Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.4, No.1; 2026.pp: 81-94

Research paper

(Received 16 Oct. 2025 Accepted 28 Apr. 2026)

Performance Analysis and Enhancement of Landfill Leachate Treatment System Using an Integrated HELP–QSPM–SPACE Approach: A Case Study of Babol Landfill

Mohammadreza Hakim[1], Gholamreza Nabi Bidhendi[2*], Akbar Baghvand[2], Naser Mehrdadi[2]

[1] *Ph.D. Candidate, Environmental Engineering, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran*

[2] *Professor, Department of Water and Wastewater Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran*

Abstract

The Anjilsi landfill in Babol County, as one of the active disposal sites in the humid regions of northern Iran, generates a considerable volume of leachate on a daily basis due to high rainfall and the high permeability of landfill layers. Managing this leachate is associated with serious environmental and technical challenges. The aim of this study was to present an integrated framework for analysis, strategy selection, and technical design of an optimal leachate treatment system for this site. In the first step, the actual leachate volume was simulated and estimated using the HELP model, which showed that the current treatment plant capacity is insufficient to handle the incoming load. Then, using the multi-criteria decision-making models SWOT, QSPM, and SPACE, the existing system was evaluated from technical and managerial perspectives, and the strategy of "capacity expansion while preserving the existing structure and upgrading critical units" was selected as the optimal option. Based on this strategy, a modified treatment train was designed, including anaerobic units (ABR), chemical coagulation and sedimentation, a membrane bioreactor (MBR), reverse osmosis (RO), and final disinfection (UV/chlorination). Mass balance results showed that the modified system can remove COD, BOD, ammonia, TSS, and heavy metals with efficiencies exceeding 80%, and produce an effluent compliant with national standards for discharge and agricultural reuse. The novelty of this study lies in the integration of hydrological modeling, strategic analysis, and localized process design, which can serve as a practical model for upgrading leachate treatment systems in humid landfills across Iran.

Keywords: Landfill leachate, HELP model, QSPM matrix, hybrid treatment, system enhancement strategy

* Corresponding Author: Gholamreza Nabi Bidhendi
Email: ghhendi@ut.ac.ir
Phone: 09122781725

Doi: 10.48306/juem.2026.553804.1120

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه: https://jumee.kgut.ac.ir

سال چهارم/شماره اول/ بهار ۱۴۰۵/صفحه ۸۱-۹۴

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۷/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۸

تحلیل عملکرد و ارتقاء سیستم تصفیه شیرابه با رویکرد ترکیبی HELP–QSPM–SPACE :(مطالعه موردی دفنگاه زباله بابل)

محمدرضا حکیم[۱]، غلام رضا نبی بیدهندی[۲*]، اکبر باغوند[۲]، ناصر مهردادی[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، مهندسی محیط زیست، پردیس بین الملل ارس دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] استاد، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل به‌عنوان یکی از مراکز دفن فعال در نواحی مرطوب شمال ایران، به‌دلیل بارندگی بالا و نفوذپذیری زیاد لایه‌های دفن، روزانه حجم قابل‌توجهی شیرابه تولید می‌کند که مدیریت آن با چالش‌های جدی زیست‌محیطی و فنی همراه است. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب تلفیقی برای تحلیل، انتخاب راهبرد و طراحی فنی سیستم بهینه تصفیه شیرابه در این سایت بود. در گام نخست، با استفاده از مدل HELP، حجم واقعی شیرابه شبیه‌سازی و برآورد گردید که نشان داد ظرفیت فعلی تصفیه‌خانه پاسخگوی بار ورودی نیست. سپس با بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SWOT، QSPM و SPACE، وضعیت موجود سیستم از نظر فنی و مدیریتی ارزیابی و راهبرد «افزایش ظرفیت با حفظ ساختار موجود و اصلاح واحدهای بحرانی» به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. بر مبنای این راهبرد، فرآیند اصلاح‌شده‌ای شامل واحدهای بی‌هوازی (ABR)، انعقاد و ته‌نشینی شیمیایی، بیورآکتور غشایی (MBR)، اسمز معکوس (RO) و گندزدایی نهایی (UV/کلرزنی) طراحی گردید. نتایج موازنه جرمی نشان داد که سیستم اصلاح‌شده قادر است COD، BOD، آمونیاک، TSS و فلزات سنگین را با راندمان بیش از ۸۰٪ حذف کرده و پسابی منطبق با استانداردهای ملی تخلیه و استفاده کشاورزی تولید کند. نوآوری این پژوهش در تلفیق مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تحلیل راهبردی و طراحی فرآیند بومی‌سازی‌شده نهفته است که می‌تواند به‌عنوان الگویی کاربردی برای ارتقاء سیستم‌های تصفیه شیرابه در دفنگاه‌های مرطوب ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: شیرابه دفنگاه، مدل HELP ، ماتریس QSPM ، تصفیه ترکیبی، راهبرد ارتقاء

* نویسنده مسئول: غلام رضا نبی بیدهندی

ایمیل: ghhendi@ut.ac.ir

شماره تماس: ۰۹۱۲۲۷۸۱۷۲۵

Doi: 10.48306/juem.2026.553804.1120

۱-مقدمه

مدیریت پسماندهای جامد شهری یکی از چالش‌های اساسی در توسعه پایدار و حفظ سلامت محیط‌زیست در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. دفنگاه‌های شهری، به‌ویژه در مناطق مرطوب، با تولید حجم بالایی از شیرابه مواجه‌اند؛ جریانی با بار آلودگی بسیار بالا که حاوی ترکیبات آلی، فلزات سنگین، نیتروژن آمونیاکی، ترکیبات مقاوم به تجزیه بیولوژیکی و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا است. در صورت عدم تصفیه مؤثر، شیرابه می‌تواند موجب آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخریب خاک، تهدید سلامت عمومی و ایجاد نارضایتی اجتماعی شود [۱].

در سال‌های اخیر، با افزایش جمعیت شهری و تولید پسماند، دفنگاه‌ها به‌ویژه در شمال ایران با اقلیم مرطوب، با بحران مدیریت شیرابه مواجه شده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که در چنین مناطقی، بارندگی بالا موجب افزایش نفوذ آب به توده زباله و تولید شیرابه با غلظت بالای آلاینده‌ها می‌شود. در این میان، دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل به‌عنوان یکی از مراکز دفن فعال در شمال کشور، روزانه بیش از ۸۰ مترمکعب شیرابه تولید می‌کند که مدیریت آن نیازمند سیستم تصفیه‌ای با ظرفیت و راندمان بالا است [۲].

با وجود احداث تصفیه‌خانه شیرابه در این سایت، بررسی‌های میدانی و اسنادی نشان می‌دهد که سیستم فعلی با چالش‌هایی جدی مواجه است. ظرفیت ناکافی نسبت به حجم واقعی شیرابه، اختلال در عملکرد واحد بی‌هوازی ناشی از ترتیب نادرست فرآیندها، ته‌نشینی ناقص در واحد شیمیایی، نبود واحد گندزدایی نهایی و ضعف در پایش بهره‌برداری، از جمله مشکلات شناسایی شده‌اند. این نواقص نه‌تنها موجب کاهش راندمان حذف آلاینده‌ها شده‌اند، بلکه پایداری زیست‌محیطی و قابلیت بهره‌برداری بلندمدت سیستم را نیز تهدید می‌کنند [۳].

در ادبیات علمی، مطالعات متعددی به بررسی روش‌های تصفیه شیرابه پرداخته‌اند؛ از جمله استفاده از بیورآکتورهای غشایی، فرآیندهای شیمیایی پیشرفته، گیاه‌پالایی، و روش‌های اکسیداسیون پیشرفته. با این حال، کمتر پژوهشی به طراحی راهبردی ارتقاء سیستم‌های موجود با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته است. در واقع، خلأ پژوهشی در تلفیق ارزیابی فنی، تحلیل راهبردی و طراحی فرآیند اصلاح‌شده در بستر واقعی دفنگاه‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است [۳].

مرور ادبیات پژوهش‌های مرتبط با مدیریت دفنگاه و تصفیه شیرابه نشان می‌دهد که رویکردهای نوین این حوزه از تمرکز صرف بر «حذف آلاینده‌ها» به سمت «پایداری سامانه، قابلیت اتکا، و تصمیم‌گیری چندمعیاره» حرکت کرده‌اند. در مطالعات اخیر، علاوه بر کارایی فنی، معیارهایی مانند هزینه، ریسک بهره‌برداری، تاب‌آوری در برابر تغییرات شرایط ورودی، و سازگاری محیط‌زیستی نیز به‌عنوان مؤلفه‌های کلیدی ارزیابی مطرح شده‌اند. برای مثال، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل حساسیت در انتخاب راهکارهای مدیریت دفنگاه در محیط‌های پیچیده، نشان می‌دهد که ارزیابی گزینه‌ها بدون لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت و وزن‌دهی ساختاریافته معیارها می‌تواند به انتخاب‌های غیرپایدار منجر شود [۴]. همچنین، مطالعات راهبردی مبتنی بر SWOT در مدیریت پسماند شهری نیز تأکید می‌کنند که موفقیت راهکارها صرفاً تابع فناوری نیست، بلکه به هم‌راستایی ظرفیت نهادی، زیرساخت اجرایی و سیاست‌گذاری وابسته است [۵].

در سطح فرآیندی، ادبیات کلاسیک و مروری نشان می‌دهد که تصفیه شیرابه به دلیل ماهیت بسیار متغیر آن (سن دفنگاه، ترکیب پسماند، اقلیم، و رقیق‌سازی ناشی از بارش) نیازمند رویکردهای ترکیبی است و اتکا به یک فرآیند منفرد معمولاً پاسخ‌گو نیست. مرورهای معتبر بر فناوری‌های تصفیه شیرابه به‌طور مکرر بر این نکته تأکید کرده‌اند که سامانه‌های موفق غالباً از ترکیب واحدهای پیش‌تصفیه فیزیکی-شیمیایی، فرآیندهای زیستی، و مراحل تکمیلی/پولیش استفاده می‌کنند تا هم بار آلی و نیتروژن کاهش یابد و هم کیفیت پساب نهایی به حدود استاندارد نزدیک شود [۶-۸]. در همین راستا، مرور وضعیت تصفیه شیرابه در برزیل نیز نشان می‌دهد که انتخاب آرایش فرآیندی باید به شرایط محلی، کیفیت اولیه شیرابه و محدودیت‌های بهره‌برداری وابسته باشد و نسخه یکسان برای همه سایت‌ها کارایی ندارد [۹].

بخش مهمی از ادبیات به فرآیندهای زیستی اختصاص دارد، زیرا این فرآیندها همچنان ستون اصلی حذف ترکیبات آلی قابل‌تجزیه و بخشی از نیتروژن در بسیاری از سامانه‌ها هستند. با این حال، مرور انتقادی فرآیندهای زیستی نشان داده است که عملکرد این واحدها به‌شدت تحت تأثیر نسبت BOD/COD، غلظت آمونیاک، حضور ترکیبات بازدارنده، و پایداری بارگذاری هیدرولیکی و آلی قرار دارد؛ بنابراین طراحی یا بهره‌برداری نامناسب می‌تواند به افت راندمان، ناپایداری میکروبی و افزایش بار وارده به واحدهای پایین‌دست منجر شود [۱۰]. از این منظر، بازآرایی درست توالی فرآیندها، کنترل زمان ماند و بارگذاری، و استفاده از واحدهای تکمیلی برای جبران

محدودیت‌های زیستی، از مهم‌ترین درس‌آموخته‌های مطالعات پیشین است [۶]. این نتیجه برای پژوهش‌هایی که بر اصلاح سامانه‌های موجود تمرکز دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا هدف صرفاً «افزودن واحد جدید» نیست، بلکه «بهینه‌سازی تعامل بین واحدها» است.

در کنار مطالعات فرآیندی، پژوهش‌های جدیدتر به مدیریت دفنگاه از منظر چرخه عمر بهره‌برداری و شرایط واقعی می‌پردازند. مطالعه کیفی موردی بر دفنگاه‌های بسته در نروژ نشان می‌دهد که مدیریت موفق دفنگاه فقط به دوره فعال دفن محدود نیست و مسائل پساب، شیرابه، پایش بلندمدت، و تصمیم‌های مدیریتی در دوره پسابهره‌برداری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری محیط‌زیستی دارند [۱۱]. از سوی دیگر، پژوهش‌های تجربی درباره دفنگاه‌های پایدار مبتنی بر بازچرخانی شیرابه نشان می‌دهند که حتی در سطح طراحی و بهره‌برداری داخلی دفنگاه، بهینه‌سازی هم‌زمان چند شاخص عملکرد (نه فقط یک خروجی) می‌تواند به تصمیم‌های متوازن‌تری منجر شود؛ به‌ویژه زمانی که روش‌های طراحی آزمایش و تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌صورت یکپارچه به‌کار گرفته شوند [۱۲]. این جهت‌گیری پژوهشی نشان می‌دهد که ادبیات معاصر، مرز بین «مدیریت دفنگاه» و «طراحی تصفیه شیرابه» را کمرنگ کرده و هر دو را در قالب یک سامانه یکپارچه ارزیابی می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مدل پیشنهادی برای ارتقاء تصفیه‌خانه‌های شیرابه در سایر دفنگاه‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد و نقش مؤثری در بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری ایفا کند.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-ناحیه مطالعاتی

دفنگاه زباله انجیل‌سی در شهرستان بابل، یکی از مهم‌ترین مراکز دفن پسماند شهری در استان مازندران و شمال ایران است. این شهرستان با جمعیتی بیش از پانصد هزار نفر، روزانه حدود ۲۵۰ تن پسماند شهری تولید می‌کند که بخش عمده آن از شهر بابل و مابقی از شهرهای اطراف شامل امیرکلا، گتاب، گلوگاه، زرگرشهر، خشرودپی و مرزیکلا جمع‌آوری می‌شود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، ترکیب فیزیکی زباله‌های شهرستان بابل شامل حدود ۶۵٫۳ درصد مواد آلی فسادپذیر و ۳۴٫۷ درصد مواد غیرآلی است که نشان‌دهنده بار آلی بالای پسماند و به تبع آن، پتانسیل بالای تولید شیرابه در این منطقه می‌باشد. موقعیت جغرافیایی دفنگاه در حدود ۳۳ کیلومتری جنوب‌غربی شهر بابل و در محدوده‌ای با شیب طبیعی حدود ۳۳ درصد قرار دارد که همین ویژگی توپوگرافی، بر سرعت جریان و نفوذ شیرابه در خاک اثرگذار است.

جدول ۱- آنالیز فیزیکی پسماند شهرستان بابل (شهرداری بابل، ۱۴۰۴)

نوع	درصد	نوع	درصد
مواد فسادپذیر	۶۵٫۳	شیشه	۱٫۲
کاغذ و مقوا	۸٫۷	آهن	۱٫۸
PET	۱٫۱	قوطی نوشابه	۲٫۳
لاستیک	۰٫۵	چوب	۱٫۲

از نظر اقلیمی، شهرستان بابل در زمره مناطق مرطوب و پرباران شمال کشور قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۱۱۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نزدیک به ۱۷ درجه سانتی‌گراد است. این شرایط آب‌وهوایی موجب می‌شود که در طول سال، حجم قابل‌توجهی از آب باران به درون توده زباله نفوذ کرده و تولید شیرابه افزایش یابد. رطوبت نسبی بالا، تبخیر محدود و خاک‌های نسبتاً نفوذپذیر منطقه نیز از دیگر عواملی هستند که به تشدید تولید و جابجایی شیرابه در محل دفن کمک می‌کنند. از طرفی، مجاورت دفنگاه با منابع آب سطحی و زیرزمینی در پایین‌دست، احتمال آلودگی محیطی را افزایش داده و ضرورت طراحی و بهره‌برداری دقیق از سیستم تصفیه شیرابه را دوچندان می‌سازد.

دفنگاه انجیل‌سی در حال حاضر علاوه بر محل دفن بهداشتی، شامل یک کارخانه کمپوست و یک تصفیه‌خانه شیرابه است که به روش نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس عمل می‌کند. با این حال، بررسی‌ها نشان داده است که ظرفیت تصفیه‌خانه فعلی، که حدود ۴۰

مترمکعب در روز می‌باشد، پاسخگوی حجم واقعی شیرابه تولیدی نیست. در نتیجه، بخشی از شیرابه به‌صورت خام یا نیمه‌تصفیه‌شده در محیط رهاسازی می‌شود که پیامدهایی از قبیل آلودگی منابع آبی، انتشار بو و نارضایتی اجتماعی را در پی دارد. وجود این چالش‌ها، در کنار ویژگی‌های اقلیمی و ترکیب خاص پسماند منطقه، دفنگاه انجیل‌سی را به یک مطالعه موردی شاخص برای تحلیل فنی، مدل‌سازی و ارتقاء سیستم تصفیه شیرابه در مناطق مرطوب کشور تبدیل کرده است.

شکل ۱- محل قرارگیری سایت مدیریت پسماند انجیل سی

۲-۲-برآورد حجم شیرابه با مدل HELP

برای برآورد دقیق حجم شیرابه تولیدی در دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل، از مدل HELP[1] نسخه ۳,۰۷ استفاده شد. این مدل که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده توسعه یافته است، ابزاری معتبر برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در لندفیل‌ها به‌شمار می‌رود و قابلیت محاسبه مؤلفه‌هایی نظیر رواناب سطحی، نفوذ آب، تبخیر و تعرق، تراز رطوبت خاک و حجم شیرابه تولیدی را دارد [۱۳]. مدل HELP یک مدل شبه‌دوبعدی است که بر اساس ترکیب داده‌های تجربی و عددی عمل کرده و امکان تحلیل کمی تبادل آب میان لایه‌های زباله، خاک و سیستم زهکشی را فراهم می‌سازد. این ویژگی سبب شده است که مدل مذکور یکی از ابزارهای پرکاربرد برای پیش‌بینی حجم شیرابه در لندفیل‌های مناطق مرطوب محسوب شود [۱۴].

ورودی‌های مدل شامل داده‌های اقلیمی، هندسی و فیزیکی منطقه بودند. داده‌های اقلیمی نظیر میانگین بارندگی، دمای ماهانه و تبخیر و تعرق بالقوه از ایستگاه هواشناسی شهرستان بابل استخراج شد. همچنین، مشخصات هندسی لندفیل شامل مساحت، شیب، عمق لایه دفن و نوع پوشش سطحی از شهرداری بابل و داده‌های ویژگی فیزیکی زباله‌ها مانند تخلخل، چگالی و رطوبت اولیه از مطالعات میدانی و گزارش‌های فنی سایت گردآوری شد. در این پژوهش، دوره زمانی ده‌ساله (۱۳۹۳–۱۴۰۳) برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد تا نوسانات فصلی و میان‌سالی بارش و تبخیر در نتایج لحاظ گردد و شرایط اقلیمی واقعی شمال کشور بازتاب یابد.

نتایج مدل HELP نشان داد که حجم سالانه شیرابه تولیدی در دفنگاه انجیل‌سی حدود ۳۰،۷۵۰ مترمکعب در سال است که معادل ۸۴,۲ مترمکعب در روز می‌باشد. این مقدار بیش از دو برابر ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه فعلی (۴۰ مترمکعب در روز) است و بیانگر ناترازی جدی میان تولید و ظرفیت تصفیه شیرابه در سایت می‌باشد. این یافته تأکید می‌کند که برای جلوگیری از نشت و نفوذ آلاینده‌ها به خاک و منابع آب زیرزمینی، ارتقاء سیستم تصفیه و افزایش ظرفیت بهره‌برداری تصفیه‌خانه شیرابه امری ضروری است [۱۵].

[1] Hydrologic Evaluation of Landfill Performance

۲-۳-تحلیل راهبردی با مدل‌هایSWOT ، QSPM و SPACE

➢ تحلیلSWOT

برای شناسایی و ارزیابی عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر عملکرد سیستم تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل، از تحلیل SWOT[1] به‌عنوان ابزاری راهبردی در تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. این تحلیل به‌منظور تعیین موقعیت فعلی سیستم و استخراج راهبردهای ارتقاء آن انجام گردید. داده‌های مورد نیاز از طریق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ۱۲ نفر از خبرگان شامل متخصصان حوزه‌های مهندسی محیط زیست، مدیریت پسماند، تصفیه فاضلاب و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های شیرابه جمع‌آوری شد. معیار انتخاب خبرگان، سابقه کاری مرتبط با تصفیه شیرابه، تجربه در طرح‌های مشابه و آشنایی با ساختار فنی دفنگاه‌های مناطق مرطوب بود.

در مرحله نخست، داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها کدگذاری و در چهار گروه اصلی نقاط قوت، نقاط ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها دسته‌بندی شدند. در میان نقاط قوت، وجود زیرساخت اولیه تصفیه‌خانه، تطابق نسبی کیفیت پساب خروجی با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست و تجربه بهره‌برداری چندساله از سیستم فعلی برجسته بود. نقاط ضعف شامل ظرفیت ناکافی تصفیه نسبت به حجم واقعی شیرابه تولیدی، اختلال در عملکرد راکتور بی‌هوازی به‌دلیل ترتیب نامناسب واحدها، ته‌نشینی ناقص در واحد شیمیایی و فقدان مرحله گندزدایی نهایی شناسایی گردید.

در بخش فرصت‌ها، حمایت فنی و مالی سازمان حفاظت محیط زیست، امکان استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در بخش کشاورزی و ظرفیت توسعه همکاری‌های دانشگاهی و صنعتی در زمینه ارتقاء فناوری تصفیه مورد تأکید قرار گرفت. در مقابل، تهدیدها شامل خطر نشت و نفوذ شیرابه به منابع آب سطحی و زیرزمینی، بروز نارضایتی و اعتراضات اجتماعی ناشی از انتشار بو و آلودگی، و تغییرات اقلیمی و شدت نوسانات بارش که بر میزان تولید شیرابه اثرگذارند، به‌عنوان عوامل کلیدی شناسایی شدند. نتایج این تحلیل، مبنای طراحی ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM) و تعیین راهبرد بهینه ارتقاء سیستم تصفیه در مراحل بعدی پژوهش قرار گرفت [۱۶].

➢ ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM)

به‌منظور اولویت‌بندی و انتخاب راهبرد بهینه برای ارتقاء سیستم تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی، از ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمّی QSPM استفاده شد. در این مرحله، عوامل کلیدی استخراج‌شده از تحلیل SWOT (شامل نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها) به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شدند. برای هر عامل، وزن نسبی اهمیت بر اساس نظرات ۱۲ خبره حوزه محیط زیست و مدیریت پسماند تعیین گردید و سپس میزان جذابیت هر راهبرد در برابر این عوامل با مقیاس ۱ تا ۴ ارزیابی شد. چهار راهبرد اصلی برای ارزیابی در ماتریس QSPM تعریف شد [۱۷]:

۱.افزایش ظرفیت سیستم تصفیه با حفظ ساختار موجود

۲.اصلاح ترتیب فرآیندهای تصفیه برای بهبود عملکرد واحد بی‌هوازی

۳.طراحی مجدد واحد شیمیایی و بهینه‌سازی شرایط ته‌نشینی

۴.افزودن واحد گندزدایی نهایی و سیستم پایش آنلاین بهره‌برداری

پس از محاسبه امتیاز جذابیت کل (TAS[3]) برای هر گزینه، نتایج نشان داد که راهبرد «افزایش ظرفیت با حفظ ساختار موجود و اصلاح واحدهای بحرانی» با کسب امتیاز $TAS = 2.98$، بالاترین اولویت را دارد. این راهبرد علاوه بر امکان‌پذیری فنی و اقتصادی، با اهداف توسعه پایدار و نیازهای زیست‌محیطی منطقه نیز هم‌راستا است. در مقابل، گزینه‌های جایگزینی کامل سیستم یا تغییرات اساسی در فرآیند، به‌دلیل هزینه‌های سرمایه‌ای بالا و محدودیت‌های اجرایی، در اولویت پایین‌تری قرار گرفتند.

➢ مدل موقعیت راهبردی و ارزیابی عملکرد (SPACE)

به‌منظور تعیین موقعیت راهبردی سیستم تصفیه شیرابه و اعتبارسنجی نتایج QSPM، از مدلSPACE[4] استفاده شد. این مدل با ارزیابی چهار محور اصلی شامل قدرت مالی، مزیت رقابتی، ثبات محیطی و قدرت صنعت، موقعیت کلی سیستم را در یک فضای

---

[1] Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats
[2] Quantitative Strategic Planning Matrix
[3] Total Attractiveness Score
[4] Strategic Position and Action Evaluation

دوبعدی ترسیم می‌کند. برای هر محور، امتیازات عددی بر اساس داده‌های میدانی، مستندات فنی تصفیه‌خانه و نظرات خبرگان تعیین گردید.

نتایج نشان داد که مختصات نهایی مدل در نقطه ($x = -5 , y = +5$) قرار دارد که در ناحیه محافظه‌کاران نمودار SPACE واقع می‌شود [۱۸]. این موقعیت بیانگر توصیه به حفظ ساختار فعلی سیستم و اجرای اصلاحات تدریجی به‌جای جایگزینی کامل تصفیه‌خانه در واحدهای بحرانی است. تفسیر این موقعیت نشان می‌دهد که با تقویت نقاط قوت موجود (مانند زیرساخت فنی و انطباق نسبی با استانداردها) و رفع نقاط ضعف کلیدی (نظیر ظرفیت پایین و اختلال در ABR)، می‌توان پایداری عملکرد سیستم را در بلندمدت تضمین کرد. بنابراین، مدل SPACE عملاً راهبرد منتخب QSPM را تأیید و پشتیبانی می‌کند [۱۹].

۲-۴-طراحی فرآیند اصلاح‌شده تصفیه شیرابه

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل راهبردی و انتخاب گزینه بهینه در مدل QSPM، فرآیند تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی به‌صورت اصلاح‌شده و مرحله‌ای طراحی گردید تا ضمن افزایش ظرفیت و بهبود راندمان حذف آلاینده‌ها، تداوم بهره‌برداری از سیستم موجود نیز حفظ شود. هدف اصلی این طراحی، رفع مشکلات فنی واحدهای موجود ـ به‌ویژه ناپایداری عملکرد راکتور بی‌هوازی و ته‌نشینی ناقص در واحد شیمیایی ـ و دستیابی به پساب نهایی منطبق بر استانداردهای تخلیه و استفاده کشاورزی بود.

فرآیند پیشنهادی اصلاح‌شده شامل شش واحد اصلی است که به‌صورت متوالی و یکپارچه طراحی شده‌اند:

۱.پمپاژ اولیه و تنظیم جریان: در این مرحله، شیرابه جمع‌آوری‌شده از سلول‌های دفن به‌وسیله پمپ‌های مقاوم در برابر خوردگی منتقل شده و دبی جریان به‌طور خودکار تنظیم می‌شود تا از نوسانات هیدرولیکی در واحدهای بعدی جلوگیری گردد.

۲.راکتور بی‌هوازی بافل‌دار (ABR) با اصلاح شرایط ورودی: در طراحی جدید، حذف هوادهی اولیه و تنظیم بار آلی ورودی باعث حفظ شرایط آنوکسیک و افزایش راندمان حذف COD و BOD گردید. هندسه داخلی راکتور نیز بر اساس نتایج بهره‌برداری میدانی بازطراحی شد تا زمان ماند هیدرولیکی یکنواخت‌تر و تماس بهتر بین فاز جامد و مایع حاصل شود.

۳.واحد انعقاد و ته‌نشینی شیمیایی: این واحد با استفاده از محلول‌های نمک آلومینیوم یا فریک و با کنترل دقیق pH و زمان ماند، برای حذف ذرات معلق، فلزات سنگین و کاهش کدورت طراحی شد. افزایش عمق ته‌نشینی و استفاده از لایه‌گیرهای مورب موجب بهبود راندمان جداسازی گردید.

۴.بیورآکتور غشایی (MBR): در این مرحله، تصفیه بیولوژیکی هوازی و جداسازی فیزیکی به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود. استفاده از غشاهای PVDF با اندازه منافذ ۰٫۱ تا ۰٫۴ میکرون و کنترل پارامترهای عملیاتی مانند MLSS، DO و فشار ترانس‌ممبرانی، موجب افزایش پایداری فرآیند و بهبود حذف نیتروژن آمونیاکی شد.

۵.فیلتراسیون شنی و اسمز معکوس (RO): واحد فیلتراسیون شنی برای حذف ذرات باقی‌مانده و یکنواخت‌سازی کیفیت جریان ورودی به RO تعبیه شد. سیستم اسمز معکوس با فشار عملیاتی ۶ تا ۱۰ بار، غلظت TDS پساب را به کمتر از ۵۰۰ mg/L رسانده و کیفیت خروجی را تا حد استانداردهای مصرف کشاورزی ارتقاء می‌دهد.

۶.واحد گندزدایی نهایی: به‌منظور حذف میکروارگانیسم‌های پاتوژن، از سیستم گندزدایی نهایی مبتنی بر اشعه فرابنفش (UV) یا تزریق کلر استفاده شد. انتخاب نوع گندزدایی به کیفیت نهایی جریان و اهداف بهره‌برداری وابسته است.

در طراحی هر واحد، پارامترهای فنی شامل حجم مؤثر، زمان ماند هیدرولیکی، دوز مواد شیمیایی، نوع و جنس غشا، فشار عملیاتی و راندمان حذف آلاینده‌ها بر اساس داده‌های تجربی و گزارش‌های میدانی تنظیم گردید. علاوه بر این، سیستم به‌گونه‌ای طراحی شد که امکان اجرا در فازهای تدریجی وجود داشته باشد تا ضمن کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، وقفه‌ای در فرآیند بهره‌برداری فعلی ایجاد نگردد. این رویکرد موجب افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، کاهش ریسک‌های فنی و ارتقاء پایداری عملکرد در بلندمدت شد [۲۰].

۲-۵-موازنه جرمی مواد آلاینده

به‌منظور ارزیابی عملکرد فرآیند اصلاح‌شده تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی، موازنه جرمی آلاینده‌های اصلی شامل COD، BOD_5، آمونیاک، TSS و فلزات سنگین انجام شد. با فرض دبی ورودی روزانه ۸۴٫۲ مترمکعب و استفاده از داده‌های تجربی و آزمایشگاهی،

راندمان حذف آلاینده‌ها به‌ترتیب ۸۱٫۶٪ برای COD، ۹۷٫۵٪ برای BOD، ۸۱٫۸٪ برای آمونیاک، ۹۹٫۴٪ برای TSS و ۹۱٫۴٪ برای فلزات سنگین به‌دست آمد. نتایج نشان داد که فرآیند اصلاح‌شده، در مقایسه با سیستم فعلی، بهبود قابل‌توجهی در حذف آلاینده‌ها داشته و کیفیت پساب خروجی آن با استانداردهای ملی تخلیه و استفاده کشاورزی مطابقت کامل دارد؛ به‌ویژه کاهش چشمگیر غلظت فلزات سنگین و ترکیبات نیتروژنی، نشان‌دهنده کارایی بالای طراحی ترکیبی بی‌هوازی–شیمیایی–غشایی در شرایط اقلیم مرطوب شمال کشور است [۲۱].

۳-نتایج و بحث

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ارزیابی راهبرد ارتقاء سیستم تصفیه شیرابه در دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل انجام شد. این دفنگاه، به‌عنوان یکی از مراکز دفن فعال در شمال ایران، با اقلیم مرطوب و بارندگی بالا، روزانه حجم قابل توجهی شیرابه تولید می‌کند که مدیریت آن با چالش‌های فنی، زیست‌محیطی و اجرایی همراه است. در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی، تحلیل راهبردی، طراحی فرآیند اصلاح‌شده و ارزیابی عملکرد فنی مورد بررسی قرار گرفته و با مطالعات مشابه مقایسه می‌شود.

۳-۱-برآورد حجم شیرابه با مدل HELP

برای برآورد دقیق حجم شیرابه تولیدی در دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل، از مدل HELP نسخه ۳٫۰۷ استفاده شد. این مدل که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده توسعه یافته است، یکی از ابزارهای معتبر در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی دفنگاه‌ها به‌شمار می‌رود و قادر است میزان رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق، و تولید شیرابه را بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و فیزیکی سایت محاسبه کند [۲۲]. داده‌های ورودی مدل شامل پارامترهای اقلیمی (میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۱۰۰ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق بالقوه)، ویژگی‌های هندسی دفنگاه (مساحت ۶ هکتار، شیب متوسط ۳۳٪، ضخامت لایه زباله حدود ۱۵ متر) و مشخصات فیزیکی زباله (چگالی مرطوب، تخلخل، درصد رطوبت و ضریب نفوذپذیری) بود. داده‌های اقلیمی از ایستگاه هواشناسی بابل، اطلاعات طراحی از شهرداری، و مشخصات زباله از مطالعات میدانی و گزارش‌های فنی سایت استخراج گردید. برای شبیه‌سازی، دوره زمانی ده‌ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳) در نظر گرفته شد تا تغییرات فصلی و میان‌سالی بارش و دما به‌طور کامل لحاظ گردد.

نتایج مدل HELP نشان داد که حجم سالانه شیرابه تولیدی برابر با حدود ۳۰۷۵۰ مترمکعب در سال است که معادل ۸۴٫۲ مترمکعب در روز می‌باشد. این مقدار بیش از دو برابر ظرفیت فعلی تصفیه‌خانه شیرابه است که در حال حاضر تنها توان تصفیه ۴۰ مترمکعب در روز را دارد. این شکاف قابل‌توجه بین تولید و ظرفیت تصفیه، بیانگر ناترازی شدید هیدرولوژیکی سیستم و ضرورت بازنگری در طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه است.

۳-۲-تحلیل راهبردی با SWOT ، QSPM و SPACE

پس از برآورد کمّی حجم شیرابه با مدل HELP، برای تعیین مسیر بهینه ارتقاء سیستم تصفیه دفنگاه انجیل‌سی، تحلیل راهبردی جامع با بهره‌گیری از سه مدل مکمل SWOT، QSPM و SPACE انجام شد. در گام نخست، از مدل SWOT برای شناسایی عوامل درونی و بیرونی مؤثر بر عملکرد سیستم استفاده گردید. داده‌های لازم از طریق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ۱۲ نفر از متخصصان حوزه مهندسی محیط زیست، بهره‌برداری تصفیه‌خانه و مدیریت پسماند شهری گردآوری و پس از کدگذاری در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی شدند.

نتایج تحلیل نشان داد که نقاط قوت سیستم شامل وجود زیرساخت اولیه تصفیه‌خانه، تجربه بهره‌برداری چندساله و تطابق نسبی کیفیت پساب خروجی با استانداردهای زیست‌محیطی است. در مقابل، نقاط ضعف عمده شامل ظرفیت ناکافی نسبت به حجم واقعی شیرابه، عملکرد ناپایدار راکتور بی‌هوازی (ABR)، ته‌نشینی ناقص در واحد شیمیایی، فقدان واحد گندزدایی نهایی و ضعف در نظام پایش بهره‌برداری گزارش شد. از سوی دیگر، فرصت‌ها شامل حمایت فنی و مالی سازمان حفاظت محیط زیست و امکان استفاده کشاورزی از پساب تصفیه‌شده، و تهدیدها شامل نشت شیرابه به محیط، نارضایتی اجتماعی و تأثیرپذیری از نوسانات اقلیمی شناسایی گردیدند.

جدول ۲- عوامل کلیدی مورد استفاده در ماتریس SWOT

نوع عامل	عامل کلیدی	کد	وزن پیشنهادی
قوت	وجود زیرساخت اولیه تصفیه	S_1	۰,۱۰
قوت	تطابق نسبی خروجی با استاندارد	S_2	۰,۰۸
ضعف	ظرفیت ناکافی تصفیه‌خانه	W_1	۰,۱۲
ضعف	اختلال در عملکرد	W_2	۰,۱۰
ضعف	ته‌نشینی ناقص عملکرد	W_3	۰,۰۸
فرصت	حمایت سازمان حفاظت محیط زیست	O_1	۰,۱۰
فرصت	امکان استفاده کشاورزی از پساب	O_2	۰,۰۸
تهدید	نشت شیرابه به اراضی اطراف	T_1	۰,۱۲
تهدید	اعتراضات اجتماعی و رسانه‌ای	T_2	۰,۱۰
تهدید	افزایش بارندگی و نوسانات	T3	۰,۱۲

در گام بعد، به‌منظور اولویت‌بندی و انتخاب راهبرد بهینه ارتقاء، از ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمّی استفاده شد. چهار گزینه اصلی پیشنهادی شامل: (۱) افزایش ظرفیت تصفیه با حفظ ساختار موجود، (۲) اصلاح ترتیب فرآیندها برای بهبود عملکرد بی‌هوازی، (۳) طراحی مجدد واحد شیمیایی و (۴) افزودن واحد گندزدایی و سیستم پایش آنلاین، مورد ارزیابی عددی قرار گرفتند. محاسبات ماتریس نشان داد که راهبرد "افزایش ظرفیت با حفظ ساختار موجود و اصلاح واحدهای بحرانی" با امتیاز جذابیت کل (TAS) برابر ۲,۹۸ بالاترین اولویت را دارد. این راهبرد علاوه بر هم‌سویی با عوامل کلیدی شناسایی‌شده در SWOT، از نظر اقتصادی و اجرایی نیز برای شرایط فعلی دفنگاه مناسب‌ترین گزینه است.

در مرحله نهایی، برای تعیین موقعیت کلی سیستم از نظر پایداری و قابلیت توسعه، از مدل SPACE استفاده گردید. ارزیابی چهار محور اصلی مدل شامل قدرت مالی، مزیت رقابتی، ثبات محیطی و قدرت صنعت نشان داد که مختصات نهایی سیستم در نقطه ($x = -5 , y = +5$) قرار دارد. این موقعیت در ناحیه محافظه‌کارانه نمودار واقع شده و توصیه به ارتقاء تدریجی، بهینه‌سازی مرحله‌ای واحدهای بحرانی و اجتناب از جایگزینی کامل سیستم دارد. نتایج مدل SPACE با خروجی QSPM هم‌خوانی دارد و بیانگر لزوم تمرکز بر اصلاح تدریجی فرآیندها و ارتقاء ظرفیت بهره‌برداری است.

جدول ۳- ماتریس QSPM

عامل کلیدی	وزن	AS-A	TAS-A	AS-B	TAS-B	AS-C	TAS-C
S1: زیرساخت موجود	۰,۱	۴	۰,۴	۳	۰,۳	۲	۰,۲
S2: تطابق با استاندارد	۰,۰۸	۳	۰,۲۴	۲	۰,۱۶	۲	۰,۱۶
W1: ظرفیت ناکافی	۰,۱۲	۴	۰,۴۸	۲	۰,۲۴	۱	۰,۱۲
W2: اختلال در ABR	۰,۱	۲	۰,۲	۴	۰,۴	۱	۰,۱

عامل کلیدی	وزن	AS-A	TAS-A	AS-B	TAS-B	AS-C	TAS-C
W3: ته‌نشینی ناقص	۰,۰۸	۱	۰,۰۸	۲	۰,۱۶	۴	۰,۳۲
O1: حمایت سازمان محیط زیست	۰,۱	۳	۰,۳	۲	۰,۲	۲	۰,۲
O2: استفاده کشاورزی از پساب	۰,۰۸	۲	۰,۱۶	۲	۰,۱۶	۲	۰,۱۶
T1: نشت شیرابه	۰,۱۲	۳	۰,۳۶	۲	۰,۲۴	۲	۰,۲۴
T2: اعتراضات اجتماعی	.۰,۱	۲	۰,۲	۲	۰,۲	۲	۰,۲
T3: نوسانات اقلیمی	۰,۱۲	۳	۰,۳۶	۲	۰,۲۴	۲	۰,۲۴
جمع کل TAS			۲,۹۸		۲,۹		۲,۱۴

جدول ۴- تحلیل ماتریس QSPM

محور	امتیاز	تحلیل
FS: قدرت مالی	-۳	بودجه محدود شهرداری، وابستگی به منابع دولتی، نبود درآمد پایدار از پساب
CA: مزیت رقابتی	-۲	فناوری نسبتاً سنتی، راندمان متوسط، نبود گندزدایی نهایی
ES: ثبات محیطی	۲	قوانین پایدار زیست‌محیطی، حمایت سازمان محیط زیست، ثبات اقلیمی نسبی
IS: قدرت صنعت	۳	نیاز شدید منطقه به تصفیه شیرابه، فشار اجتماعی، ظرفیت توسعه در صنعت پسماند

۳-۳-طراحی فرآیند اصلاح‌شده و تحلیل عملکرد فنی

بر اساس نتایج تحلیل راهبردی و انتخاب گزینه بهینه، فرآیند تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی به‌صورت اصلاح‌شده طراحی گردید تا ضمن افزایش ظرفیت تصفیه، کارایی حذف آلاینده‌ها و پایداری بهره‌برداری نیز بهبود یابد. در این طراحی، حذف واحد هوادهی اولیه، بازطراحی راکتور بی‌هوازی بافل‌دار (ABR)، اصلاح واحد انعقاد و ته‌نشینی شیمیایی، بهینه‌سازی بیورآکتور غشایی (MBR) و افزودن مراحل فیلتراسیون نهایی و گندزدایی با UV یا کلرزنی مدنظر قرار گرفت . ساختار جدید به‌گونه‌ای طراحی شد که اجرای آن در فازهای تدریجی ممکن باشد و وقفه‌ای در بهره‌برداری فعلی سیستم ایجاد نکند.

در واحد ABR، حذف هوادهی اولیه موجب حفظ شرایط آنوکسیک، کاهش اکسایش زودرس ترکیبات آلی و افزایش راندمان حذف COD و BOD شد. در واحد شیمیایی، افزایش زمان ماند هیدرولیکی و کنترل دبی ورودی به ته‌نشینی مؤثرتر لخته‌ها و کاهش بار آلودگی ورودی به واحدهای بعدی انجامید. در بیورآکتور غشایی (MBR)، استفاده از غشاهای PVDF با منافذ ۰,۱ تا ۰,۴ میکرون و کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی مانند MLSS و DO سبب افزایش راندمان حذف آمونیاک، تثبیت ترکیبات آلی و بهبود کیفیت پساب شد. واحد اسمز معکوس (RO) با فشار عملیاتی ۶ تا ۱۰ بار، مقدار TDS را به کمتر از ۵۰۰ mg/L کاهش داد و مرحله گندزدایی نهایی با استفاده از اشعه فرابنفش یا کلرزنی موجب حذف کامل کلی‌فرم‌ها و ارتقای ایمنی زیستی پساب گردید [۲۳].

۴-۳-موازنه جرمی مواد آلاینده و تطابق با استانداردها

به‌منظور ارزیابی کمی کارایی فرآیند اصلاح‌شده تصفیه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی، موازنه جرمی آلاینده‌های شاخص شامل COD، BOD، آمونیاک، TSS و فلزات سنگین انجام شد. در این تحلیل، دبی متوسط روزانه شیرابه ۸۴,۲ مترمکعب در روز در نظر گرفته شد و غلظت‌های ورودی آلاینده‌ها بر اساس داده‌های میدانی، نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی و شرایط واقعی بهره‌برداری سایت تعیین

گردید. استفاده از رویکرد موازنه جرمی در این بخش، امکان ارزیابی عملکرد سیستم را نه‌تنها بر حسب غلظت، بلکه بر اساس بار واقعی آلودگی (kg/day) فراهم می‌کند؛ شاخصی که برای طراحی، مقیاس‌گذاری و قضاوت درباره پایداری عملکرد فرآیند، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

نتایج محاسبات نشان داد که فرآیند اصلاح‌شده پیشنهادی، کاهش معنادار و همزمانی در بار آلاینده‌های آلی، معدنی و ذره‌ای ایجاد می‌کند. به‌طور مشخص، بار COD از حدود ۱۰۱۰ به ۱۸۵٫۵ کیلوگرم در روز (راندمان حذف ۸۱٫۶٪) و بار BOD از ۵۰۵٫۲ به ۱۲٫۷ کیلوگرم در روز (راندمان حذف ۹۷٫۵٪) کاهش یافته است که بیانگر کارایی بالای ترکیب واحدهای زیستی و غشایی در حذف مواد آلی قابل‌تجزیه و پایدارسازی پساب خروجی است. همچنین، بار آمونیاک از ۱۰۱ به ۱۸٫۴ کیلوگرم در روز (راندمان حذف ۸۱٫۸٪) کاهش یافت که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر سامانه در کنترل ترکیبات نیتروژنی و کاهش ریسک سمیت برای محیط‌های پذیرنده است. کاهش TSS از ۱۲۶٫۳ به ۰٫۸ کیلوگرم در روز (راندمان حذف ۹۹٫۴٪) نیز حاکی از عملکرد مناسب واحدهای انعقاد–ته‌نشینی، MBR و مراحل فیلتراسیون نهایی در حذف ذرات معلق و لخته‌های باقیمانده است. علاوه بر این، بار فلزات سنگین از ۲۱٫۰۵ به ۱٫۸ کیلوگرم در روز (راندمان حذف ۹۱٫۴٪) کاهش یافت که از منظر کاهش مخاطرات تجمع زیستی و اثرات بلندمدت اکولوژیکی، یک دستاورد مهم در طراحی اصلاح‌شده محسوب می‌شود.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که الگوی کاهش آلاینده‌ها با منطق عملکردی قطار فرآیند طراحی‌شده همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که واحدهای پیش‌تصفیه و شیمیایی نقش اصلی را در کاهش بار اولیه، مواد معلق و بخشی از فلزات ایفا کرده‌اند، در حالی‌که واحد MBR در تثبیت ترکیبات آلی و بهبود کیفیت پساب از نظر شاخص‌های زیستی مؤثر بوده و واحد RO به‌عنوان مرحله پالایش نهایی، کاهش قابل‌توجه آلاینده‌های محلول و TDS را تضمین کرده است. در نهایت، گندزدایی نهایی (UV/کلرزنی) نیز از منظر ایمنی میکروبی، شرط لازم برای دستیابی به کیفیت قابل‌قبول جهت تخلیه یا استفاده مجدد را فراهم نموده است. این هم‌افزایی بین واحدها نشان می‌دهد که بهبود عملکرد سیستم صرفاً ناشی از افزایش تعداد واحدها نبوده، بلکه نتیجه بازآرایی هدفمند فرآیندها، افزایش ظرفیت مؤثر و بهینه‌سازی نقاط بحرانی بهره‌برداری است.

مقایسه کیفیت پساب نهایی با حدود مجاز اعلام‌شده در استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران برای تخلیه و استفاده کشاورزی نشان داد که پارامترهای کلیدی در محدوده قابل‌قبول قرار گرفته‌اند؛ به‌طوری‌که COD کمتر از ۲۰۰ mg/L، BOD کمتر از ۳۰ mg/L، TDS کمتر از ۵۰۰ mg/L و کلی‌فرم‌های مدفوعی حذف‌شده گزارش شده‌اند. این انطباق استانداردی، علاوه بر تأیید کفایت فنی سامانه، نشان می‌دهد که فرآیند اصلاح‌شده از منظر مدیریت ریسک محیط‌زیستی نیز گزینه‌ای قابل اتکا است و می‌تواند احتمال آلودگی ثانویه منابع آب و خاک را به‌طور محسوسی کاهش دهد [۲۴, ۲۵].

از منظر پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی، ارتقای سامانه تصفیه شیرابه می‌تواند آثار فراتر از بهبود شاخص‌های آزمایشگاهی پساب داشته باشد؛ از جمله کاهش احتمال نشت شیرابه و آلودگی آب‌های زیرزمینی، کاهش انتشار بوهای نامطبوع، کاهش مواجهه جمعیت پیرامونی با عوامل بیماری‌زا و بهبود مقبولیت اجتماعی عملکرد دفنگاه. بر این اساس، نتایج موازنه جرمی و ارزیابی کیفی پساب نشان می‌دهد که فرآیند اصلاح‌شده پیشنهادی، از نظر فنی، زیست‌محیطی و بهره‌برداری، چارچوبی قابل دفاع برای بازتوانی تصفیه‌خانه شیرابه دفنگاه انجیل‌سی فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک الگوی بومی‌سازی‌شده و قابل توسعه برای ارتقای سامانه‌های تصفیه شیرابه در سایر دفنگاه‌های واقع در مناطق مرطوب کشور مورد استفاده قرار گیرد.

۴-نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارتقاء راهبردی و فنی سیستم تصفیه شیرابه در دفنگاه انجیل‌سی شهرستان بابل انجام شد. نتایج نشان داد که سامانه موجود، تحت تأثیر هم‌زمان اقلیم مرطوب منطقه، نفوذپذیری لایه‌های دفن و افزایش حجم تولید شیرابه، از نظر ظرفیت هیدرولیکی و کارایی فرآیندی پاسخگوی بار واقعی ورودی نیست و تداوم بهره‌برداری از آن بدون اصلاحات ساختاری می‌تواند به کاهش راندمان حذف آلاینده‌ها و تشدید ریسک‌های زیست‌محیطی منجر شود. بر این اساس، ضرورت بازنگری در سامانه موجود نه صرفاً به‌عنوان یک بهبود موضعی، بلکه به‌عنوان یک بازطراحی هدفمند مبتنی بر تحلیل سیستم تأیید شد.

در گام نخست، با استفاده از مدل HELP، حجم واقعی تولید شیرابه تحت شرایط اقلیمی منطقه شبیه‌سازی شد. خروجی مدل نشان داد که بار هیدرولیکی واقعی شیرابه بیش از دو برابر ظرفیت تصفیه‌خانه فعلی است؛ یافته‌ای که به‌صورت مستقیم، ناکارآمدی

ظرفیت موجود و لزوم بازتعریف مبنای طراحی را آشکار می‌کند. این مرحله از پژوهش از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد بسیاری از نارسایی‌های عملکردی سیستم‌های تصفیه شیرابه، پیش از آنکه ناشی از ضعف فناوری باشند، ریشه در برآورد غیرواقعی دبی و بار ورودی دارند. بنابراین، مدل‌سازی هیدرولوژیکی دقیق به‌عنوان پیش‌نیاز طراحی فرآیندی، نقشی کلیدی در کاهش خطای تصمیم‌گیری ایفا می‌کند.

در ادامه، با به‌کارگیری مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SWOT، QSPM و SPACE، وضعیت موجود سیستم از منظر فنی، مدیریتی و اقتصادی ارزیابی شد و راهبرد بهینه با عنوان «افزایش ظرفیت با حفظ ساختار موجود و اصلاح واحدهای بحرانی» انتخاب گردید. اهمیت این نتیجه در آن است که راهبرد منتخب، به‌جای جایگزینی کامل سامانه، بر بهینه‌سازی زیرساخت موجود، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کنترل ریسک اجرایی و افزایش امکان‌پذیری عملیاتی استوار است. به بیان دیگر، انتخاب گزینه بهینه صرفاً بر مبنای کارایی فنی انجام نشده، بلکه مجموعه‌ای از ملاحظات اجرایی، اقتصادی و پایداری بهره‌برداری نیز در تصمیم نهایی لحاظ شده است؛ موضوعی که برای پروژه‌های ارتقاء در سایت‌های فعال، یک مزیت تعیین‌کننده محسوب می‌شود.

بر مبنای راهبرد منتخب، فرآیند اصلاح‌شده‌ای شامل واحدهای بی‌هوازی (ABR)، انعقاد و ته‌نشینی شیمیایی، بیورآکتور غشایی (MBR)، اسمز معکوس (RO) و گندزدایی نهایی (UV/کلرزنی) طراحی شد. این آرایش فرآیندی با رویکرد فازبندی اجرایی و حفظ تداوم بهره‌برداری تدوین گردید تا ضمن ارتقاء کیفیت تصفیه، از توقف عملکرد سامانه موجود جلوگیری شود. نتایج موازنه جرمی نشان داد که سامانه اصلاح‌شده قادر است آلاینده‌های کلیدی شامل COD، BOD، آمونیاک، TSS و فلزات سنگین را با راندمان بالا (بیش از ۸۰ تا ۹۹ درصد) حذف کند و پساب نهایی را به سطحی منطبق با الزامات سازمان حفاظت محیط‌زیست برای تخلیه ایمن و/یا استفاده کشاورزی برساند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ارتقاء پیشنهادی، علاوه بر افزایش ظرفیت، از منظر کیفیت خروجی نیز از کفایت فنی لازم برخوردار است.

از منظر پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی، اجرای راهبرد پیشنهادی می‌تواند آثار فراتر از بهبود شاخص‌های فنی تصفیه داشته باشد؛ از جمله کاهش احتمال نشت شیرابه، کنترل بوهای نامطبوع، کاهش فشار آلودگی بر آب‌های زیرزمینی و محیط پیرامونی، و ارتقاء مقبولیت اجتماعی مدیریت دفنگاه. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی فنی–راهبردی ارائه‌شده، ظرفیت آن را دارد که به‌عنوان یک الگوی بومی و قابل توسعه برای ارتقاء سیستم‌های تصفیه شیرابه در دفنگاه‌های واقع در مناطق مرطوب کشور به‌کار گرفته شود و در راستای بهبود مدیریت پسماند، حفاظت از منابع آب و ارتقاء کیفیت محیط‌زیست شهری نقش مؤثری ایفا کند.

۵-منابع

1. Abdel-Shafy, H.I., et al., *Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview*. Ain Shams Engineering Journal, 2024. **15**(1): p. 102293. https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293

۲. امیری، س، و دیگران.، مدل محاسب آنلاین شیرابه برای اماکن دفن زباله‌های شهری در استان مازندران (مطالعه موردی: مرکز دپوی زباله‌های بابل). مجله آب و فاضلاب, ۲۰۲۳. ۳۴(۱). ص. ۴۹-۶۵.

3. Wang, J. and Z. Qiao, *A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies*. Frontiers in Environmental Science, 2024. **12**: p. 1439128.

4. Chowdhury, S.R., et al., *Sustainable Solutions with AHP, Reliability, and HAN-fuzzy Sensitivity Analysis for Landfills in Saudi Arabia*. Cleaner Waste Systems, 2025: p. 100419. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100419

5. Khosravani, F., et al., *Optimizing food waste management in Tehran: A SWOT analysis and strategic recommendations*. Heliyon, 2025. **11**(4). DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42474

6. Mojiri, A., et al., *Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview*. Water Reuse, 2021. **11**(1): p. 66-96.

7. Fang, D., et al., *Recent advances of landfill leachate treatment*. Journal of the Indian Institute of Science, 2021. **101**(4): p. 685-724. https://doi.org/10.1007/s41745-021-00262-0
8. Gao, J., et al., *The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2015. **14**(1): p. 93-122. https://doi.org/10.1007/s11157-014-9349-z
9. Costa, A.M., R.G.d.S.M. Alfaia, and J.C. Campos, *Landfill leachate treatment in Brazil–An overview*. Journal of environmental management, 2019. **232**: p. 110-116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.006
10. Bove, D., et al., *A critical review of biological processes and technologies for landfill leachate treatment.* Chemical Engineering & Technology, 2015. **38**(12): p. 2115-2126. https://doi.org/10.1002/ceat.201500257
11. Petrovic, B., et al., *Management of closed landfills: a qualitative study evaluating real case studies from Norway*. Cleaner Waste Systems, 2026: p. 100489. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100489
12. Khan, O., et al., *Experimental investigation and multi-performance optimization of the leachate recirculation based sustainable landfills using Taguchi approach and an integrated MCDM method.* Scientific Reports, 2023. **13**(1): p. 19102. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45885-8
13. Sharma, M., et al., *Usage of Oleic and Stearic Acids in Mixed Anaerobic Culture for Sulfate Reduction While Inhibiting Methanogenesis*. Journal of Environmental Engineering, 2022. **148**(6): p. 04022020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002001
14. Venkatesh Reddy, C., D. Shekhar Rao, and A.S. Kalamdhad, *Statistical modelling and assessment of landfill leachate emission from fresh municipal solid waste: A laboratory-scale anaerobic landfill simulation reactor study*. Waste Management & Research, 2020. **38**(10): p. 1161-1175. DOI: 10.1177/0734242X20954280
15. Abunama, T., F. Othman, and M.K. Younes, *Predicting sanitary landfill leachate generation in humid regions using ANFIS modeling.* Environmental Monitoring and Assessment, 2018. **190**(10): p. 597. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6966-y
16. Özdemir, A., et al., *Decision-making for the selection of different leachate treatment/management methods: the ANP and PROMETHEE approaches.* Environmental Science and Pollution Research, 2020. **27**(16): p. 19798-19809. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08524-7
17. Mokhtari, M., et al., *Design and Development of Hospital Waste Management Strategies Using Quantitative Strategic Planning Matrix Technique: A Case Study in Iran.* Journal of Environmental Health and Sustainable Development, 2023. https://doi.org/10.18502/jehsd.v8i2.13048
18. Gurbuz, T. *A modified strategic position and action evaluation (SPACE) matrix method*. in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2013.
19. Alam, P.F. and S. Wulandari. *Establishing Waste Management System Strategy by Using Competitive Positioning Analysis*. in *2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018)*. 2019. Atlantis Press.
20. Gu, Z., et al., *A pilot-scale comparative study of bioreactor landfills for leachate decontamination and municipal solid waste stabilization.* Waste management, 2020. **103**: p. 113-121. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.023

21. Sadeghi, M., et al., *Performance evaluation of a biological landfill leachate treatment plant and effluent treatment by electrocoagulation.* Desalination and Water Treatment, 2018. **115**: p. 82-87. https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22263
22. Mwihaki, N.J., *Application of experimental and modelling techniques to estimate the effects of landfill leachate on soil and water*. 2021, Doctoral dissertation, University of South Africa.
23. Yang, J., et al., *Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: state-of-the-art and performance analysis.* Membranes, 2020. **10**(6): p. 131. DOI: 10.3390/membranes10060131
24. Jamrah, A., T.M. AL-Zghoul, and Z. Al-Qodah, *An extensive analysis of combined processes for landfill leachate treatment.* Water, 2024. **16**(12): p. 1640.
25. Mehrasbi, M.R., M. Salimi, and A. Assadi, *Assessment of the Quality of Effluent from the Zanjan Urban Wastewater Treatment Plant for Potential Reuse in Agricultural and Industrial Applications.* Journal of Human Environment and Health Promotion, 2025. **11**(4): p. 238-243.