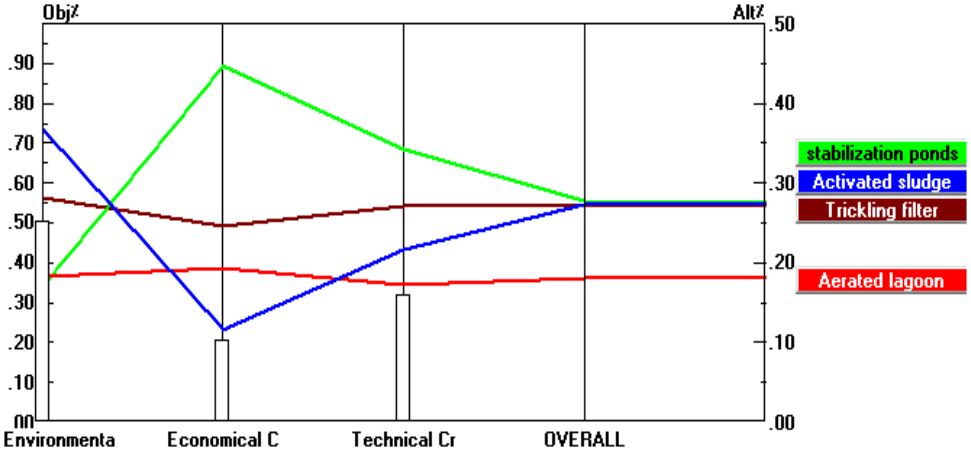
به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۳۱۱ در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجهٔ مورد نیاز تصفیه با به دست آوردن وزن ۰/۳۵۶ به‌منزلهٔ مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینهٔ تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۶۹ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۸۷ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجهٔ اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۱۰ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم نیمه‌بیابانی را نشان می‌دهد.

شکل ۷. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۳



شکل ۸. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۳

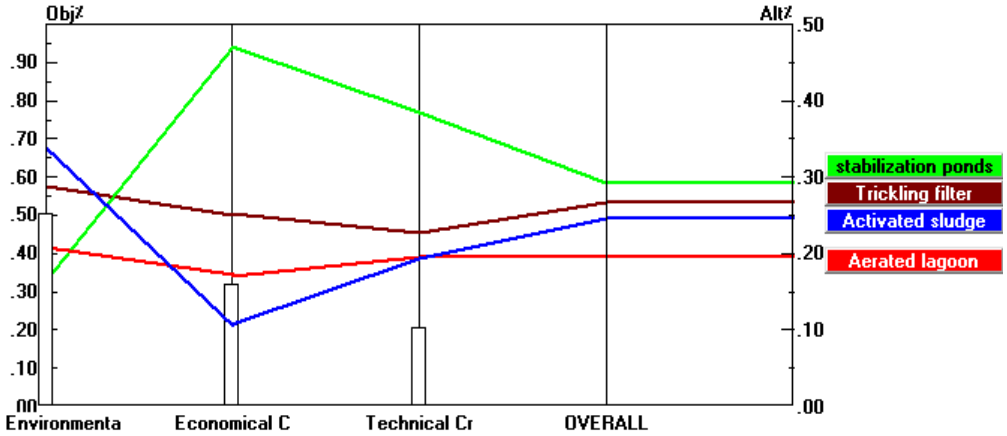
شکل ۹. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۴



شکل ۱۰. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۴

مطابق شکل ۱۱ و جدول ۴، در اقلیم بیابانی (تیپ ۵)، فرایندهای برکهٔ تثبیت، صافی چکنده، لجن فعال و لاگون هوادهی به ترتیب اوزان ۰/۲۹۲، ۰/۲۶۶، ۰/۲۴۷ و ۰/۱۹۵ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۴۹۳ نسبت به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار اقتصادی با وزن ۰/۳۱۱ در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجهٔ مورد نیاز تصفیه با به دست آوردن وزن ۰/۳۵۹ به‌منزلهٔ مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینهٔ تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۷۵ و قابلیت اجرا با وزن ۰/۱۸۶ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجهٔ اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۱۲ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم بیابانی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۵



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۵

۵. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی به منظور انتخاب گزینهٔ بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور معیار زیست‌محیطی در همهٔ اقلیم‌ها به‌منزلهٔ مهم‌ترین معیار شناخته شدند و بالاترین وزن آن در اقلیم خزری (۰/۶۸۳) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی و بیابانی (۰/۴۹۳) است. اهمیت بالای معیار زیست‌محیطی در اقلیم خزری کشور با توجه به شرایط طبیعی منطقهٔ مذکور و عواملی همچون صنعت توریسم، بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌های متعدد و دیگر عوامل وابسته به محیط‌زیست منطقه، قابل توجیه خواهد بود. همچنین، معیار فنی در چهار اقلیم کوهستانی، خزری، مدیترانه‌ای و نیمه‌بیابانی کشور در رتبهٔ دوم اهمیت قرار داشته و بالاترین وزن آن در اقلیم کوهستانی (۰/۳۲۰) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم بیابانی (۰/۱۹۶) است که اهمیت بالای معیار فنی در اقلیم کوهستانی به علت شرایط محیطی حساس و عملکرد ضعیف اکثر فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب در آب و هوای سرد، قابل توجیه خواهد بود. بر اساس نتایج در سه اقلیم کوهستانی، خزری و مدیترانه‌ای

فرایند لجن فعال به‌منزلهٔ مناسب‌ترین گزینهٔ تصفیه معرفی شده که بالاترین وزن این فرایند در اقلیم کوهستانی (۰/۳۴۷) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم بیابانی (۰/۲۴۷) است. همچنین، در دو اقلیم نیمه‌بیابانی و بیابانی کشور فرایند برکهٔ تثبیت به‌منزلهٔ مناسب‌ترین گزینهٔ تصفیه معرفی شده که بالاترین وزن آن در اقلیم بیابانی (۰/۲۹۲) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم خزری (۰/۱۸۳) است. در نهایت بالاترین و پایین‌ترین وزن فرایند لاگون هوادهی به ترتیب در اقلیم‌های کوهستانی (۰/۲۶۹) و نیمه‌بیابانی (۰/۱۸۱) و بالاترین و پایین‌ترین وزن فرایند صافی چکنده به ترتیب در اقلیم‌های خزری (۰/۲۷۳) و کوهستانی (۰/۱۷۴) به دست آمده است. خلاصهٔ نتایج اقلیم‌های مختلف کشور در جدول ۵ ارائه شده است.

در مطالعه‌ای که کریمی در سال ۱۳۸۹ انجام داد، فرایندهای تصفیهٔ بی‌هوازی در شهرک‌های صنعتی ایران با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS فازی با هم مقایسه شدند. در این مطالعه پنج فرایند تصفیهٔ بی‌هوازی شامل UASB، UAFB، UABR، تماس بی‌هوازی و لاگون بی‌هوازی بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و مدیریتی و زیرمعیارهای مربوطه با یکدیگر مقایسه شدند. در این مقایسه معیار فنی بیشترین وزن را به دست آورد و به‌منزلهٔ مؤثرترین پارامتر شناخته شد و فرایند UAFB به علت اینکه از نظر فنی (کارایی، قابلیت اعتماد، قابلیت ارتقای کمی و کیفی) بر فرایندهای دیگر برتری داشته به‌منزلهٔ بهترین فرایند تصفیهٔ فاضلاب‌های صنعتی در ایران انتخاب شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹).

جدول ۵. خلاصهٔ نتایج اقلیم‌های مختلف کشور

نوع اقلیم	وزن نرمال معیارهای اصلی			وزن گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی			
	زیست‌محیطی	اقتصادی	فنی	لجن فعال	لاگون هوادهی	برکهٔ تثبیت	صافی چکنده
کوهستانی (تیپ ۱)	۰/۵۵۸	۰/۱۲۲	۰/۳۲۰	۰/۳۴۷	۰/۲۶۹	۰/۲۰۹	۰/۱۷۴
خزری (تیپ ۲)	۰/۶۸۳	۰/۱۱۷	۰/۲۰۰	۰/۳۴۰	۰/۲۰۴	۰/۱۸۳	۰/۲۷۳
مدیترانه‌ای (تیپ ۳)	۰/۵۴۰	۰/۱۶۳	۰/۲۹۷	۰/۳۳۴	۰/۲۳۴	۰/۲۰۱	۰/۲۳۱
نیمه‌بیابانی (تیپ ۴)	۰/۴۹۳	۰/۱۹۶	۰/۳۱۱	۰/۲۷۳	۰/۱۸۱	۰/۲۷۶	۰/۲۷۰
بیابانی (تیپ ۵)	۰/۴۹۳	۰/۳۱۱	۰/۱۹۶	۰/۲۴۷	۰/۱۹۵	۰/۲۹۲	۰/۲۶۶

در مطالعه‌ای که گانگمینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ انجام دادند، برای انتخاب بهترین فرایند تصفیهٔ فاضلاب شهری از روش‌های AHP و GRA استفاده و فرایندهای تصفیه شامل A^2O، نهر اکسیداسیون سه مرحله‌ای و SBR را از نظر معیارهای فنی، اقتصادی و مدیریتی با یکدیگر مقایسه کردند. در این مطالعه علاوه بر بی‌توجهی به معیار زیست‌محیطی، اهمیت معیار اقتصادی بیش از اندازه بوده، به طوری که اهمیت آن بیش از دو برابر اهمیت معیار فنی است (Guangming, 2007).

یادداشت‌ها

1. Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)
2. Weighted-Sum Model
3. Technique for Order-Preference by Similarity to
4. Analytical Hierarchy Process
5. Grey Relational Analysis
6. Sequencing Batch Reactor
7. Consistency Index

منابع

آمار و ارقام آرشیو شرکت آب و فاضلاب کشور، ۱۳۸۹.

جزایری، ر. ۱۳۸۸. تعیین پارامترهای طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در مناطق سردسیر کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شمارهٔ ۴۴، ص ۹۲- ۱۰۰.

دباغیان، م. هاشمی، ح. ۱۳۸۸. ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی روش‌های تصفیهٔ فاضلاب صنایع آبکاری به روش AHP، علوم تکنولوژی محیط‌زیست، دورهٔ یازدهم، شمارهٔ ۳، ص ۱۰۷- ۱۱۵.

زنجیرچی، م. ۱۳۹۰. فرایند تحلیل سلسه‌مراتبی قطعی- نظریهٔ فازی، چاپ اول، انتشارات صانعی شهمیرزادی، تهران.

سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۷۹. مجموعهٔ قوانین و مقررات حفاظت محیط‌زیست، جلد اول.

شیرزاد، س. تجریشی، م. برقعی، م. ۱۳۷۸. مقایسهٔ اقتصادی روش‌های تصفیهٔ فاضلاب شهری در شرایط اقلیمی ایران، انسان و محیط‌زیست، سال اول، شمارهٔ ۱، ص ۳- ۱۲.

فتایی، ا. ترابیان، ع. حسین‌زاده کلخوران، م. ۱۳۹۲. انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب شهری با استفاده از روش AHP (مطالعهٔ موردی: شهرهای اردبیل، تبریز و ارومیه)، مجلهٔ سلامت و بهداشت، دورهٔ چهارم، شمارهٔ سوم، ص ۲۶۰- ۲۷۲.

قدسی‌پور، ح. ۱۳۸۱. مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.

کریمی، ع. مهردادی، ن. هاشمیان، ج. ۱۳۸۹. انتخاب فرایند بهینهٔ تصفیهٔ فاضلاب با استفاده از روش AHP، آب و فاضلاب، شمارهٔ ۷۶، صص ۲- ۱۲.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی (نشریهٔ ۳- ۱۱۷)، بازنگری اول، ۱۳۹۲.

Aragones-Beltran, P. Mendoza-roca. 2009. Application of Mult-icriteria Decision Analysis to Jar-test Result for Chemicals Selection in the Physical–Chemical Treatment of Textile Wastewater, Hazardous Materials, 164.

Guangming, Z. 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis, Journal of Environmental Management 82 : 250–259

Peniwati, K. 2007. Criteria for evaluating group decision making methods.” Math. Comput. Model, 46 (7-8) 935-947.

Saaty TL. 1997. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Mathematical Psychology. 15(3):234-281.

Saiedi, M. Abesssi, A. Sarpak, M. 2009. Hazardous waste landfill sitting using GIS and prioritize sitesusing AHP, Environmental Science Technology. 11(1)231-241.

Tsagarakis, K. P. Mara, D. D. Angelakis, A. N. 2003. Application of cost criteria for selection of municipal wastewater treatment systems. Water Air Soil Pollut. 142(1-4), 187- 210.

USEPA. 2002. Development document for the proposed effluent limitation guidelines and standards,EPA, Office of Water, EPA, 821-B-01-007.