

# انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور به روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

حسین نایب\*<sup>۱</sup>، علی تراپیان<sup>۲</sup>، ناصر مهردادای<sup>۳</sup>

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

atorabi@ut.ac.ir

۲. استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

mehrdadi1@yahoo.com

۳. استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۹/۲۳

## چکیده

با توسعه 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 سختگیرانه زیست‌محیطی در خصوص تخلیه 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 تصفیه‌خانه فاضلاب، انتخاب فرایندی است که علاوه بر داشتن صرفه اقتصادی و کارایی مناسب، با شرایط محیطی و اقلیمی منطقه 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 خبره مقیم در هر اقلیم و استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP بر اساس معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی به انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری از میان چهار روش لجن فعال، لاگون هوادهی، برکه 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 برکه تثبیت با اختلاف ناچیز و کسب اوزان ۰/۲۷۶ و ۰/۲۹۲، فرایندهای بهینه تصفیه 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، تصفیه فاضلاب شهری، تحلیل سلسله‌مراتبی.

## ۱. سرآغاز

قوانین جدید و سختگیرانه زیست‌محیطی را در خصوص تخلیه 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

با توسعه 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

تصمیم‌گیری است که قادر است اهداف مختلف را ارزیابی و تفاوت بین دو گزینه را به وسیله برادر اولویت مشخص کند (Tsiporkova et al., 2006). هدف نهایی این روش، شناسایی گزینه برتر و تعیین رتبه گزینه‌ها با لحاظ کردن هم‌زمان کلیه معیارهای تصمیم‌گیری است (Saaty, 1997).

انتخاب بهترین فرایند برای تصفیه 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 تصفیه فاضلاب شهری، از روش‌های AHP و GRA<sup>۵</sup> به صورت توأمان استفاده کردند. در این مطالعه، چهار گزینه تصفیه فاضلاب شامل A2/O، نهر اکسیداسیون سه مرحله‌ای، نهر اکسیداسیون بی‌هوازی منفرد و SBR<sup>۶</sup> از نظر اقتصادی، فنی و معیارهای مدیریتی، ارزیابی و مقایسه شدند و نهر اکسیداسیون بی‌هوازی منفرد به‌منزله گزینه بهینه تصفیه انتخاب شد (Guangming, 2007).

در مطالعه دباغیان و همکاران انتخاب روش بهینه تصفیه 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 گزینه تصفیه انتخاب شد (دباغیان و همکاران، ۱۳۸۸). کریمی و همکاران با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS فرایندهای تصفیه بی‌هوازی در شهرک‌های صنعتی ایران را بررسی کردند. در این مطالعه پنج فرایند تصفیه بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، زیست محیطی و مدیریتی و زیرمعیارهای مربوطه ارزیابی و گزینه بهینه تصفیه انتخاب شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، فتایی و همکاران با استفاده از روش AHP مناسب‌ترین روش تصفیه 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

فاضلاب خانگی و تخلیه کنترل‌نشده آن به منابع آب پذیرنده و زیرزمینی، مشکلات جدی و قابل‌طرحی را پیش‌روی برنامه‌ریزان کشور گذاشته است. به طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ حدود ۸۰۰ تصفیه‌خانه 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 گزینه تصفیه فاضلاب ارائه شده است که اکثر آن‌ها فقط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری توجه کرده‌اند در حالی که همواره بهترین گزینه تصفیه، ارزان‌ترین گزینه نیست (USEPA, 2002 و Tsagarakis et al., 2003). انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری مسئله‌ای مهم و چندبعدی است که به علت خسارات ناشی از گسیختگی طرح نیز اتلاف هزینه‌های آن، جدا از برآورده کردن استانداردها و الزامات زیست‌محیطی، نیازمند طی فرایند سیستماتیک و علمی در انتخاب فرایند بهینه 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 گزینه 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<sup>۱</sup> در این خصوص مفید خواهد بود. تاکنون چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند مدل مجموع وزنی<sup>۲</sup>، روش TOPSIS<sup>۳</sup> و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)<sup>۴</sup> ارائه شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹). تحلیل سلسله‌مراتبی، روش مفیدی برای کار با اهداف و معیارهای چندگانه در

## ۱.۲. 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 کم‌ظیر آب و هوایی کشور و به منظور انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب در اقلیم‌های مختلف، بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی در نشریه شماره ۳-۱۱۷ (بازنگری سال ۱۳۹۲)، کشور به پنج اقلیم کوهستانی، خزری، مدیترانه‌ای، نیمه‌بیابانی و بیابانی تقسیم شده که در شکل ۱ آمده است.

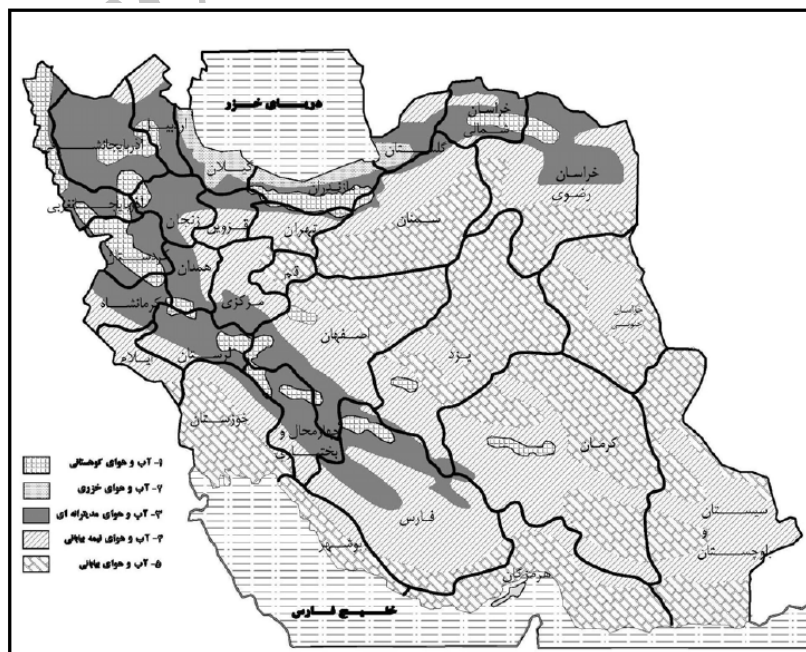
### ۲.۲. گزینه‌های تصفیه

با توجه با آمار و اطلاعات، در حال حاضر متداول‌ترین روش‌های تصفیه فاضلاب شهری در کشور شامل چهار فرایند لجن فعال، برکه 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).

همکاران، (۱۳۹۲). در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن همه پارامترهای مؤثر در انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور، پارامترهای مختلف در سه دسته معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین، در این مطالعه علاوه بر انتخاب روش بهینه تصفیه فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف، نتایج با وضعیت موجود فراوانی فرایندهای تصفیه فاضلاب در اقلیم‌های پنج‌گانه کشور مقایسه شده است.

## ۲. مواد و روش بررسی

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



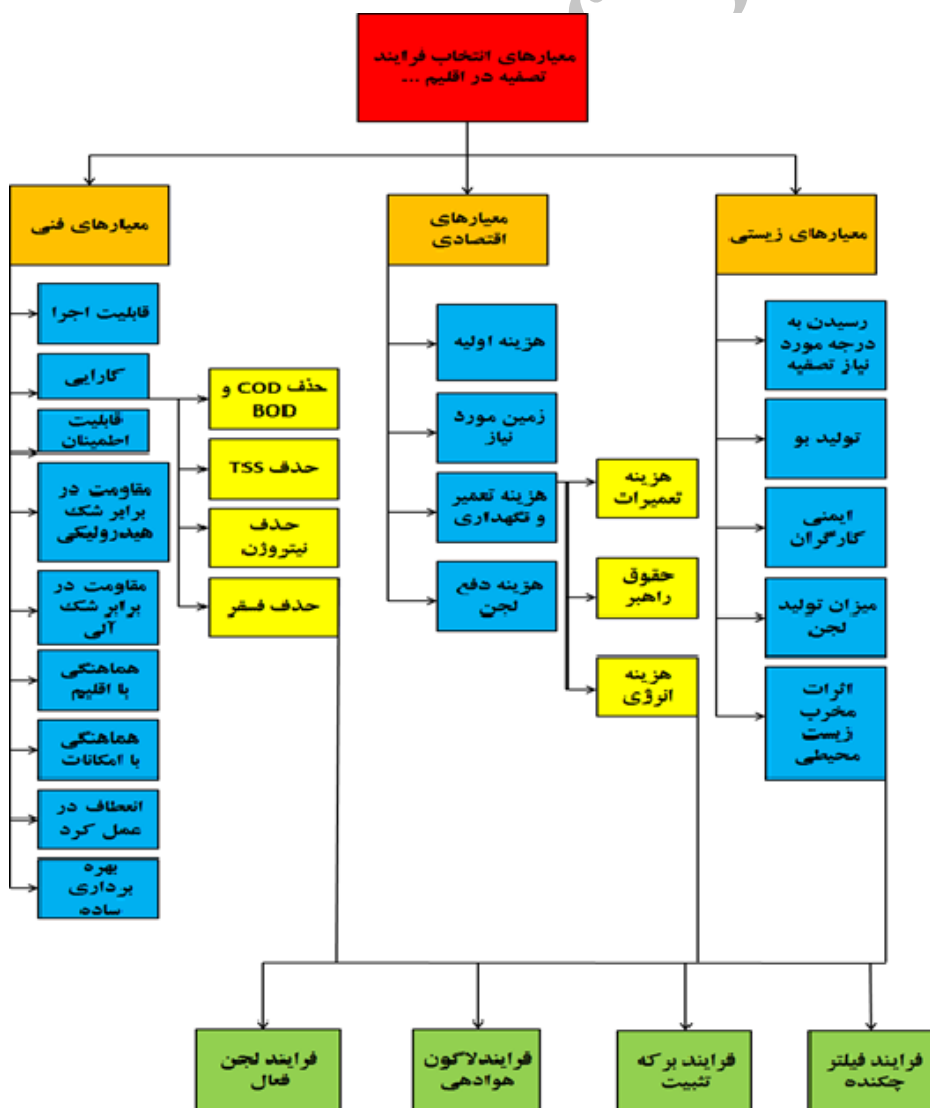
شکل ۱. تقسیم‌بندی اقلیمی ایران (مأخذ: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲)

فرایندهای تصفیه 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.

این مسئله به تنهایی می‌تواند سبب انتخاب این چهار فرایند به‌منزله گزینه‌های تصفیه مناسب در حوضه‌های عملیاتی مختلف باشد. علاوه بر متداول‌بودن این روش‌ها، دلیل دیگری که سبب انتخاب این فرایندها به‌منزله گزینه‌های تصفیه 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 به‌منزله



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

Choice استفاده شد. نحوه امتیازدهی به پارامترها در ماتریس مقایسه زوجی به این صورت است که پارامترها به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه و طبق جدول ۲ امتیازدهی می‌شوند. در ماتریس مقایسه زوجی (جدول ۱) اگر در مقایسه 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 شاخص‌های واقع در سطر (I) باشد، میزان اهمیت با عدد کسری نشان داده می‌شود (مقایسه هر معیار با خودش عدد یک یا اهمیت یکسان را می‌پذیرد). شایان یادآوری است که ماتریس مقایسه زوجی در روش AHP، معکوس است؛ یعنی اگر ترجیح معیار یک به دو، ۳ باشد، ترجیح معیار دو به یک ۱/۳ است.

### ۳.۱. جمع‌آوری داده‌ها و نحوه امتیازدهی به پارامترها

#### 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 مقایسه زوجی، اولویت معیارها و زیرمعیارها در اقلیم موردنظر بررسی و در قسمت دوم با استفاده از ۲۳ ماتریس مقایسه 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

جدول ۱. ماتریس مقایسه زوجی

J <sub>3</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>	
			I <sub>1</sub>
			I <sub>2</sub>
			I <sub>3</sub>

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

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

### ۲.۳. تحلیل و مقایسه نتایج به روش تحلیل سلسله مراتبی

از آنجا که گام اول در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، تعیین سلسله مراتب مقایسه هاست (زنجیرچی، ۱۳۹۰)، به منظور تحلیل نتایج در این تحقیق، ابتدا سلسله مراتب مقایسه ها ساخته شد. در بالاترین بخش این سلسله مراتب، هدف تصمیم گیری که در این مطالعه انتخاب بهترین فرایند تصفیه در اقلیم مورد نظر بود، قرار داشت. بعد از آن معیارها و زیرمعیارها و در پایین ترین بخش گزینه ها قرار داشتند (شکل ۲). در گام بعد ماتریس های تکمیل شده برای معیارهای اصلی و زیرمعیارها با استفاده از نرم افزار Expert Choice محاسبه شدند و وزن مربوط به هر یک از معیارها و زیرمعیارها مشخص شد. پس از آن گزینه ها با توجه به اطلاعات موجود در خصوص قابلیت هر یک از آن ها، به روش دو به دو با یکدیگر مقایسه شدند. سپس، ماتریس حاصل از مقایسه زوجی گزینه ها با استفاده از رابطه های ۱ و ۲ نرمالیزه شد و در نهایت وزن نسبی هر یک از گزینه ها با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد که در این روابط S مجموع عناصر ستون ها، r درایه های ماتریس نرمال و W وزن نهایی گزینه هاست.

$$i = 1, 2, \dots, n \quad S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1) \text{ رابطه}$$

$$r_{ij}^{normal} = \frac{a_{ij}}{S_i} \quad (2) \text{ رابطه}$$

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij}^{normal}}{n} \quad (3) \text{ رابطه}$$

تحلیل سلسله مراتبی فرایندی ذهنی است و به جهت بی دقتی عددی این روش، امکان بروز خطا در ارزیابی بیشتر از علوم دقیق است. لذا به منظور بررسی میزان خطا، میزان سازگاری در قضاوت ها باید سنجیده شود (قدسی پور، ۱۳۸۱) و بر اساس تعریف ساعتی سازگاری به صورت زیر تعریف می شود (Saaty, 1997):

$$\forall i, j, k \quad a_{ij} * a_{jk} = a_{ik} \quad (4) \text{ رابطه}$$

در صورتی که برای تمامی عناصر، رابطه بالا برقرار باشد، قضاوت ها کاملاً سازگارند و با برقراردن رابطه تعدادی از عناصر، قضاوت ها به سمت ناسازگاری پیش می روند. در حالت کلی می توان ثابت کرد که اگر  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  و  $\lambda_n$  مقادیر ویژه ماتریس توافقی باشند، مجموع آن ها برابر با n است:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n \quad (5) \text{ رابطه}$$

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

$$\lambda_{max} \geq n \quad (6) \text{ رابطه}$$

در یک ماتریس سازگار، مقادیر ویژه حداکثر ماتریس توافقی برابر با n است. بنابراین، بقیه مقادیر ویژه برابر با صفر به دست می آیند. بدین ترتیب، اختلاف مقادیر ویژه حداکثر و بعد ماتریس (n) به منزله شاخصی از ناسازگاری مد نظر قرار گرفته است و شاخص ناسازگاری<sup>v</sup> ماتریس به صورت زیر تعریف می شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7) \text{ رابطه}$$

در صورتی که ماتریس کاملاً سازگار باشد، مقدار CI برابر با صفر می شود و هرچه انحراف از سازگاری کامل در ماتریس توافقی بیشتر باشد، مقدار آن نیز بیشتر خواهد شد. در صورتی که ماتریسی در بازه مورد قبول سازگاری نداشته باشد، باید دوباره در خصوص قضاوت های آن از تصمیم گیرنده 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 محاسبه مقادیر شاخص ناسازگاری برای ماتریس هایی که اعداد آن ها کاملاً تصادفی اختیار شده است محاسبه می شود. مقادیر این شاخص براس ماتریس های n بعدی مطابق جدول ۳ است).

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (8) \text{ رابطه}$$

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

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 درجه دوم اهمیت قرار گرفت. بر اساس نتایج این اقلیم، آثار مخرب زیست‌محیطی با به دست آوردن وزن ۰/۳۹۱ به منزله مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شدند. همچنین، هزینه تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۴۲ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۸۰ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجه 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 برکه 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 درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، آثار مخرب زیست‌محیطی با به دست آوردن وزن ۰/۳۹۹ به منزله مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شدند. همچنین، هزینه تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۵۱۹ و قابلیت اجرا با وزن ۰/۲۲۶ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجه اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۶ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم خزری را نشان می‌دهد.

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 گزینه نهایی، باید تحلیل حساسیت روی مسئله صورت گیرد تا درجه 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 بهینه تصفیه فاضلاب در اقلیم‌های پنج‌گانه کشور، در این تحقیق ۴ فرایند تصفیه فاضلاب شهری شامل لجن فعال، لاگون هوادهی، برکه 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، برکه

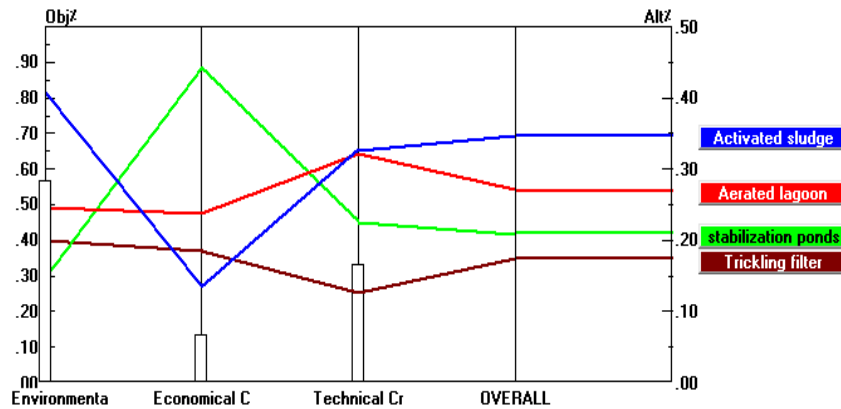
جدول ۴. وزن نرمال معیارها و زیرمعیارها در اقلیم‌های پنج‌گانه کشور

معیارها	کوهستانی (تیپ ۱)	خزری (تیپ ۲)	مدیترانه‌ای (تیپ ۳)	نیمه‌بیابانی (تیپ ۴)	بیابانی (تیپ ۵)
زیست‌محیطی (C <sub>1</sub> )	۰/۵۵۸	۰/۶۸۳	۰/۵۴۰	۰/۴۹۳	۰/۴۹۳
رسیدن به درجه مورد نیاز تصفیه (I <sub>1</sub> )	۰/۲۵۶	۰/۲۵۰	۰/۳۵۹	۰/۳۵۶	۰/۳۵۹
تولید بو (I <sub>2</sub> )	۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۰۸۵	۰/۱۱۱	۰/۱۲۱
ایمنی کارگران (I <sub>3</sub> )	۰/۱۸۳	۰/۱۸۹	۰/۱۷۲	۰/۱۸۶	۰/۱۹۰
میزان تولید لجن (I <sub>4</sub> )	۰/۰۷۰	۰/۰۹۱	۰/۱۱۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹
آثار مخرب زیست‌محیطی (I <sub>5</sub> )	۰/۳۹۱	۰/۳۹۹	۰/۲۷۱	۰/۲۶۹	۰/۲۵۱
اقتصادی (C <sub>2</sub> )	۰/۱۲۲	۰/۱۱۷	۰/۱۶۳	۰/۱۹۶	۰/۳۱۱
هزینه اولیه (I <sub>6</sub> )	۰/۱۵۹	۰/۱۵۸	۰/۱۴۱	۰/۱۵۴	۰/۲۱۱
زمین مورد نیاز (I <sub>7</sub> )	۰/۰۸۵	۰/۱۱۲	۰/۲۰۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۱
هزینه تعمیر و نگهداری (I <sub>8</sub> )	۰/۵۴۲	۰/۵۱۹	۰/۴۸۵	۰/۵۶۹	۰/۵۷۵
هزینه تعمیرات (I <sub>81</sub> )	۰/۵۵۸	۰/۲۹۷	۰/۵۲۸	۰/۵۶۹	۰/۵۲۸
حقوق راهبر (I <sub>82</sub> )	۰/۱۲۲	۰/۱۶۳	۰/۱۴۰	۰/۱۰۹	۰/۱۴۰
هزینه انرژی (I <sub>83</sub> )	۰/۳۲۰	۰/۵۴۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۱	۰/۳۳۳
هزینه دفع لجن (I <sub>9</sub> )	۰/۲۱۳	۰/۲۱۱	۰/۱۷۱	۰/۱۹۴	۰/۱۳۳
فنی (C <sub>3</sub> )	۰/۳۲۰	۰/۲۰۰	۰/۲۹۷	۰/۳۱۱	۰/۱۹۶
قابلیت اجرا (I <sub>10</sub> )	۰/۱۱۹	۰/۲۲۶	۰/۱۶۲	۰/۱۴۴	۰/۱۸۶
کارایی (I <sub>11</sub> )	۰/۱۱۹	۰/۰۹۷	۰/۱۶۱	۰/۰۷۶	۰/۰۹۷
حذف BOD و COD (I <sub>111</sub> )	۰/۴۲۸	۰/۴۸۱	۰/۵۳۴	۰/۵۰۲	۰/۴۱۸
حذف TSS (I <sub>112</sub> )	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۱۰۲	۰/۰۸۴	۰/۱۲۰
حذف نیتروژن (I <sub>113</sub> )	۰/۲۰۰	۰/۱۷۰	۰/۱۴۵	۰/۱۷۲	۰/۱۹۱
حذف فسفر (I <sub>114</sub> )	۰/۲۸۴	۰/۲۶۲	۰/۲۱۸	۰/۲۴۲	۰/۲۷۱
قابلیت اطمینان (I <sub>12</sub> )	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۹۹	۰/۱۸۷	۰/۱۱۷
مقاومت در برابر شک هیدرولیکی (I <sub>13</sub> )	۰/۰۷۰	۰/۱۱۱	۰/۰۵۶	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵
مقاومت در برابر شک آلی (I <sub>14</sub> )	۰/۰۶۳	۰/۰۵۴	۰/۰۴۴	۰/۰۶۶	۰/۰۸۲
هماهنگی با اقلیم (I <sub>15</sub> )	۰/۱۷۱	۰/۱۴۰	۰/۱۰۱	۰/۱۴۶	۰/۱۱۲
هماهنگی با امکانات (I <sub>16</sub> )	۰/۱۶۷	۰/۱۰۳	۰/۱۳۳	۰/۱۷۴	۰/۱۶۴
انعطاف در عملکرد (I <sub>17</sub> )	۰/۰۴۰	۰/۰۳۹	۰/۰۷۷	۰/۰۵۱	۰/۰۵۳
بهره‌برداری ساده (I <sub>18</sub> )	۰/۰۶۹	۰/۰۵۰	۰/۰۶۶	۰/۱۱۶	۰/۱۴۳



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

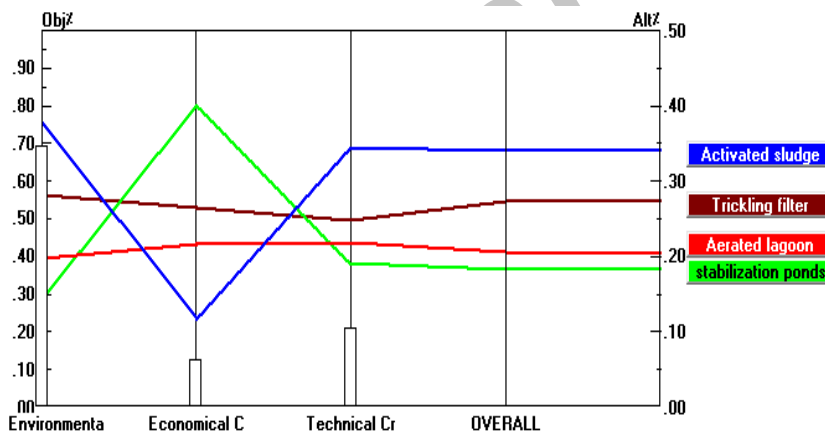




شکل ۴. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تیپ ۱



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

نگهداری با وزن ۰/۴۸۵ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۹۹ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجه 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 برکه 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

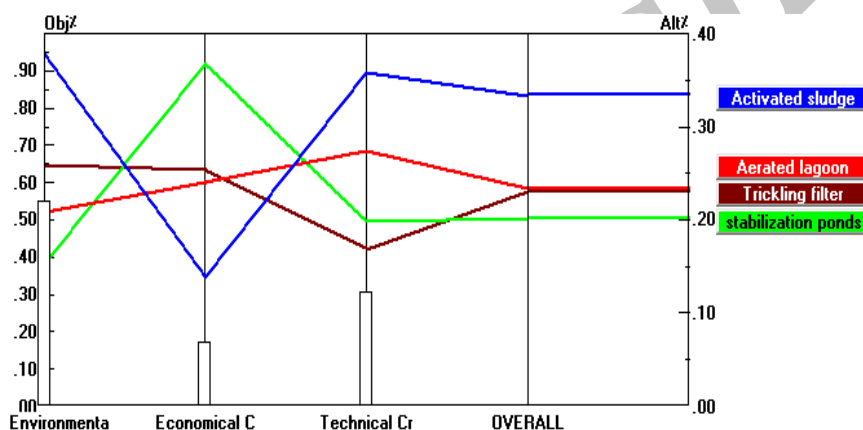
مطابق شکل ۷ و جدول ۴، در اقلیم مدیترانه‌ای (تیپ ۳)، فرایندهای لجن فعال، لاگون هوادهی، صافی چکنده و برکه تثبیت به ترتیب اوزان ۰/۳۳۴، ۰/۲۳۴، ۰/۲۳۱ و ۰/۲۰۱ را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۵۴۰ نسبت به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۲۹۷ در درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجه مورد نیاز تصفیه با به دست آوردن وزن ۰/۳۵۹ به منزله مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینه تعمیر و

نگهداری با وزن ۰/۵۶۹ و قابلیت اطمینان با وزن ۰/۱۸۷ در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجه اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۱۰ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم نیمه‌بیابانی را نشان می‌دهد.

به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار فنی با وزن ۰/۳۱۱ در درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجه مورد نیاز تصفیه با به دست آوردن وزن ۰/۳۵۶ به منزله مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینه تعمیر و



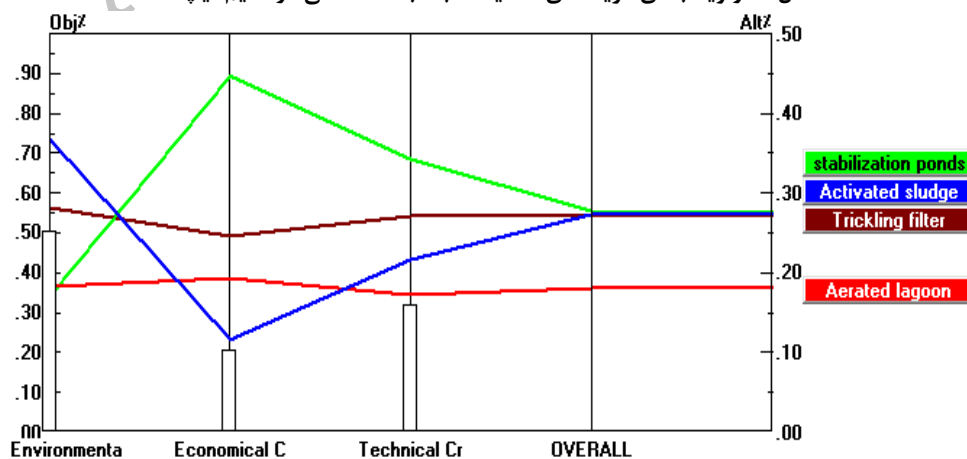
شکل ۷. اولویت‌بندی گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی در اقلیم تپ ۳



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



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



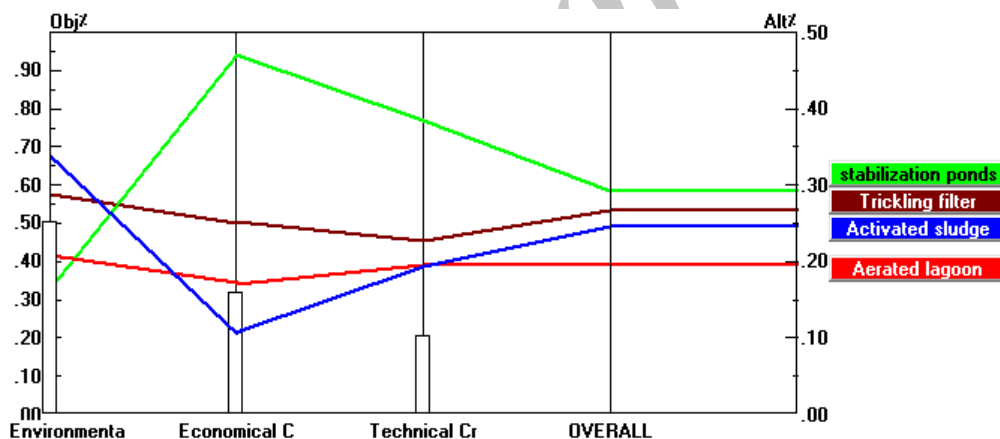
شکل ۱۰. تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم تپ ۴

تصفیه با به دست آوردن وزن  $0/359$  به منزله مهم‌ترین زیرمعیار زیست‌محیطی شناخته شد. همچنین، هزینه تعمیر و نگهداری با وزن  $0/575$  و قابلیت اجرا با وزن  $0/186$  در بین زیرمعیارهای اقتصادی و فنی بالاترین درجه اهمیت را به خود اختصاص دادند. شکل ۱۲ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس کارایی نسبت به هدف کلی در اقلیم بیابانی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱ و جدول ۴، در اقلیم بیابانی (تیپ ۵)، فرایندهای برکه تثبیت، صافی چکنده، لجن فعال و لاگون هوادهی به ترتیب اوزان  $0/292$ ،  $0/266$ ،  $0/247$  و  $0/195$  را به دست آوردند. همچنین، در این اقلیم از بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی با وزن  $0/493$  نسبت به معیارهای دیگر اهمیت بیشتری داشته و پس از آن معیار اقتصادی با وزن  $0/311$  در درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. بر اساس نتایج این اقلیم، رسیدن به درجه مورد نیاز



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

وابسته به محیط‌زیست منطقه، قابل توجه خواهد بود. همچنین، معیار فنی در چهار اقلیم کوهستانی، خزری، مدیترانه‌ای و نیمه‌بیابانی کشور در رتبه دوم اهمیت قرار داشته و بالاترین وزن آن در اقلیم کوهستانی ( $0/320$ ) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم بیابانی ( $0/196$ ) است که اهمیت بالای معیار فنی در اقلیم کوهستانی به علت شرایط محیطی حساس و عملکرد ضعیف اکثر فرایندهای تصفیه فاضلاب در آب و هوای سرد، قابل توجه خواهد بود. بر اساس نتایج در سه اقلیم کوهستانی، خزری و مدیترانه‌ای

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی به منظور انتخاب گزینه بهینه تصفیه فاضلاب شهری در اقلیم‌های مختلف کشور معیار زیست‌محیطی در همه اقلیم‌ها به منزله مهم‌ترین معیار شناخته شدند و بالاترین وزن آن در اقلیم خزری ( $0/683$ ) و پایین‌ترین وزن آن در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی و بیابانی ( $0/493$ ) است. اهمیت بالای معیار زیست‌محیطی در اقلیم خزری کشور با توجه به شرایط طبیعی منطقه مذکور و عواملی همچون صنعت توریسم، بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌های متعدد و دیگر عوامل

در مطالعه‌ای که کریمی در سال ۱۳۸۹ انجام داد، فرایندهای تصفیه بی‌هوازی در شهرک‌های صنعتی ایران با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS فازی با هم مقایسه شدند. در این مطالعه پنج فرایند تصفیه 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 به‌منزله 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 به‌منزله بهترین فرایند تصفیه فاضلاب‌های صنعتی در ایران انتخاب شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۹).

فرایند لجن فعال به‌منزله مناسب‌ترین گزینه 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 برکه تثبیت به‌منزله مناسب‌ترین گزینه 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. خلاصه نتایج اقلیم‌های مختلف کشور در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. خلاصه نتایج اقلیم‌های مختلف کشور

نوع اقلیم	وزن نرمال معیارهای اصلی			وزن گزینه‌های تصفیه نسبت به هدف کلی			
	زیست‌محیطی	اقتصادی	فنی	لجن فعال	لاگون هوادهی	برکه 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

### 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

در مطالعه‌ای که گانگ‌مینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ انجام دادند، برای انتخاب بهترین فرایند تصفیه 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).

## منابع

- آمار و ارقام آرشو شرکت آب و فاضلاب کشور، ۱۳۸۹.
- جزایری، ر. ۱۳۸۸. تعیین پارامترهای طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در مناطق سردسیر کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شماره ۴۴، ص ۹۲-۱۰۰.
- دباغیان، م. هاشمی، ح. ۱۳۸۸. ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی روش‌های تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری به روش AHP، علوم تکنولوژی محیط‌زیست، دوره یازدهم، شماره ۳، ص ۱۰۷-۱۱۵.
- زنجیرچی، م. ۱۳۹۰. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی قطعی- نظریه فازی، چاپ اول، انتشارات صناعی شهیمیرزادی، تهران.
- سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۷۹. مجموعه قوانین و مقررات حفاظت محیط‌زیست، جلد اول.
- شیرزاد، س. تجریشی، م. برقی، م. ۱۳۷۸. مقایسه اقتصادی روش‌های تصفیه فاضلاب شهری در شرایط اقلیمی ایران، انسان و محیط‌زیست، سال اول، شماره ۱، ص ۳-۱۲.
- فتایی، ا. ترابیان، ع. حسین‌زاده کلخوران، م. ۱۳۹۲. انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از روش AHP (مطالعه موردی: شهرهای اردبیل، تبریز و ارومیه)، مجله سلامت و بهداشت، دوره چهارم، شماره سوم، ص ۲۶۰-۲۷۲.
- قدسی‌پور، ح. ۱۳۸۱. مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- کریمی، ع. مهرداد، ن. هاشمیان، ح. ۱۳۸۹. انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب با استفاده از روش AHP، آب و فاضلاب، شماره ۷۶، صص ۲-۱۲.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی (نشریه ۳-۱۱۷)، بازنگری اول، ۱۳۹۲.
- Aragones-Beltran, P. Mendoza-roca. 2009. Application of Multi-criteria 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 sites using 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.