Archive of SID

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

Case Study

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.3, pp: 51-67

Investigating the Sustainability Improvement of Municipal Wastewater Treatment Plants using the eco-Efficiency Index: Case Study Mashhad

S. Alizadeh[1], H. Zafari Koloukhi[2], M. Rouhbakhsh[2], F. Rostami[3], A. Avami[4]

1. MSc. Student, Energy Systems Engineering Group,
Dept. of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2. Expert, Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran
3. Former Graduate Student, Energy Systems Engineering Group,
Dept. of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
4. Assist. Prof., Energy Systems Engineering Group, Dept. of Energy Engineering,
Sharif University of Technology, Tehran, Iran
(Corresponding Author) avami@sharif.edu

(Received Feb, 8, 2019 Accepted Sep. 17, 2019)

To cite this article:
Alizadeh, S., Zafari Koloukhi, H., Rouhbakhsh, M., Rostami, F., Avami, A. 2020. "Investigating the sustainability improvement of municipal wastewater treatment plants using the eco-efficiency index: case study Mashhad" Journal of Water and Wastewater, 31(3), 51-67. Doi: 10.22093/wwj.2019.171317.2828. (In Persian)

Abstract

Wastewater treatment plants require the use of materials and energy, manpower, and initial investment to carry out the treatment and disposal of contaminants. In the present study, the economic and environmental aspects of Al-Teymour and KhinArab wastewater treatment plants have been evaluated using the eco-efficiency index. The results represent that the eco-efficiency index of KhinArab treatment plant based on the removed organic matter and nutrients, as well as the environmental impacts of the life cycle is greater than Al-Teymour treatment plant. In order to improve sustainability, three scenarios are analyzed including the construction of composting unit, reduction of energy consumption, and reduction of chlorination. The results show that if the removed organic load or nutrients are selected as the environmental index, the first scenario with the eco-efficiency index of 0.09 and 0.14 million Rials per the removed organic load or 1.22 and 1.48 million Rials per the removed nutrients, it is the most suitable option for Al-Teymour and KhinArab treatment plants, respectively. In addition, if the eco-efficiency index based on life cycle environmental impacts is considered, the second scenario is the best option with eco-efficiency index of 2.44×10^3 and 2.90×10^3 million Rials per the environment impact index of the life cycle for Al-Teymour and KhinArab treatment plants, respectively. This study represents that the WWTPs should be considered not only from an environmental viewpoint but also from an economic viewpoint; as a result, in order to provide a comprehensive analysis of the WWTPs, these two aspects should be considered together.

Keywords: Sustainability, Wastewater, Treatment Plant, Eco-Efficiency.

www.SID.ir

Archive of SID
doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۳، صفحه: ۶۷-۵۱

بررسی افزایش پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری با شاخص اکو-بهره‌وری: مثال موردی شهر مشهد

صادق علی‌زاده[۱]، حمید ظفری کلوخی[۲]، مسعود روحبخش[۲]، فاطمه رستمی[۳]، اکرم عوامی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- کارشناس شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۴- استادیار، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) avami@sharif.edu

(دریافت ۹۷/۱۱/۱۹ پذیرش ۹۸/۶/۲۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
علی‌زاده، ص.، ظفری کلوخی، ح.، روحبخش، م.، رستمی، ف.، عوامی، ا.، ۱۳۹۹، "بررسی افزایش پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری با شاخص اکو- بهره‌وری: مثال موردی شهر مشهد" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۳)، ۶۷-۵۱. **Doi: 10.22093/wwj.2019.171317.2828**

چکیده

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌منظور انجام عملیات تصفیه و دفع آلودگی‌ها در کنار سرمایه‌گذاری اولیه، نیازمند مصرف مواد و انرژی و نیروی انسانی هستند. در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص اکو-بهره‌وری به ارزیابی جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین‌عرب پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه خین‌عرب برپایه مقدار بار آلی و مواد مغذی حذف شده و همچنین اثرات محیط زیستی چرخه عمر بزرگ‌تر از تصفیه‌خانه التیمور است. به‌منظور بهبود پایداری، سه سناریوی احداث واحد تولید کمپوست کشاورزی، کاهش مصرف انرژی و کاهش کلرزنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگر بار آلی و یا مواد مغذی حذف شده به‌عنوان شاخص محیط زیستی انتخاب شود، سناریوی اول با شاخص اکو-بهره‌وری ۰/۰۹ و ۰/۱۴ میلیون ریال بر بار آلی حذف شده و یا ۱/۲۲ و ۱/۴۸ میلیون ریال بر مواد مغذی حذف شده، به‌ترتیب برای تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب، مناسب‌ترین گزینه است. همچنین اگر شاخص اکو-بهره‌وری با اثرات محیط زیستی چرخه عمر مورد توجه قرار گیرد، سناریوی دوم با شاخص اکو-بهره‌وری $۲/۴۴\times۱۰^{۳}$ و $۲/۹۰\times۱۰^{۳}$ میلیون ریال بر شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر به‌ترتیب برای تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب بهترین گزینه است. این مطالعه نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نه تنها از منظر محیط‌زیستی، بلکه باید از دیدگاه اقتصادی نیز مورد توجه قرار بگیرند؛ در نتیجه، به‌منظور ارائه یک تحلیل و تجزیه جامع از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، این دو جنبه باید با یکدیگر در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: پایداری، فاضلاب، تصفیه‌خانه، اکو-بهره‌وری

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

۱- مقدمه

تصفیه فاضلاب به‌عنوان یک شکل خاص از فعالیت‌های تولیدی از انرژی و مواد برای تأمین خدمات تصفیه فاضلاب و همچنین دفع آلودگی‌ها استفاده می‌کند (Dong et al., 2017).

احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کنار هزینه‌های مرسوم خود، پتانسیل لازم برای ایجاد درآمد مستقیم مانند فروش پساب خروجی و همچنین تولید و فروش کمپوست کشاورزی را دارند؛ علاوه بر این درآمدهای مستقیم، مدیریت و تصفیه فاضلاب، منافعی را تحت عنوان هزینه‌های اجتناب شده ایجاد می‌کند. هزینه‌های عدم اقدام در این خصوص می‌توانند به‌صورت منافع از دست‌رفته در نتیجه رهاسازی فاضلاب بدون هیچگونه اقدام تصفیه‌ای باشد. به‌عبارت دیگر اگر فاضلاب بدون تصفیه و یا با تصفیه کمتر از حد لازم در طبیعت رها شود، هزینه‌هایی ایجاد خواهد شد و یا منافعی از دست خواهد رفت (Majed and Golzary-Ghalejoughi, 2016).

در واقع کاهش کیفیت آب، تولیدات صنعتی، تولیدات کشاورزی، فعالیت‌های صیادی و حتی خدمات فرهنگی-اجتماعی ارائه شده توسط آب و منابع آبی، مثل گردشگری و تفریحات آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه جمع‌آوری، تصفیه و استفاده مجدد و یا دفع مناسب فاضلاب می‌تواند مزایای محیط زیستی، بهداشتی، فرهنگی-اجتماعی و اقتصادی را به همراه داشته باشد.

منافع بالقوه تصفیه فاضلاب می‌توانند در دو طبقه کلی قرار گیرند، که شامل منافع بازاری و منافع غیربازاری است. به‌دلیل این‌که برخی از این مزایا قیمت بازاری ندارند، به‌طور مرسوم در تجزیه و تحلیل مالی پروژه‌های تصفیه فاضلاب مورد توجه قرار نمی‌گیرند، بنابراین تمام مزایای ایجاد شده در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه تخلیه فاضلاب، بدون تصفیه و یا با تصفیه ناکافی، شامل هزینه‌های قابل توجه محیط زیستی، بهداشتی، اجتماعی و اقتصادی می‌شود. هزینه‌های اجتناب شده یا عدم‌اقدام یا عدم تصفیه فاضلاب به سه دسته تقسیم می‌شوند؛ که عبارتند از اثرات نامطلوب بر سلامتی انسان، اثرات مضر بر محیط زیست و اثرات بالقوه منفی بر فعالیت‌های اقتصادی(HernáNdez-Sancho et al., 2015).

گرچه هدف اصلی از تأسیسات تصفیه فاضلاب، حفاظت از محیط زیست آبی است، اما آن‌ها همواره تولید آلاینده مایع، ضایعات جامد و آلاینده‌های گازی دارند که در محدوده وسیعی از محیط تأثیر می‌گذارند. بنابراین، نیاز به یک روش جامع و قوی برای ارزیابی اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای رسیدن به پایداری وجود دارد (Dong et al., 2017). اکو-بهره‌وری به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای ترویج تحول از توسعه غیرپایدار به توسعه پایدار پیشنهاد شده است (Yu et al., 2013).

هر حوزه مورد مطالعه، نیازمند تعریف خاصی از این شاخص است و از این‌رو شاخص از پیش تعریف شده‌ای برای مفهوم اکو-بهره‌وری وجود ندارد. شورای جهانی تجارت برای توسعه پایدار[1]، مفهوم اکو-بهره‌وری را در سال ۱۹۹۱ ارائه داد. اکو-بهره‌وری بر پایه اصول استفاده از روش‌ها و تکنولوژی‌های تولید با بهره‌وری بالا، استفاده کمتر از منابع طبیعی و انرژی برای همان مقدار تولید و تولید با ضایعات کمتر بنا شده است. کارشناسان علمی و آکادمیک نیز، اصطلاح اکو-بهره‌وری را تلفیقی از بهره‌وری اقتصادی و محیط زیستی در موازات هم می‌دانند (Robert et al., 2003).

به‌طور کلی شاخص اکو-بهره‌وری از ارزیابی دو جنبه محیط زیستی و اقتصادی به دست می‌آید. بهبود شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نه تنها شامل افزایش بهره‌وری در حذف آلاینده‌ها و کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای می‌شود بلکه کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را در پی خواهد داشت (Molinos-Senante et al., 2016).

در کشورهای مختلف، در چند سال اخیر مطالعات اقتصادی-محیط زیستی متفاوتی با تکیه بر مفهوم اکو-بهره‌وری در زمینه تصفیه‌خانه فاضلاب صورت گرفته است. برای نمونه توجا و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از دو رویکرد تحلیل چرخه عمر[2] و هزینه چرخه عمر[3] به‌ترتیب به ارزیابی محیط زیستی و اقتصادی ۲۲ تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا پرداختند و بر اساس این دو ارزیابی، آنها را در سه دسته کلی اقتصادی- محیط زیستی A، B و C طبقه‌بندی کردند به‌طوری که سطح A به معنای بهترین سطح عملکرد تصفیه‌خانه است. در نهایت با استفاده از همین طبقه‌بندی، تصفیه‌خانه‌ها را در سطوح مختلف شاخص اکو-بهره‌وری مرتب و دسته‌بندی کردند. همچنین نتایج آنها نشان داد که تفاوت‌های

[1] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)
[2] Life Cycle Analysis (LCA)
[3] Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

www.SID.ir

Archive of SID
dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

اساسی بین تصفیه‌خانه‌های مختلف وجود دارد که بستگی به عوامل مختلفی از جمله اندازه تصفیه‌خانه و یا سایر محدودیت‌های حاکم بر تخلیه فاضلاب دارد (Lorenzo-Toja et al., 2016).

توجا و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهش خود، مجموعه ۴۷ تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا را با توجه به عملکرد چهار ساله آنها و با استفاده از رویکردهای تحلیل چرخه عمر و تحلیل پوششی داده‌ها[1] مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها نه تنها به ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌ها پرداختند، بلکه عوامل و متغیرهای موقتی زیادی که ممکن است بر روی آنها اثر بگذارند را مورد بررسی قرار دادند. این کار با هدف بررسی و درک رفتار سالانه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در رابطه با پایداری محیط زیستی صورت گرفت (Lorenzo-Toja et al., 2017).

توجا و همکاران در سال ۲۰۱۵ با ترکیب مدل تحلیل چرخه عمر و تحلیل پوششی داده‌ها به ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری ۹۰ تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا پرداختند. آنها با توجه به مزایای محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و همچنین اثرات محیط زیستی ناشی از مصرف مواد شیمیایی، مصرف انرژی و تولید لجن در فرایندهای تصفیه‌خانه‌ها، شاخص اکو-بهره‌وری را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (Lorenzo-Toja et al., 2015).

دانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب چین را با استفاده از رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها و تمرکز بر روی اثر محیط زیستی تغییر اقلیم، ارزیابی کردند. آنها در ارزیابی خود، اثرات محیط‌زیستی در طی فرایندهای تصفیه فاضلاب را در نظر گرفتند. بر اساس ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری، عواملی که به‌طور قابل توجهی بر اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اثر می‌گذارند، مورد بحث و بررسی قرار گرفت (Dong et al., 2017).

در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی برای اولین بار مدل WRDDM[2] برای ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری ۳۰ تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا به‌کار برده شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که تقریباً نیمی از تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه، در تأسیسات خود، قابلیت بهبود شاخص اکو-بهره‌وری را دارند (Molinos-Senante et al., 2016).

در این پژوهش به ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری دو تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور و خین‌عرب در شهر مشهد پرداخته شد. مفهوم اکو-بهره‌وری برای کمّی کردن منافع اقتصادی و محیط‌زیستی این دو تصفیه‌خانه به‌کار گرفته شد تا بتوان به ارزیابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در شهر مشهد پرداخت. مطالعه حاضر روش‌شناسی نوینی را برای ارزیابی پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور با در نظرگیری هزینه‌های عدم اقدام و اجتناب آن‌ها ارائه می‌دهد. در بخش دوم این مقاله، ابتدا هزینه‌ها و درآمدهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارزیابی می‌شود و سپس شاخص‌های محیط زیستی مورد استفاده مطرح خواهند شد و در بخش سوم، سناریوهای مورد مطالعه تعریف و نتایج ارائه می‌شوند. بخش چهارم نیز به نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها و پیشنهادها برای بهبود پایداری تصفیه‌خانه‌ها اختصاص دارد.

۲- روش پژوهش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی است که حدود ۲۰۴ کیلومتر مربع وسعت دارد و بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد و در حوضه آبریز کشف‌رود قرار گرفته است. ارتفاع شهر از سطح دریا ۹۸۵ متر است (Statistical Center of Iran, 2019).

بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ این شهر با حدود سه میلیون نفر جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران است. علاوه بر این، این شهر سالانه پذیرای میلیون‌ها زائر و گردشگر است. با توجه به جمعیت و گردشگری در شهر مشهد، دفع غیربهداشتی فاضلاب یکی از مسائل مدیریت شهری آن است. در حال حاضر حدود ۲۷۰۰ کیلومتر شبکه فاضلاب در این شهر ایجاد شده است که ۶۱ درصد جمعیت شهر را پوشش می‌دهد؛ و ۲۶۳۰۰۰ مترمکعب در روز از فاضلاب شهری تصفیه می‌شود. با توجه به بار آلی بالای فاضلاب و وجود عنصر نیتروژن در این فاضلاب، توسعه روش‌های پیشرفته برای تصفیه فاضلاب و حذف مواد مضر آن و همچنین بازیابی مواد کاربردی از آن ضروری است.

فاضلاب قسمت شرق و مرکزی شهر مشهد که عمدهٔ مراکز تجاری و هتل‌های شهر در آن قرار دارند، به تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور جهت تصفیه انتقال می‌یابد. تصفیه‌خانه التیمور در ۲۵

[1] Data Envelopment Analysis (DEA)
[2] Weighted Russell Directional Distance Model

www.SID.ir

Archive of SID
dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

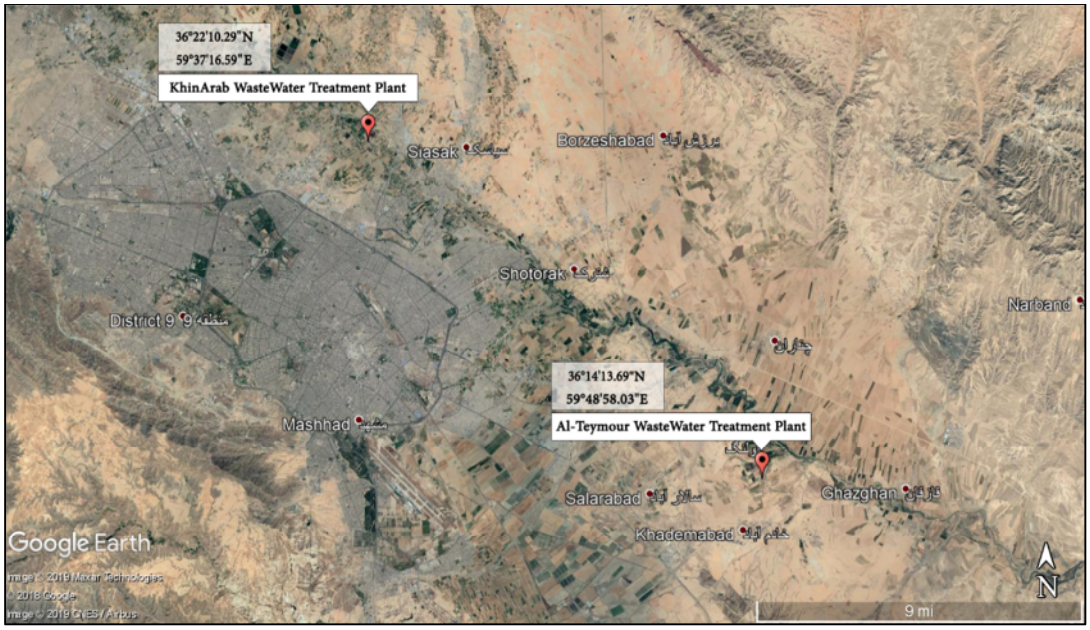

Fig. 1. The location of Al-Teymour and KhinArab wastewater treatment plants

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب

کیلومتری جنوب شرقی شهر مشهد واقع شده است. عملیات تصفیه در این تصفیه‌خانه از نوع MLE[1] است. محدوده تحت پوشش تصفیه‌خانه فاضلاب خین‌عرب مرکز شهر مشهد است. عملیات تصفیه در این تصفیه‌خانه از نوع SBR[2] پیشرفته با قابلیت حذف مواد مغذی است.

سیستم تصفیه SBR مبتنی بر لجن فعال است و بر اساس توالی چرخه‌هایی شامل دوره‌های پر کردن، هوادهی، ته‌نشینی و تخلیه عمل می‌کند و تمام فرایندهای تصفیه بیولوژیکی در یک مخزن انجام می‌شود (El-Gohary and Tawfik, 2009).

در فرآیند MLE نیز که اصلاح شده فرایند Ludzack-Ettinger است، برای فراهم کردن غلظت نیترات بیشتر در بخش غیرهوازی، یک خط برگشت از قسمت هوازی به بی‌هوازی قرار داده می‌شود که سبب افزایش میزان دنیتریفیکاسیون[3] و حذف کلی نیتروژن نسبت به فرایند Ludzack-Ettinger می‌شود (Jalilzadeh Yengejeh et al., 2014).

درحال حاضر پساب خروجی برای مصارف کشاورزی و احیای کشف‌رود استفاده می‌شود و لجن خروجی انباشت و ذخیره‌سازی می‌شود. در شکل ۱ موقعیت قرارگیری دو تصفیه‌خانه مذکور مشخص شده است.

۲-۲- مرزبندی

در پروژه AQUAENVEC اسپانیا، تحلیل چرخه آب شهری در شمال اسپانیا انجام شده است و تنها ۴ درصد از اثرات محیط زیستی و تقریباً ۱۶ درصد هزینه‌ها مربوط به مرحله ساخت و ساز بوده است (Lorenzo-Toja et al., 2016). لذا در این پژوهش، ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری بدون در نظر گرفتن مرحله ساخت تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب و شبکه‌های فاضلاب آن‌ها صورت می‌پذیرد. مرزهای مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مطالعه مبنای ارزیابی، عملکرد سال ۱۳۹۶، به‌عنوان سال پس از بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب در نظر گرفته شد.

۲-۳- شاخص اکو - بهره‌وری برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

ارزش‌گذاری پولی و تعیین هزینه‌های برخی از اثرات محیط زیستی تخلیه فاضلاب بدون تصفیه مناسب، بسیار دشوار است و حتی در بعضی موارد غیرممکن است. به‌طور مثال ارزش پولی درد ناشی از

[1] Modified Ludzack-Ettinger (MLE)
[2] Sequencing Batch Reactor (SBR)
[3] Denitrification

www.SID.ir

Archive of SID
dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

بیماری‌های مربوط به آب‌های آلوده را نمی‌توان به سادگی تعیین کرد. در جدول ۱ برخی از اثرات و هزینه‌های اجتناب شده ناشی از احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب آورده شده است.

شاخص اکو-بهره‌برداری تلفیقی از جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی یک پروژه است و معمولاً از تقسیم ارزش افزوده تولیدی بر اثر محیط زیستی به دست می‌آید. به‌منظور ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری، باید ارزش افزوده شکل گرفته توسط تصفیه‌خانه‌ها را بر شاخص محیط زیستی تقسیم کرد (معادله ۱). در پژوهش حاضر با استفاده از اطلاعات در دسترس، به ارزیابی جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین‌عرب پرداخته شد و در نهایت شاخص اکو- بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب از معادله ۱ محاسبه شد

$$EE = \frac{1-C}{EI} \qquad (۱)$$

که در آن

EE شاخص اکو-بهره‌وری، I مجموع درآمدها، C مجموع هزینه‌ها و EI شاخص محیط زیستی است.

در این پژوهش به‌منظور بررسی راهکارهای بهبود شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌های مورد بحث، سه سناریو علاوه بر حالت پایه تعریف شد. حالت پایه و سناریوهای تعریفی در نظر گرفته شده، در ادامه خلاصه شده‌اند.

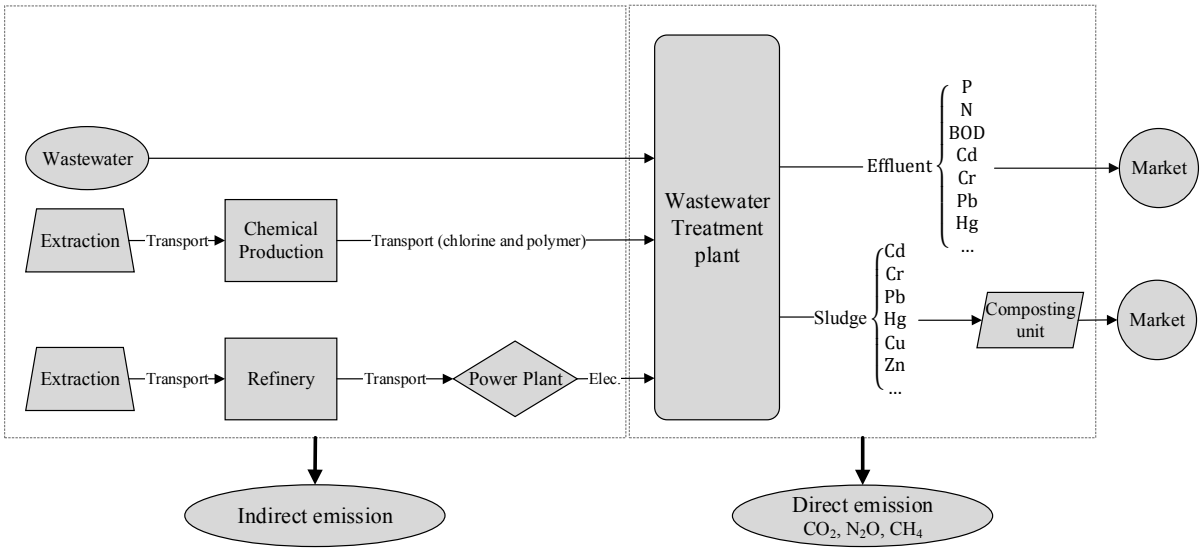

Fig. 2. The study boundaries of the eco-efficiency index assessment

شکل ۲- مرزبندی مطالعه ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری

جدول ۱- برخی از اثرات و هزینه‌های اجتناب شده ناشی از احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

Table 1. Some of the avoided effects and costs caused by the construction of wastewater treatment plants

No.	Description
1	Costs of treating diseases caused by the discharging of sewage
2	Costs of well drilling and discharging
3	Costs of existing undesirable chemicals in wastewater
4	Costs of reducing agricultural productivity
5	Reducing the number of tourists and reducing the willingness to pay for entertainment costs
6	Creating unattractive landscapes and reducing the value of land and residential areas in the area covered
7	Increasing the financial cost for health care and disease prevention
8	Negative effects on the morale, vitality and behavior of people living in the area

www.SID.ir

Archive of SID
dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828

حالت پایه: هزینه‌های عملیاتی (هزینه‌های مواد مصرف، انرژی و هزینه‌های پرسنلی و تعمیر و نگهداری)، هزینه‌های اجتناب و جایگزینی (هزینه‌های حفر و تخلیه چاه، هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی رهاسازی فاضلاب و هزینه‌های تخریب محیط زیستی) و درآمد حاصل از فروش پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها در حالت پایه در نظر گرفته شدند.

سناریو اول: در این سناریو علاوه بر موارد در نظر گرفته شده در حالت پایه، تولید و فروش کمپوست کشاورزی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

سناریو دوم و سوم: در این سناریوها به‌ترتیب تأثیر کاهش ۱۰ درصد از انرژی و کلر مصرفی، در شاخص اکو-بهره‌وری دو تصفیه‌خانه التیمور و خین‌عرب مورد تحلیل قرار گرفت.

۲-۴- ارزیابی جنبه اقتصادی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

با توجه به اطلاعات در دسترس و مرزهای مطالعه، هزینه‌ها و درآمدهای تصفیه‌خانه‌های مورد بحث به شرح جدول ۲ در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۴-۱- هزینه‌ها

در تصفیه فاضلاب، مواد شیمیایی و انرژی در مراحل مختلف تصفیه به کار برده می‌شوند. طبق پژوهشی که بر روی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در اتریش صورت گرفت، به‌طور متوسط ۱۱ تا ۱۷ درصد هزینه‌های تصفیه‌خانه مربوط به هزینه‌های انرژی و ۱۳ درصد از هزینه‌های عملیاتی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به هزینه‌های مواد مصرفی است (Haslinger et al., 2016).

دو ماده اصلی که در دو تصفیه‌خانه التیمور و خین‌عرب استفاده می‌شود، پلیمر و کلر است. از قیمت کلر در بازارهای جهانی استفاده شد که با توجه به میانگین نرخ دلار اعلام شده توسط بانک مرکزی در اول هر ماه از سال ۱۳۹۶ (۳۴۰۰۰ ریال=۱ دلار) قیمت ریالی آن تخمین زده شد. همچنین با توجه به اطلاعات در دسترس، مصرف برق تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب در سال ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۹۳۶۶ و ۱۲۷۳۶ مگاوات ساعت است.

از هزینه‌های پرسنلی و تعمیر و نگهداری می‌توان به‌عنوان عمده‌ترین هزینه بهره‌برداری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نام برد. بر طبق پژوهشی، بین ۳۴ تا ۳۸ درصد از هزینه‌های عملیاتی ناشی از هزینه‌های پرسنلی است (Haslinger et al., 2016).

با توجه به مصرف انرژی قابل توجه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نیاز است که انتشارات ناشی از تولید برق این تصفیه‌خانه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

بعضی از این گازهای منتشر شده مانند دی‌اکسید کربن در گرمایش جهانی نقش مهمی ایفا می‌کنند؛ انتشار بیش از حد این گاز گلخانه‌ای موجب برهم ریختن تعادل دمایی کره زمین

جدول ۲- هزینه‌ها و درآمدهای در نظر گرفته شده برای تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب

Table 2. The considered costs and revenues for Al-Teymour and KhinArab wastewater treatment plants

Parameter	Description
Costs	Energy costs (all scenarios)
	Costs of chemicals consumption
	Costs of staff and maintenance and operation (all scenarios)
	Environmental degradation costs (all scenarios)
	Costs of construction and operation of the composting unit (scenario 1)
Revenues	Effluent sale potential (all scenarios)
	Sludge sales potential as agricultural fertilizer (scenario 1)
	Reduce the costs of well drilling and discharging (all scenarios)
	Reduce the costs of treating diseases caused by the discharging of sewage (all scenarios)
	Reducing environmental degradation costs due to the removal or reduction of undesirable chemicals (all scenarios)

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

می‌شود. طبق گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم[1] انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از واکنش‌های صورت گرفته در تصفیه‌خانه‌ها به‌دلیل زیستی بودن منشا نشر آن جزء موارد انتشار گاز گلخانه‌ای محسوب نمی‌شود. بنابراین فقط انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف برق، به‌عنوان هزینه تخریب محیط زیستی، در این پژوهش محاسبه شده است. هزینه انتشار دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۱۶ برابر ۲۷ دلار به ازای یک تن دی‌اکسید کربن منتشر شده، در نظر گرفته شده است (Ahluwalia, 2017).

کل هزینه‌های سالانه در نظر گرفته شده با احتساب هزینه بیرونی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن برای دو تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور و خین‌عرب را می‌توان از معادله ۲ محاسبه کرد

$$C = \sum_{i=1}^{2} C_i = \sum_{i=1}^{2} C_{E,i} + C_{M,i} + C_{P,i} + C_{CO_2,i} \qquad (۲)$$

که در آن

C هزینه کل، i نشان‌دهنده هر یک از تصفیه‌خانه‌ها، $C_{E,i}$ هزینه انرژی، $C_{M,i}$ هزینه مواد مصرفی، $C_{P,i}$ هزینه پرسنلی و تعمیر و نگهداری و $C_{CO2,i}$ هزینه انتشار دی‌اکسید کربن در سال ۱۳۹۶، به عنوان سال مبنا است.

۲-۴-۲- درآمدها

۲-۴-۲-۱- پتانسیل فروش پساب

در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک منابع آب به‌طور فزاینده‌ای در حال کمیاب شدن است. هرگاه آب با کیفیت خوب کمیاب باشد، آب با کیفیت پایین مورد توجه قرار می‌گیرد (Hayati et al., 2016). یکی از بهترین این منابع، پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. البته یکی از مشکلات مهم در این زمینه، فاصله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از زمین‌های کشاورزی و هزینه انتقال پساب به مناطق مورد مصرف آن است؛ که در این مطالعه به‌دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی، از ارزیابی و تحلیل این بخش صرف نظر می‌شود. با توجه به مقادیر در دسترس برای دبی ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب، ضریب تبدیل فاضلاب ورودی به پساب خروجی با تقریب بسیار خوبی برابر یک فرض شده است؛ همچنین راندمان انتقال به بخش کشاورزی بر اساس گزارش‌های موجود در منطقه ۰/۹ فرض شده است. قیمت فروش پساب طبق گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، تعرفه‌های آب و خدمات وابسته در سال ۱۳۹۷، در نظر گرفته شد. درآمد حاصل از فروش پساب تولیدی را می‌توان از معادله ۳ به‌دست آورد

$$B_T = \sum_{i=1}^{2} TW_i \times k \times Pr_w \qquad (۳)$$

که در آن

B_T درآمد کل حاصل از فروش پساب، TW مقدار پساب تولیدی، k ضریب انتقال پساب، Pr_w قیمت فروش یک واحد پساب به بخش کشاورزی، در سال ۱۳۹۶ است. همچنین i نشان‌دهنده هر یک از تصفیه‌خانه‌ها است.

۲-۴-۳- هزینه‌های ناشی از حفر چاه و تخلیه آن

با این نگرش که به هر صورت فاضلاب شهری (خانگی و غیرخانگی) باید توسط بهره‌بردار دفع می‌شد، می‌توان هزینه‌های حفر چاه و تخلیه آن را به‌عنوان درآمد غیرمستقیم ناشی از احداث تصفیه‌خانه‌ها و شبکه فاضلاب تلقی کرد. به‌همین منظور بر اساس آمار و اطلاعات دریافتی از شرکت آب و فاضلاب مشهد در ۱۳۸۹ و با استفاده از شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی اعلام شده توسط بانک مرکزی، قیمت‌ها با ضریب ۳/۳۰۲۳ در سال ۱۳۹۶ تخمین زده شده‌اند. به این ترتیب هزینه‌های ناشی از حفر چاه و تخلیه آن در محدوده مورد بحث از معادله ۴ محاسبه می‌شود

$$B_W = \sum_{i=1}^{2} ROUND\left[\frac{POP_i}{I}\right] \times (C_{dr} + C_{dis}) \qquad (۴)$$

که در آن

B_W هزینه کل (درآمد جایگزینی) حفر و تخلیه چاه ناشی از احداث هر دو تصفیه‌خانه، POP جمعیت تحت پوشش هر تصفیه‌خانه، I بعد خانوار، c_{dr} هزینه حفر یک چاه، c_{dis} هزینه تخلیه سالانه یک چاه و i نشان‌دهنده هر تصفیه‌خانه است. در این ارزیابی فرض شده است تمام کاهش هزینه‌های مربوط حفر چاه در سال ۱۳۹۶، به‌عنوان سال مبنا پس از احداث تصفیه‌خانه‌ها اتفاق افتاده است.

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

۲-۴-۴- هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از تخلیه کنترل نشده فاضلاب

مصرف آب در بخش‌های مختلف شهری و تبدیل آن‌ها به فاضلاب و در نهایت رهاسازی فاضلاب باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای می‌شود. این اثرات خود می‌توانند عامل ایجاد اثرات دیگر شوند. دفع غیربهداشتی فاضلاب می‌تواند موجب گسترش بیماری‌های گوارشی نظیر تیفوئید، پاراتیفوئید، وبا و انواع بیماری‌های میکربی و انگلی خطرناک شود (Mobarez, 2017). در مورد هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از رهاسازی فاضلاب سه مسئله اصلی وجود دارد؛ هزینه درمان بیماری، هزینه از کار افتادگی ناشی از بیماری و درد ناشی از آن؛ که هزینه‌های مستقیم درمان و هزینه‌های از کار افتادگی را می‌توان با معیارهای مشخصی ارزش‌گذاری پولی کرد، اما ارزش پولی درد ناشی از بیماری را نمی‌توان به سادگی تعیین کرد، لذا در این مطالعه فقط به ارزیابی هزینه‌های درمانی و از کار افتادگی ناشی از این بیماری‌ها پرداخته می‌شود. ضریب بیماری‌های عفونی مرتبط با آب ۰/۸ در نظر گرفته شده است (Tolba, 2001). تعداد متوسط بیماری‌های عفونی در سال ۱۳۸۵، از مرکز بهداشت شهرستان مشهد و نتایج مرکز ملی تحقیقات علوم پزشکی کشور دریافت شده است. درصد تعداد بیماری ناشی از آلودگی آب بر کل جمعیت مشهد در این سال برابر ۱/۹۳ درصد بود. در نتیجه با استفاده از این ضریب و جمعیت تحت پوشش دو تصفیه‌خانه مورد بحث، تعداد متوسط بیماری ناشی از آلودگی آب در این مناطق تخمین زده می‌شود. هر چند که تأثیر احداث تصفیه‌خانه فاضلاب بر روی بهبودی سلامتی انسان نیاز به سپری زمان دارد، اما با این وجود با توجه به اینکه طبق ارزیابی اثرات محیط زیستی تصفیه‌خانه‌ها، احداث تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب اثر سلامتی انسان را به‌ترتیب ۳۳/۷ و ۲۴/۸ درصد بهبود می‌بخشد، مقدار کاهش هزینه‌های درمان و از کار افتادگی ناشی از بیماری‌های مرتبط با آب‌های آلوده تخمین زده می‌شود. درآمد کل حاصل از اجتناب از هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از تخلیه کنترل نشده فاضلاب از معادله ۵ محاسبه می‌شود

$$B_S = \sum_{i=1}^{2} (Si_{i,b} - Si_{i,a}) \times [C_{dis.a} + C_t] \qquad (۵)$$

که در آن

B_S درآمد کل حاصل از اجتناب از هزینه‌های درمان، Si_b تعداد متوسط بیماری قبل از احداث تصفیه‌خانه، Si_a تعداد متوسط بیماری بعد از احداث تصفیه‌خانه، $c_{dis.a}$ هزینه از کارافتادگی یک نفر و c_t هزینه درمان یک نفر است. همچنین i نشان‌دهنده هر تصفیه‌خانه است.

در این ارزیابی فرض شده است تمام کاهش هزینه‌های مربوط به بیماری‌ها در سال ۱۳۹۶ صورت گرفته است.

۲-۴-۵- کاهش هزینه‌های تخریب محیط زیست

اکثر مزایای محیط‌زیستی و بهداشتی ارزش قابل توجهی دارند اما بسیاری از مزایای بهره‌وری محیط‌زیستی نمی‌توانند در واحدهای پولی قیمت‌گذاری شوند؛ زیرا قیمت‌های بازاری وجود ندارد. با وجود مطالعات اخیر درباره محاسبه هزینه محیط زیستی تصفیه فاضلاب هنوز هم به‌طور گسترده از ارزش‌گذاری پولی در این زمینه استفاده نمی‌شود؛ زیرا عدم قطعیت بالایی دارد و به بسیاری از متغیرهای دیگر وابسته است. طیف گسترده‌ای از روش‌های ارزش‌گذاری پولی وجود دارند که هر کدام یک رویکرد متفاوت برای این مسئله در نظر می‌گیرند. یکی از این روش‌ها، روش قیمت سایه‌ای است. قیمت سایه‌ای ۵ پارامتر از مطالعات پیشین به دست آمده است (HernáNdez-Sancho et al., 2015). از آنجا که این قیمت‌ها بر اساس قیمت آب ۰/۷ دلار به ازای یک مترمکعب در دسترس بود، برای داخلی کردن آنها از میانگین قیمت آب در بخش‌های مختلف (خانگی، تجاری و ...) شهر مشهد که در گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، تعرفه‌های آب و خدمات وابسته در سال ۱۳۹۷، آورده شده است، استفاده شد. کاهش هزینه (درآمد حاصل از کاهش) تخریب محیط زیست از معادله ۶ محاسبه می‌شود

$$B_{Deg} = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{5} \Delta m_{i,j} \times C_j \qquad (۶)$$

که در آن

B_{Deg} درآمد کل حاصل از کاهش تخریب محیط زیست، Δm مقدار تغییر موجودی، و c_j هزینه یک واحد از پارامتر نامطلوب j است و همچنین i نشان‌دهنده هر تصفیه‌خانه است. با استفاده از معادله ۶

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

کاهش هزینه تخریب محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب در جدول ۳ آورده شده است.

۲-۵- ارزیابی جنبه محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

برای ارزیابی جنبه‌های محیط زیستی عملیات تصفیه‌خانه سه شاخص مقدار بار آلی حذف شده از جریان پساب توسط تصفیه‌خانه، مقدار بار مغذی حذف شده از عملیات تصفیه‌خانه و اثرات محیط زیستی چرخه عمر عملیات تصفیه‌خانه در نظر گرفته شد. در هر سه سناریو شاخص اکو-بهره‌وری برای هر سه معیار محیط‌زیستی ارائه شد. هر قدر بار آلی حذف شده توسط تصفیه‌خانه‌ها بیشتر باشد، شاخص اکو-بهره‌وری کاهش می‌یابد. در این پروژه از روش ارزیابی چرخه عمر ReCiPe استفاده شد. این روش اثرات کل انتشارات انجام شده را تحت سه گروه اثر نهایی سلامت انسان، کیفیت زیست‌بوم و تخریب منابع در نظر می‌گیرد. پس از تخمین هر کدام از این اثرات، سلامت انسان با ضریب وزنی ۴۰۰ از هزار، کیفیت زیست‌بوم با ضریب وزنی ۴۰۰ از هزار و تخریب منابع با ضریب وزنی ۲۰۰ از هزار با هم جمع می‌شوند تا اثر کلی برآورد شود (Goedkoop et al., 2013).

با توجه به مباحث فوق، اگر بار آلی حذف شده به‌عنوان شاخص محیط زیستی انتخاب شود، شاخص اکو-بهره‌وری (EE_1) از معادله ۷ به‌دست می‌آید

$$EE_1 = \frac{\Delta V}{\Delta COD} \qquad (۷)$$

که در آن

ΔV ارزش افزوده تولیدی (پس از احداث تصفیه‌خانه نسبت به قبل از احداث آن) و ΔCOD مقدار بار آلی حذف شده توسط تصفیه‌خانه است.

در حالت دوم، شاخص اکو-بهره‌وری (EE_2) بر پایه مواد مغذی حذف شده از معادله ۸ محاسبه می‌شود

$$EE_2 = \frac{\Delta V}{\Delta (N+P)} \qquad (۸)$$

که در آن

ΔV ارزش افزوده تولیدی و $\Delta (N+P)$ مقدار مواد مغذی حذف شده است. در آخرین حالت، برای محاسبه شاخص اکو-بهره‌وری (EE_3) بر پایه شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر از معادله ۹ استفاده می‌شود

$$EE_3 = \frac{\Delta V}{EI} \qquad (۹)$$

که در آن

ΔV ارزش افزوده تولیدی و EI شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر است.

جدول ۳- کاهش هزینه‌های تخریب محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب

Table 3. The reduction of environmental degradation costs of Al-Teymour and KhinArab wastewater treatment plants

Parameter	Cost of one unit	Amount of inventory change	The reduction of environmental degradation costs
Unit	IRR/kg	t/y	M IRR/y
Al-Teymour wastewater treatment plant			
N	240016.8	-1434.412	344282.978
P	455001.2	-117.334	53387.11
TSS	73.6	-9509.943	699.93
BOD	441.7	-11146.756	4923.52
COD	1472.5	-21184.704	31194.476
KhinArab wastewater treatment plant			
N	240016.8	-1158.416	278039.301
P	455001.2	-96.0461	43701.09
TSS	73.6	-4977.979	366.38
BOD	441.7	-6862.62	3031.22
COD	1472.5	-13427.365	19771.79

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش برای ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری در حالت پایه (وضعیت موجود)، فروش پساب به‌عنوان درآمد مستقیم و کاهش هزینه‌های تخریب محیط زیستی نیز به‌عنوان درآمد غیرمستقیم احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در نظر گرفته شد. برای جنبه محیط‌زیستی این ارزیابی، از سه معیار شاخص مقدار بار آلی حذف شده و مواد مغذی حذف شده و شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر استفاده شد. نتایج این ارزیابی به‌صورت خلاصه در شکل ۳ آورده شده است.

همان‌طور که از نتایج این ارزیابی پیداست، شاخص اکو-بهره‌وری در هر سه حالت بار آلی حذف شده، مواد مغذی حذف شده و همچنین اثرات محیط زیستی چرخه عمر برای تصفیه‌خانه خین‌عرب از تصفیه‌خانه التیمور بزرگ‌تر است، که به این معنی است که در تصفیه‌خانه خین‌عرب نسبت به التیمور به‌ازای یک واحد بهبود در حذف بار آلی یا مواد مغذی و یا اثرات چرخه عمر، ارزش افزوده بیشتری ایجاد می‌شود. طبق نتایج به‌دست آمده اگر چه ارزش افزوده تصفیه‌خانه التیمور بیش از تصفیه‌خانه خین‌عرب است، اما اثرات کمتر چرخه عمر تصفیه‌خانه خین‌عرب نسبت به التیمور سبب بزرگ‌تر شدن شاخص اکو-بهره‌وری آن نسبت به تصفیه‌خانه التیمور می‌شود. همچنین در هر سه سناریو و برای هر دو تصفیه‌خانه، شاخص اکو-بهره‌وری محاسبه شده با استفاده از میزان حذف مواد مغذی بیش از شاخص اکو- بهره‌وری محاسبه شده با استفاده از میزان حذف بار آلی است؛ در واقع چنین به نظر می‌رسد که حذف مواد مغذی در بهبود بهره‌وری تصفیه‌خانه بیش از حذف بار آلی مؤثر است.

همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد، نسبت ارزش افزوده تصفیه‌خانه‌ی خین‌عرب به التیمور ۰/۹۷ است؛ ولی به‌دلیل حذف مقدار بیشتری از بار آلی فاضلاب و مواد مغذی در تصفیه‌خانه التیمور، شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه خین‌عرب از التیمور در هر دو حالت بزرگ‌تر است. بنابراین با حذف یک کیلوگرم بار آلی یا مواد مغذی در تصفیه‌خانه خین‌عرب می‌توان به ارزش افزوده‌ی بیشتری دست یافت.

به منظور بهبود شاخص اکو-بهره‌وری سه سناریو بررسی شد، که در آن جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت تا در نهایت بهترین گزینه برای بهبود شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه‌ها انتخاب شود.

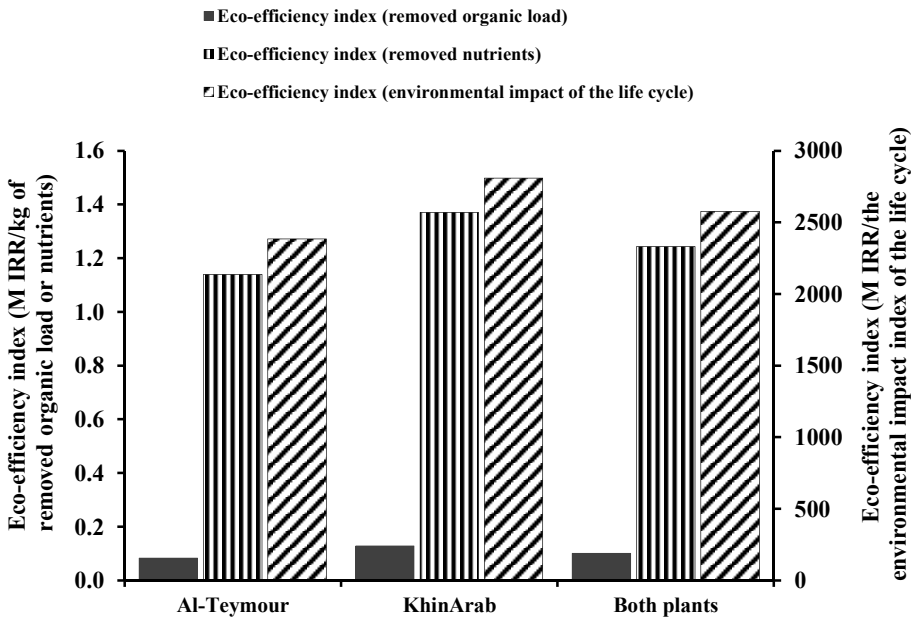

Fig. 3. The eco-efficiency diagram for the base scenario considering three different environmental indicators

شکل ۳- نمودار شاخص اکو- بهره‌وری در حالت پایه با در نظر گرفتن سه شاخص محیط زیستی متفاوت.

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

جدول ۴- مقادیر نسبی ارزش افزوده، بار آلی و مواد مغذی حذف شده و شاخص اکو-بهره‌وری دو تصفیه‌خانه

Table 4. The relative amounts of value-added, removed organic load and nutrients, and the eco-efficiency index of both wastewater treatment plants

Parameter	Base scenario
The value-added ratio of KhinArab to Al-Teymour	0.97
The removed organic load ratio of KhinArab to Al-Teymour	0.63
The removed nutrients ratio of KhinArab to Al-Teymour	0.81
The eco-efficiency index ratio of KhinArab to Al-Teymour by considering removed organic load as environmental index	1.54
The eco-efficiency index ratio of KhinArab to Al-Teymour by considering removed nutrients as environmental index	1.2

در سناریو اول اثر احداث واحد تولید کمپوست در شاخص اکو-بهره‌وری بررسی شد؛ در دو سناریوی بعدی به‌ترتیب اثر کاهش مصرف انرژی و کلرزنی در شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه مورد تحلیل قرار گرفت.

۳-۱- سناریو اول: احداث واحد تولید کمپوست

در سال‌های اخیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به‌عنوان کود و اصلاح‌کننده خاک‌های کشاورزی در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است (Alidadi and Mohebrad, 2006).

تولید و فروش کمپوست کشاورزی به‌عنوان یکی دیگر از درآمدهای مستقیم تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناخته می‌شود.

مقدار لجن خروجی از تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب به‌ترتیب ۱۲/۰۴۵ و ۱۷/۷۶۲ هزار تن و کمپوست تولیدی ۸/۶۲۶ و ۱۰/۵۵۵ هزار تن در سال برآورد می‌شود. برای ارزیابی درآمد حاصل از فروش کمپوست تولیدی دو تصفیه‌خانه التیمور و خین‌عرب از قیمت کمپوست ۵۰۰ دلار به ازای یک تن استفاده شد (Ceyhan et al., 2015). برای تخمین هزینه‌های عملیاتی واحدهای تولید کمپوست نیز از نتایج سایر مطالعات استفاده شد (Piao et al., 2016). همچنین در این‌جا برای هزینه سرمایه‌گذاری نیز از نمونه خارجی با ظرفیت ۸۰ تن بر روز و احداث شده در سال ۲۰۱۵ استفاده شد، که به‌صورت تقریبی با استفاده از ضرایب تبدیل برای دو تصفیه‌خانه التیمور و خین‌عرب به کار برده شد (Piao et al., 2016).

از آنجا که هزینه‌ها با ارز خارجی در دسترس هستند، برای داخلی کردن این هزینه‌ها از متوسط نرخ ارز اعلام شده توسط بانک مرکزی در سال ۱۳۹۶ استفاده شد. چون مبنای محاسبات سال ۱۳۹۶ تعیین شده است، برای برآورد هزینه سرمایه‌گذاری معادل با سال مبنا (K)، با فرض طول عمر ۳۰ سال برای تصفیه‌خانه‌ها (n=۳۰) و نرخ تنزیل سالانه ۶ درصد (i=۰/۰۶)، از معادله ۱۰ استفاده شد

$$K = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times I \qquad (۱۰)$$

که در آن

I سرمایه‌گذاری اولیه واحد است.

در نهایت با استفاده از مقادیر و روابط ذکر شده، مجموع درآمد خالص تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین‌عرب از تولید و فروش کمپوست کشاورزی به‌ترتیب ۱۱۵۴۱۳ و ۱۴۱۱۶۵ میلیون ریال بر سال برآورد شده است. نتایج حاصل از این سناریو در جدول ۵ و شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

۳-۲- سناریو دوم: کاهش مصرف انرژی

به‌طور کلی اساس کار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر مصرف مواد شیمیایی و انرژی است. مقدار انرژی مصرفی هر واحد تصفیه‌خانه به‌عوامل مختلفی همچون موقعیت جغرافیایی منطقه، اندازه سیستم، نوع فرایند تصفیه، نوع و موقعیت تجهیزات و بازبینی دوره‌ای واحدها وابسته است. به‌طور مثال با تطبیق اندازه پمپ‌ها و موتورها با تقاضای لازم می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. در صورتی که این عدم تطابق موقت باشد، با راه‌حل‌های کوتاه مدت برطرف خواهد شد، اما در صورتی که به‌طور دائم پمپ‌ها خارج از ظرفیت خود کار کنند، راه‌حل‌های جدیدی برای پمپاژ باید اعمال

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵- ارزش افزوده و شاخص اثرات محیط زیستی نهایی چرخه عمر در سناریوهای مختلف

Table 5. The value-added and environmental impact index of the life cycle in different scenarios

Description	Base scenario	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Al-Teymour wastewater treatment plant				
Total value-added (M IRR/y)	1770851.135	1886264.135	1771222.918	1771067.068
Environment impact index of the life cycle	7.418×10^{2}	2.116×10^{5}	7.272×10^{2}	7.418×10^{2}
KhinArab wastewater treatment plant				
Total value-added (M IRR/y)	1721338.707	1862503.307	1721796.319	1721576.606
Environment impact index of the life cycle	6.121×10^{2}	1.268×10^{5}	5.940×10^{2}	6.121×10^{2}

شود. تغییر در برنامه عملیاتی، طراحی، مدیریت، نظارت، آموزش و فعالیت‌های مشابه آن در طبقه مدیریت عملیات قرار می‌گیرد. این دسته از راهکارها اغلب از جنس تغییر در طراحی سیستم و یا تغییر در برنامه عملیاتی هستند که با هزینه سرمایه‌گذاری اندک از هزینه‌های عملیاتی به‌ویژه هزینه‌های انرژی می‌کاهند. سیستم‌های هوادهی، پمپ‌ها و موتورها مصرف‌کنندگان اصلی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هستند. راهکارهای مربوط به هر یک از این سیستم‌ها اغلب هزینه سرمایه‌گذاری بالایی دارند اما کاهش مصرف انرژی آن‌ها بسیار چشمگیر است. فرایند لجن نیز از بخش‌های پر مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد. با استفاده از بهبود فرایندهای موجود و یا استفاده از فرایندهای جایگزین کم مصرف، می‌توان از اتلاف انرژی در این بخش کاست. علاوه‌بر کاهش مصرف انرژی می‌توان با استحصال انرژی از فاضلاب و لجن، انرژی نیز تولید کرد. در صورت وجود پتانسیل بالای استحصال انرژی و به‌کارگیری صحیح از تجهیزات، می‌توان تقاضای کامل انرژی تصفیه‌خانه را برآورده کرد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر موجود در واحد نیز می‌تواند به تأمین تقاضای انرژی

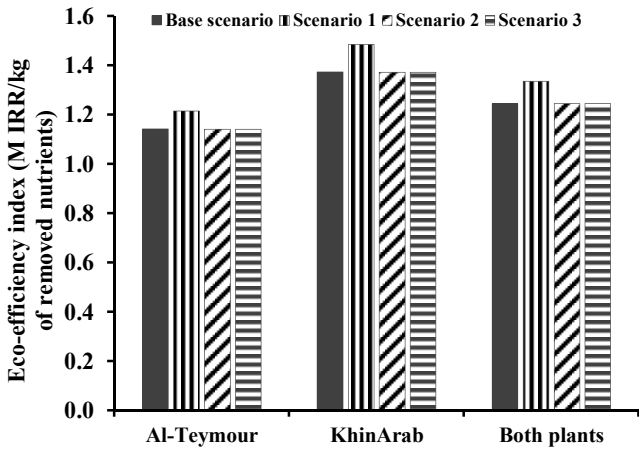

Fig. 4. The eco-efficiency diagram for different scenarios considering the environmental indicator of removed nutrients

شکل ۵- نمودار شاخص اکو-بهره‌وری برای سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن شاخص محیط زیستی مقدار مواد مغذی حذف شده

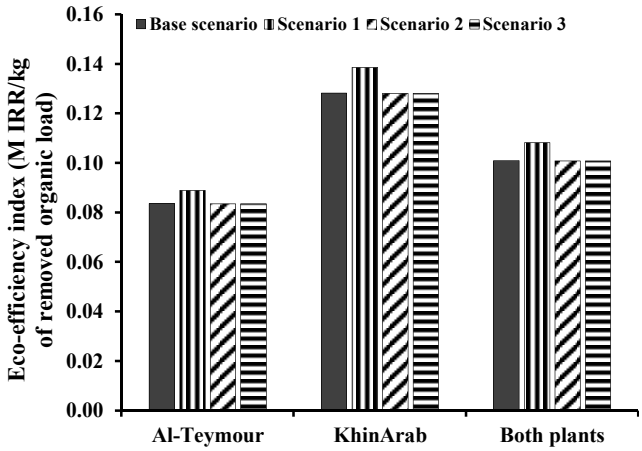

Fig. 5. The eco-efficiency diagram for different scenarios considering the environmental indicator of removed organic load

شکل ۴- نمودار شاخص اکو-بهره‌وری برای سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن شاخص محیط زیستی مقدار بار آلی حذف شده

www.SID.ir

doi: dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

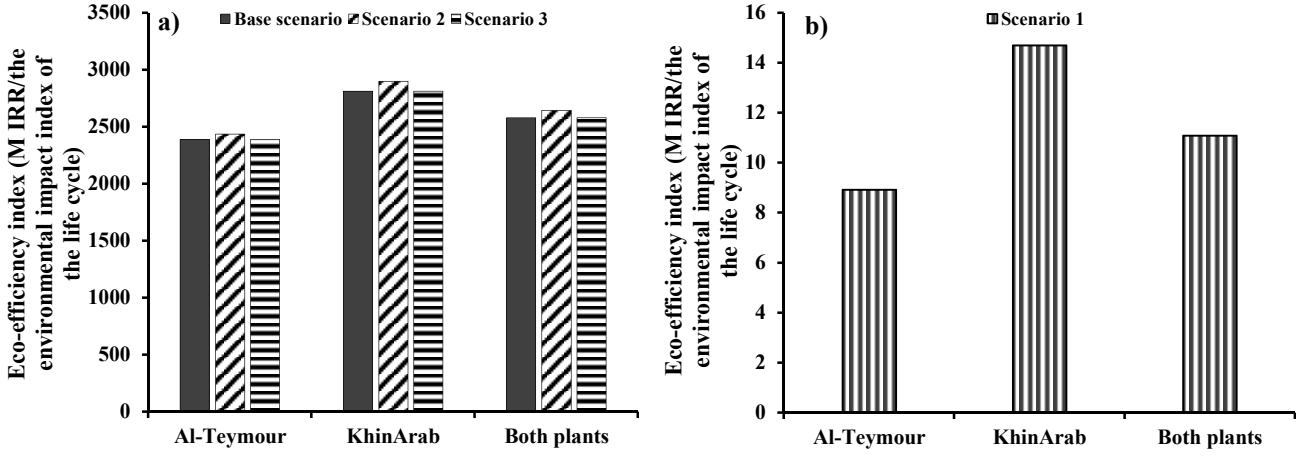

Fig. 6. The eco-efficiency diagram for (a) the base, second and third scenarios, (b) the first scenario considering the environmental impact index of the life cycle

شکل ۶- نمودار شاخص اکو-بهره‌وری با در نظر گرفتن شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر برای (a) حالت پایه و سناریوهای دوم و سوم، (b) سناریو اول

تصفیه‌خانه و تبدیل آن به تصفیه‌خانه خودکفای انرژی کمک کند. در این پژوهش نقش اعمال راهکارهای بدون هزینه (یا کم‌هزینه) در شاخص اکو-بهره‌وری بررسی شد. راهکارهایی از جمله کاهش پیک برق، مدیریت ساختار نرخ برق، از دست خارج کردن تجهیزات غیرضروری و پشتیبانی مناسب موتورها، کاهش جریان پمپاژ، کاهش هد پمپاژ و مدیریت در فصول پیک (توریستی)، راهکارهای کم‌هزینه یا بدون هزینه محسوب می‌شوند.

طبق مطالعات پیشین (Pirnie, 2010) اعمال این راهکارها تا ۳۰ درصد (در بعضی موارد بیشتر از آن) می‌تواند مصرف انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را کاهش دهد، به‌منظور اعمال دیدگاه محافظه‌کارانه در این پژوهش فرض می‌شود اعمال این راهکارهای بدون هزینه، ۱۰ درصد مصرف انرژی هر تصفیه‌خانه را کاهش می‌دهد. با اعمال این میزان کاهش در مصرف انرژی و به دنبال آن کاهش هزینه انرژی، ارزیابی‌های اقتصادی و محیط زیستی مجدداً تکرار و نتایج در جدول ۵ و شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

۳-۳- سناریو سوم: کاهش میزان کلرزنی

گندزدایی توسط کلرزنی بسیاری از ریزاندام‌ها را از بین می‌برد. یکی از معایب گندزدایی با کلر تولید باقیمانده‌های کلر آزاد و ترکیبی است. این مواد پتانسیل تولید مشتق‌های کلرهای آلی را دارند و این مشتق‌ها سمّی و بسیار مقاوم هستند و می‌توانند سبب نابودی زندگی حیوانات وحشی و گیاهان شوند. همچنین تولید کلر در طی چرخه عمر احتیاج به مصرف مواد و انرژی دارد. بنابراین، کنترل دقیق میزان تزریق کلر می‌تواند از طریق کاهش مقدار کلر مصرفی و کاهش مقدار کلر باقیمانده سبب بهبود اثرات محیط زیستی شود. برای همین منظور در این سناریو اثر کاهش ۱۰ درصدی مقدار کلر مصرفی بررسی شد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، ارزش افزوده تولیدی در هر سه سناریو تعریفی از حالت پایه بیشتر است که در سناریو اول این افزایش ارزش افزوده تولیدی قابل توجه است. دلیل این افزایش، ارزش افزوده تولیدی از واحد کمپوست‌سازی است که بخشی از آن به در دسترس نبودن هزینه‌های داخلی آن برمی‌گردد. دلیل افزایش ارزش افزوده در سناریوهای دوم و سوم امری بدیهی است زیرا در این سناریوها مقدار مواد شیمیایی و انرژی مصرفی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کاهش یافته است و به تبع آن هزینه‌های ناشی از آنها نیز کاهش یافته است.

نکته قابل توجه دیگر در جدول ۵، افزایش نسبتاً چشمگیر شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر در سناریو اول نسبت به حالت پایه است. آماده‌سازی لجن و تولید کمپوست نیازمند استفاده از زمین، مواد و ماشین‌آلاتی است که سبب ایجاد اثرات محیط

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

زیستی نهایی می‌شوند. هرچند در مجموع کیفیت لجن ارتقا می‌یابد و برای مصارف کود کشاورزی مناسب می‌شود.

همان‌طور که در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ مشهود است، با اجرای هر کدام از سناریوها باز هم به مانند حالت پایه شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه خین‌عرب از التیمور بزرگ‌تر است. همچنین با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است که اعمال سناریو اول، یعنی احداث واحد تولید کمپوست، می‌تواند در بهبود شاخص اکو-بهره‌وری نقش پررنگ‌تری نسبت به دو سناریو دیگر ایفا کند؛ زیرا در هر سه سناریو و همچنین حالت پایه مخرج کسر شاخص اکو-بهره‌وری (بار آلی حذف شده یا مواد مغذی حذف شده) یکسان است، پس تنها صورت کسر (ارزش افزوده تولیدی) تعیین‌کننده است. از طرفی طبق ارزیابی اقتصادی صورت گرفته شده، ارزش افزوده تولیدی در سناریو اول از سناریو دوم و سوم بیشتر است (جدول ۵).

در نتیجه شاخص اکو-بهره‌وری به همین ترتیب (سناریو اول، دوم و سوم) از زیاد به کم مرتب می‌شود؛ هر چند که افزایش ارزش افزوده در سناریو دوم و سوم نسبت به حالت پایه چشمگیر نیست و به همین دلیل افزایش شاخص اکو-بهره‌وری در این دو سناریو قابل توجه نیست.

در واقع به نظر می‌رسد با احداث واحد تولید کمپوست می‌توان به ازای یک واحد بار آلی یا مواد مغذی حذف شده به ارزش افزوده بیشتری دست یافت. اما از آنجا که در این ارزیابی شاخص محیط زیستی ثابت است و در سناریوهای تعریفی تغییر نمی‌کند، در نظر گرفتن شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر می‌تواند نتایج متفاوتی را ارائه کند. نتایج این ارزیابی در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه خین‌عرب در حالت پایه و هر سه سناریو از التیمور بزرگ‌تر است؛ و این در حالی است که در تمام حالات ارزش افزوده تولیدی توسط تصفیه‌خانه التیمور از خین‌عرب بیشتر است و در نتیجه این شاخص محیط زیستی است که سبب بزرگ‌تر بودن شاخص اکو-بهره‌وری تصفیه‌خانه خین‌عرب شده است.

همچنین با اجرای سناریو اول، شاخص اکو-بهره‌وری هر دو تصفیه‌خانه کاهش چشمگیری خواهد داشت. زیرا اثر محیط زیستی چرخه عمر با احداث واحد تولید کمپوست افزایش قابل توجهی دارد و این افزایش در مخرج کسر اکو-بهره‌وری باعث کاهش این شاخص می‌شود. میزان افزایش در مخرج کسر بسیار بیشتر از صورت کسر بوده است (به‌طور مثال برای التیمور، مخرج کسر ۷۰۸/۸ برابر شده است ولی صورت کسر، یعنی ارزش افزوده تولیدی تنها ۱/۰۶ برابر شده است).

نکته دیگری که در شکل ۶ نمایان است، افزایش شاخص اکو-بهره‌وری دو تصفیه‌خانه در سناریو دوم و سوم است. این افزایش در سناریو دوم از سناریو سوم بیشتر است که نشان می‌دهد اثر کاهش مصرف انرژی در بهبود شاخص اکو-بهره‌وری از اثر کاهش کلرزنی بیشتر است، زیرا که هم ارزش افزوده بیشتری تولید می‌کند و هم اثر محیط زیستی چرخه عمر را بیشتر کاهش می‌دهد، در نتیجه موجب افزایش بیشتر در شاخص اکو-بهره‌وری می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جنبه اقتصادی و محیط زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین‌عرب و برقراری ارتباط بین آنها از طریق ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری صورت گرفت. برای ارزیابی اقتصادی تصفیه‌خانه‌ها از اطلاعات در دسترس تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه، مطالعات پیشین و تقریب‌های برپایه منطق استفاده شد.

برای شاخص محیط زیستی این دو تصفیه‌خانه نیز، در کنار مقدار بار آلی و مواد مغذی حذف شده، از اثرات محیط زیستی چرخه عمر تصفیه‌خانه‌ها استفاده شد. شاخص اثرات محیط زیستی چرخه عمر با استفاده از روش ReCiPe محاسبه شد.

نتایج ارزیابی نشان داد که اگر تنها ارزش افزوده تولیدی مد نظر باشد، تصفیه‌خانه التیمور به همراه واحد تولید کمپوست بهترین عملکرد را خواهد داشت. اما اگر در کنار ارزش افزوده تولیدی، شاخص مقدار بار آلی حذف شده و یا مواد مغذی حذف شده در نظر گرفته شود، تصفیه‌خانه خین‌عرب همراه با واحد تولید کمپوست بهترین نتیجه را خواهد داد. در نهایت اگر در کنار ارزش افزوده تولیدی، اثرات محیط زیستی چرخه عمر در نظر گرفته شود، تصفیه‌خانه خین‌عرب همراه با صرفه‌جویی و کاهش مصرف انرژی بهترین کارایی را خواهد داشت.

هر گونه افزایش در ارزش افزوده تولیدی از تصفیه‌خانه‌ها باعث بهبود شاخص اکو-بهره‌وری می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در مقدار ارزش افزوده تولیدی، هزینه‌های پرسنلی است که بیش از ۶۰ درصد از هزینه‌های کل را در این پژوهش شامل می‌شود، به این

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.171317.2828
Archive of SID

سبب پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آتی ضمن بررسی راهکارهای کاهش هزینه‌های پرسنلی، تأثیر آن بر شاخص اکو-بهره‌وری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و در کنار بخش اقتصادی و محیط‌زیستی، بخش اجتماعی مسئله نیز بررسی شود.

با توجه به مباحث ذکر شده به نظر می‌رسد که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نه تنها از منظر محیط زیستی بلکه از لحاظ اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. برای ارائه یک تحلیل جامع از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، این دو جنبه باید در کنار یکدیگر مورد ارزیابی قرار گیرند. شاخص اکو-بهره‌وری به‌خوبی می‌تواند نقش پل ارتباطی بین این دو جنبه را ایفا کند و تحلیلی جامع از ارزیابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه دهد.

۵- قدردانی

در پایان، به این وسیله از شرکت آب و فاضلاب مشهد که در انجام این پژوهش همکاری لازم و مناسب را با نویسندگان مقاله داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

Ahluwalia, M. B. 2017. The business of pricing carbon: how companies are pricing carbon to mitigate risks and prepare for a low-carbon future. Center for Climate and Energy Solutions, Arlington, VA.

Alidadi, H. & Mohebrad, B. 2006. The fertilizer value evaluation of compost from municipal sewage sludge. *9th National Congress On Environmental Health*. Isfahan university of medical sciences, Isfahan, Iran. (In Persian).

Ceyhan, V., Akça, İ., Kızılkaya, R., Veselova, A. & Novikova, K. 2015. The financial feasibility of hazelnut husk and sewage sludge based vermicompost production. *Eurasian Journal of Soil Science,* 4**,** 259-265.

Dong, X., Zhang, X. & Zeng, S. 2017. Measuring and explaining eco-efficiencies of wastewater treatment plants in China: an uncertainty analysis perspective. *Water Research,* 112**,** 195-207.

El-Gohary, F. & Tawfik, A. 2009. Decolorization and COD reduction of disperse and reactive dyes wastewater using chemical-coagulation followed by sequential batch reactor (SBR) process. *Desalination,* 249**,** 1159-1164.

Goedkoop, M., Oele, M., Leitjing, J., Ponsioen, T. & Meijer, E. 2013. *Introduction to LCA*, SimaPro. The Netherlands.

Haslinger, J., Lindtner, S. & Krampe, J. 2016. Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: benchmarking results of the last 10 years. *Water Science and Technology,* 74**,** 2620-2626.

Hayati, A., Moradzadeh, R. & Keshavarz, S. 2016. The potentials and limitations assessment of using the effluent of Bushehr wastewater treatment plant in agriculture and proposing the type of cultivation. *2nd Conference on Environmental Science, Engineering & Technologies.* Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, (In Persian).

HernáNdez-Sancho, F., Lamizana-Diallo, B., Mateo-Sagasta, J. & Qadir, M. 2015. *Economic valuation of wastewater : the cost of action and the cost of no action,* Nairobi, UNEP.

Jalilzadeh Yengejeh, R., Davideh, K. & Baqeri, A. 2014. Cost/benefit evaluation of wastewater treatment plant types (SBR, MLE, oxidation ditch), case study: Khouzestan, Iran. *Bull Environ. Pharmacol. Life Sci*., 4**,** 55-60.

Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Amores, M. J., Termes-Rifé, M., Marín-Navarro, D., Moreira, M. T., et al. 2016. Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective. *Science of the Total Environment,* 566**,** 468-479.

www.SID.ir

Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Chenel, S., Marín-Navarro, D., Moreira, M. T. & Feijoo, G. 2015. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+ DEA method. *Water Research,* 68**,** 651-666.

Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Marín-Navarro, D., Crujeiras, R. M., Moreira, M. T. & Feijoo, G. 2017. Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants. *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 23**,** 357-367.

Majed, V. & Golzary-Ghalejoughi, S. 2016. Economic and environmental analysis of wastewater collecting and treatment. *Journal of Water and Sustainable Development,* 3**,** 83-92. (In Persian).

Mobarez, M. 2017. *Prioritizing the requirements of civil defense in the design and implementation of wastewater treatment facilities based on the Analytic Hierarchy Process (AHP): case study wastewater treatment plant Gulbahar.* The degree of Master of Science, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran. (In Persian).

Molinos-Senante, M., Gémar, G., Gómez, T., Caballero, R. & Sala-Garrido, R. 2016. Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. *Journal of Cleaner Production,* 137**,** 1066-1075.

Piao, W., Kim, Y., Kim, H., Kim, M. & Kim, C. 2016. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production,* 113**,** 325-337.

Pirnie, M. 2010. *Water and wastewater energy managment, best practice handbook,* New York State Energy Reaserch & Development Authoriy.

Robert, L. N., Bodo, P. & Vyhnanek, R. 2003. Task force for the implementation of the environmental action programme for Central and Eastern Europe (EPA). The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe, Tbilisi, Georgia.

Statistical Center of Iran. 2019. Available: www.amar.org.ir (Accessed 2019-02-03).

Tolba, M. K. 2001. *Our fragile world : challenges and opportunities for sustainable development,* Oxford, UK, Eolss Publishers.

Yu, Y., Chen, D., Zhu, B. & Hu, S. 2013. Eco-efficiency trends in China, 1978-2010: decoupling environmental pressure from economic growth. *Ecological Indicators,* 24**,** 177-184.

www.SID.ir