ارزیابی چرخه حیات اثرات سیستم تصفیه بیورآکتور غشایی، به‌منظور بازیابی آب خاکستری

زینب زارعی و مسعود تابش*[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، z_zarei@ut.ac.ir

۲- مسعود تابش، استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، mtabesh@ut.ac.ir

چکیده

با افزایش جمعیت و سطح فرهنگ جوامع، تقاضا و استفاده از آب تصفیه شده در مصارف خانگی به صورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است و از طرف دیگر افزایش گرمایش جهانی، تغییر اقلیم و خشکسالی که منجر به کاهش منابع آب طبیعی می‌شود، بسیاری از کشورها را دچار بحران آب کرده است. یکی از راه کارهای مناسب برای کمک به بهبود شرایط، بازیابی آب و استفاده مجدد از آب است. آب خاکستری به علت بار آلودگی کم نسبت به پساب و آب فاضلاب، گزینه بسیار مناسبی برای بازیابی است. به منظور رساندن کیفیت آب خاکستری به استانداردهای مناسب استفاده مجدد، فرآیند تصفیه نقش مهمی ایفا می‌کند. در این پژوهش برای تصفیه درجای آب خاکستری تولید شده در یک مجتمع مسکونی از بیورآکتورهای غشایی هوازی استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی جامع، با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات، مراحل تصفیه شامل پیش تصفیه، متعادل‌سازی جریان، تصفیه ثانویه در بیورآکتورهای غشایی هوازی و زلال‌سازی در فاز بهره‌برداری بررسی می‌شود. ارزیابی صورت گرفته نشان می‌دهد که اثرات مخرب بر روی محیط‌زیست و منابع طبیعی در مقابل اثرات بر سلامت انسان بسیار کم است. بنابراین با اتخاذ تصمیم‌های مناسب و مدیریت بخش آسیب به سلامت افراد، استفاده از این سیستم مناسب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آب خاکستری، بازیابی، تصفیه، بیورآکتور غشایی، ارزیابی چرخه حیات

۱- مقدمه

امروزه ضرورت پرداختن فعالانه به مسائل محیط‌زیستی، بیش از هر زمان دیگری وجود دارد. بحث در مورد محدودیت و پیامدهای تغییرات آب و هوا، همچون افزایش توزیع محلی پدیده‌های شدید آب و هوایی مانند بارش شدید و خشکسالی، همچنین افزایش رقابت برای منابع مواد اولیه تجدید ناپذیر مانند آب، ماسه و کبالت در بسیاری از نقاط مشاهده می‌شود (Albrecht et al., 2021). کمبود آب آشامیدنی یکی از چالش‌های اصلی است که بسیاری از کشورها با آن روبرو هستند. اکنون شرایط بسیار جدی‌تر و بدتر شده‌است، زیرا بسیاری از کشورها با خشکسالی روبرو هستند (Bakare et al., 2017)، ازطرف دیگر افزایش تقاضا برای آب، تمایل به بازیابی و استفاده مجدد از آب را افزایش داده‌است، که این امر منجر به رونق استفاده مجدد از آب خاکستری در محل با استفاده از میلیون‌ها سیستم تصفیه در سراسر جهان شده است (Benami et al., 2016).

مشکل کمبود آب در کشور ایران به دلایل گوناگون از قبیل رشد جمعیت، پیشرفت صنعت و داشتن آب و هوای خشک و نیمه خشک بوده که در نهایت منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و ایجاد بحران در زمینه آب مصرفی شده است. بنابراین به‌منظور تأمین آب مورد نیاز، تمایل به استفاده از منابع آب نامتعارف افزایش یافته‌است، در چنین شرایطی استفاده مجدد از آب باران، آب خاکستری، پساب و فاضلاب تصفیه شده می‌تواند به عنوان یکی از راه‌های غلبه بر مشکل کم آبی تلقی شود. استفاده از منابع آب نامتعارف چنانچه به صورت صحیح و منطبق بر اصول انجام گیرد، می‌تواند علاوه بر رفع مشکل کم آبی باعث افزایش حاصل‌خیزی خاک و نیز کاهش مصرف کودهای شیمیایی شود. همه فاضلاب تولید شده در خانه به جز فاضلاب توالت را آب خاکستری می‌گویند. به عبارت دیگر فاضلاب تولیدی آشپزخانه، حمام و ماشین لباسشویی، آب خاکستری است. آب خاکستری تقریباً ۵۰ تا ۸۰ درصد فاضلاب شهری را تشکیل می‌دهد. آب خاکستری، آب استفاده شده‌ای است که بر خلاف آب سیاه (فاضلاب توالت) به راحتی قابل بازیافت و استفاده مجدد است.

آب خاکستری می‌تواند برای طیف وسیعی از کاربردها نظیر آبیاری (به عنوان مثال کشاورزی، باغبانی و فضای سبز)، اهداف محیط زیستی و مصارف غیرشرب مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این منابع برای کاهش تقاضا برای استفاده از منابع آب متعارف و دردسترس، به‌منظور افزایش طول عمر این منابع است (ریاحی نیا، ۱۳۹۳). استفاده مجدد از آب خاکستری و آب باران به صورت ترکیبی در مناطق مسکونی جنوب برزیل باعث ۳۹/۲ تا ۴۲/۷ درصد کاهش مصرف آب آشامیدنی، استفاده از آب خاکستری به تنهایی مصرف آب آشامیدنی را ۲۸/۷ تا ۳۴/۸ درصد کاهش می‌دهد (Ghisi et al., 2007). در ادامه مقاله اثرات محیط‌زیستی استفاده از سیستم دوگانه آب باران-آب خاکستری در ساختمان‌های مسکونی بر اساس تحلیل چرخه عمر بررسی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در روش سیستم دوگانه میانگین مصرف آب آشامیدنی ۴۱/۹ درصد کاهش و ۴۰ درصد کاهش فاضلاب تولیدی و ۳۶/۱ درصد کاهش مصرف انرژی را نسبت به سیستم عادی در پی داشته است.

امروزه در بسیاری از کشورها برای سیفون توالت از آب آشامیدنی استفاده می‌شود، تخمین زده شده است که می‌توان با استفاده مجدد از آب خاکستری، ۳۰ درصد از کل مصرف آب خانگی را کاهش داد (Eriksson et al., 2002). از این‌رو، امروزه در سراسر دنیا به‌خصوص ایران، تلاش برای فراهم کردن بستر مناسب برای استفاده از این منبع در بخش‌های خصوصی و عمومی مورد توجه شایان قرار گرفته است. در دسترس بودن و سهولت استفاده از این منبع، منجر به تمایل سازمان‌های دولتی و پیمانکارهای خصوصی به مجهز کردن ساختمان‌ها و ترویج استفاده از این منبع در ایران شده است. در این راستا در بخش‌های خصوصی، تأسیساتی به منظور استفاده از آب خاکستری در ساختمان‌ها قرار داده می‌شود. بنابراین استفاده از آب خاکستری به عنوان منبع آب نامتعارف، در کنار تأمین آب مورد نیاز، جلوگیری از کاهش و از بین رفتن منابع آب طبیعی و ایجاد ارزش افزوده برای ساختمان‌ها، نیازمند شناخت ابعاد مختلف آن از جمله نحوه‌ی لوله‌کشی، جمع‌آوری، تصفیه و مصارف مختلف آن است، تا بتوان پیامدها و خطرات ناشی از استفاده‌ی از آن را مشخص و به‌منظور پیشگیری و کاهش این خطرات قوانین و مقرراتی برای استفاده از آب خاکستری تنظیم نمود، از این‌رو شناخت و ارزیابی مخاطرات استفاده‌ی مجدد از آب خاکستری ضروری است.

استفاده مجدد از آب خاکستری، به علت تنوع در ترکیبات آن و عدم شناخت کافی مشخصات آن، مخاطرات مختلفی را به‌همراه دارد که شناخت و تحلیل و در نتیجه مدیریت آن‌ها به منظور استفاده از آب خاکستری در مصارف مختلف ضروری است. (Leong et al. ,2017) در ارتباط با استفاده مجدد از آب خاکستری، در نظر گرفتن اثرات درازمدت آن بر محیط‌زیست، منابع آب، خاک، گیاهان و سلامت مصرف‌کنندگان ضروری است. این اثرات شامل آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، تغییر خواص شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک، تجمع املاح در خاک و ایجاد عوارض بهداشتی برای

مصرف‌کنندگان است. بسیاری معتقدند که به دلیل عدم وجود فاضلاب توالت (آب سیاه) در درون آب خاکستری، این آب آلودگی میکروبی کمتری نسبت به فاضلاب شهری دارد. با این وجود عموماً آب خاکستری حاوی مواد زیر است:

۱) موجودات زنده مثل باکتری‌ها، ویروس‌ها، پروتوزا و کرم‌های روده‌ای که باعث بیماری می‌شوند.
۲) مواد معلق، مواد ارگانیک وچربی‌ها.
۳) مواد شیمیائی گرفته شده از صابون، شامپو، رنگ، دهانشویه‌ها، خمیردندان، موادپاک‌کننده، سفیدکننده‌ها، موادضدعفونی کننده و دیگر محصولات از جمله فسفر، سدیم، آمونیاک.

در سراسر جهان به ویژه در مناطق دارای تنش آبی مانند مناطق خشک و نیمه خشک، تصفیه و استفاده مجدد از آب خاکستری در محل مورد توجه قرار گرفته است (Shaikh and Ahammed, 2020). بازیافت آب خاکستری مزایای متعددی را ارائه می‌دهد. استفاده مجدد از آب خاکستری تصفیه شده نه تنها منابع کمیاب آب را حفظ می‌کند، بلکه هزینه‌های تأمین آب و بار سیستم‌های تصفیه فاضلاب متمرکز را نیز کاهش می‌دهد، و اثرات سو و هزینه‌های استخراج و تصفیه فاضلاب را به حداقل می‌رساند، بنابراین به پایداری آب کمک می‌کند. گزارش شده است که حدود ۲۵-۳۰ درصد از مصرف آب آشامیدنی را می‌توان با استفاده مجدد از آب خاکستری کاهش داد. در بسیاری از مناطق کم آب جهان، قوانین دولتی بازیافت آب خاکستری را برای ساختمان‌های تازه ساخته شده اجباری کرده است. یک مطالعه اخیر در مقایسه سیستم استفاده مجدد متمرکز فاضلاب و سیستم استفاده مجدد غیر متمرکز آب خاکستری نشان داد که سیستم آب خاکستری تنها بین ۱۱/۸ تا ۳۷/۵ درصد از انرژی یک سیستم متمرکز را با توجه به تعداد مشابه ساکنان مورد استفاده مصرف می‌کند. علاوه بر این، سیستم متمرکز منجر به انتشار کربن‌دی‌اکسید[1]بالاتری نسبت به سیستم آب خاکستری در محیط‌زیست می‌شود (Shaikh and Ahammed, 2020).

۱-۱- آشنایی با آب خاکستری

به طور کلی دو نوع فاضلاب خانگی وجود دارد. نوع اول آب سیاه است که مطابق تعریف، آبی است که با آب توالت ترکیب شده باشد. آب سیاه نیازمند تصفیه‌های بیولوژیک و شیمیائی است و باید قبل از استفاده ضدعفونی و تنها در مصارف خارجی، استفاده شود. نوع دوم آب خاکستری است که شامل پساب حمام، دوش، حوضچه‌های دستی، ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و ظرفشویی آشپزخانه، به استثنای جریان توالت تعریف می‌شود. براساس کاربرد، آب خاکستری نیازمند تصفیه کمتری نسبت به آب سیاه است و عموماً حاوی مواد بیماری‌زای کمتری است (ریاحی نیا، ۱۳۹۳). در کشورهای توسعه یافته تاحدود ۶۰تا۷۰ درصد از فاضلاب خانگی را آب خاکستری تشکیل می‌دهد. تولید آب خاکستری ارتباط مستقیمی با مصرف آب در یک خانه دارد و به عوامل متعددی از جمله سطح ارائه خدمات، تحمل ساکنان در برابر آلودگی و سطح آگاهی جوامع از خطرات بهداشتی و زیست محیطی بستگی دارد (Bakare et al., 2017).

(Yoonus et al. ,2020) مطالعه‌ای در قطر بیان می‌کند که به طور کلی، آب خاکستری ۵۰ تا ۸۰ درصد از فاضلاب خانگی را تشکیل می‌دهد که حجم آن براساس سبک زندگی، جمعیت‌شناسی و فراوانی آب از ۹۰ تا ۱۲۰ لیتر در روز در نظر گرفته می‌شود. برای کشورهای کم درآمد با کمبود آب و اشکال ساده تأمین آب، حجم آب خاکستری می‌تواند حدود ۲۰ تا ۳۰ لیتر در روز است.

(Bakare et al. ,2017) با جمع‌آوری نمونه‌هایی از فاضلاب آشپزخانه، ماشین لباسشویی و حمام ۷۵ خانوار در شهر دوربان آفریقای جنوبی به بررسی کیفیت آب خاکستری و شناسایی مشخصات فیزیکی-شیمیایی آن پرداختند. ایشان نمونه‌ها را تحت ارزیابی‌های سنجش قلیاییت[۱]، رسانایی[۲]، کدورت[۳]، جامدات کل[۴]، اکسیژن‌خواهی شیمیایی[۵]و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی[۶] قرار دادند. در این پژوهش مشاهده شد که تفاوت معناداری در پارامترهای ارزیابی میان آب

خاکستری آشپزخانه و حمام و لباسشویی وجود دارد، همچنین مشخصات فیزیکی-شیمیایی آب خاکستری به طور قابل توجهی در میان خانوارهای مختلف متفاوت است. بنابراین این پژوهش بیان می‌دارد که آب خاکستری تولید شده را نمی توان به راحتی با استفاده از فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی و یا فناوری‌های دیگر، تنها براساس میانگین نرخ COD و BOD تصفیه نمود.

(تابش و همکاران ،۱۳۹۸) میزان متوسط سرانه‌ی مصرف آب را ۱۵۱ لیتر در روز نشان می‌دهد، که شامل ۵/۴۷ درصد آبیاری فضای سبز، ۱/۶۶ درصد آشامیدن، ۵۰/۷ درصد حمام، ۲/۰۵ درصد آب مصرفی هنگام مسواک زدن، ۰/۱۲ درصد شست‌وشوی اتومبیل، ۵/۴۷ درصد شست‌وشوی لباس، ۱۰/۴ درصد شست‌وشوی ظروف، ۲/۹ درصد پخت و پز، ۶/۱۱ درصد روشویی، ۱۷/۶۷ درصد توالت و ۲۵/۱ درصد سایر مصارف است

۱-۲- تصفیه آب خاکستری

در تصفیه به صورت ترکیبی، مطابق روش‌های تصفیه آب خاکستری باید به سه روش شیمیایی، بیولوژیکی وفیزیکی صورت گیرد. از طرف دیگر (Eriksson et al. (2003 بیان می‌کند که در صورت استفاده مجدد از آب خاکستری برای شستشوی توالت یا آبیاری، خطر گسترش بیماری‌ها به دلیل قرار گرفتن در معرض میکرو ارگانیسم‌های موجود در آب ،یک نکته مهم خواهد بود، علاوه بر این، این خطر وجود دارد که میکروارگانیسم‌های موجود در آب خاکستری هنگام استفاده از سیفون توالت، به شکل آئروسل‌هایی در فضا پخش شوند که در این صورت استنشاق و تماس دست با دهان می‌تواند خطرناک باشد. رشد میکروارگانیسم‌ها و برخی مواد شیمیایی درون سیستم منبع دیگری برای خطر است. از طرف دیگر وجود مواد جامد معلق ممکن است باعث گرفتگی سیستم توزیع شود و همچنین یکی دیگر از تهدیدات، خطر سولفید است که بوی بسیار نامطبوع ایجاد می‌کند. علاوه بر این خطر آلودگی خاک از طریق دریافت آب خاکستری (شامل نفوذ و یا آبیاری)، به دلیل محتوای آلاینده‌های مختلف موجود نیز باید در نظر گرفته شود؛ به عنوان مثال: نفوذ و آبیاری ممکن است منجر به افزایش غلظت مواد شوینده در خاک شود و برخی از گیاهان به دلیل وجود آب قلیایی دچار مشکل شوند.

۱-۳- ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات[۷] یک روش پذیرفته شده برای اندازه‌گیری و ارزیابی اثرات بالقوه محیط‌زیستی سیستم‌های محصول است (Albrecht et al., 2021). به عبارت دیگر، روش ارزیابی چرخه حیات، ابزار تحلیلی جامع است، که اثرات محیط‌زیستی و در برخی موارد، سلامت انسان، ورودی‌ها و خروجی‌ها در طول چرخه‌حیات یک محصول، فرآیند یا خدمات را ارزیابی می‌کند (Gamage, 2011).

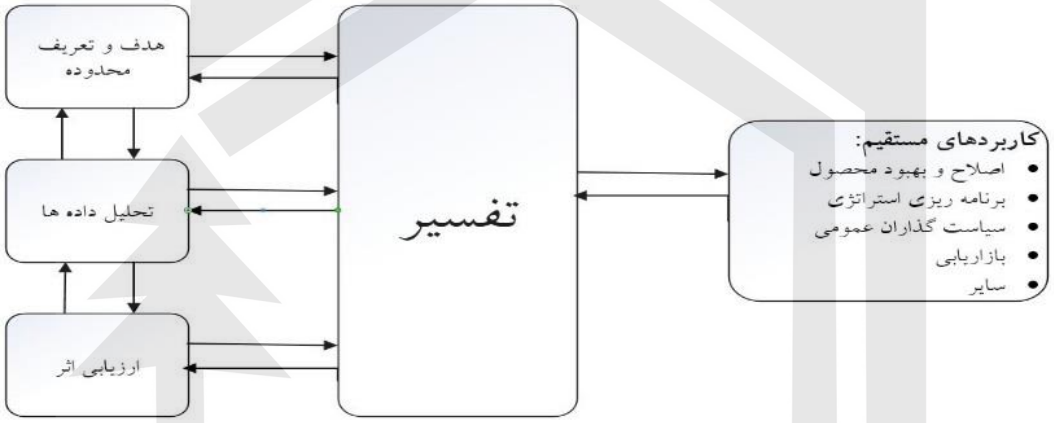
به طور کلی، ارزیابی چرخه‌حیات در فناوری‌های بالغ یا در مقیاس صنعتی صورت می‌گیرد؛ با این وجود، مرحله طراحی یا توسعه، اطلاعات مهمی در مورد اثرات بالقوه محیط‌زیستی ارائه می‌دهد که به منظور تعیین رتبه‌بندی بخش عمده‌ای از اثرات محیط‌زیستی، فناوری‌ها و محصولات جدید به کار گرفته می‌شود (Albrecht et al., 2021).

ارزیابی پایداری برای فناوری‌های در حال ظهور، شرط لازم برای فرآیند پایدار و توسعه محصول است. ارزیابی چرخه‌حیات در مرحله تحقیق و توسعه می‌تواند به افزایش اشتراک دانش کمک کند و مهم‌تر از همه، می‌تواند با تولید

اطلاعاتی در مورد عملکرد محیط‌زیستی فرآیندها و محصولات جدید و آشکار کردن فرصت برای فرآیند پایدار و توسعه محصول، از کل پروژه تحقیق و توسعه پشتیبانی کند (Albrecht et al., 2021).

ارزیابی چرخه حیات ابزار مدیریت محیط‌زیست است که برای ارزیابی سامانه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و اثرات محیط‌زیستی را در کل چرخه حیات یک فرآیند مورد ارزیابی قرارمی‌دهد (عطاریان و مختارانی، ۱۳۹۳). چارچوب کلی روش ارزیابی چرخه‌حیات توسط SETAC و ISO استاندارد شده است. همچنین به منظور ساده‌سازی، محصولات نرم‌افزاری بی‌شماری مانند SimaPro، GaBi و Open LCA وجود دارند (Gamage, 2011).

عطاریان و مختارانی (۱۳۹۳) به بررسی روش ارزیابی چرخه‌حیات پرداختند، بر اساس این تحقیق روش ارزیابی چرخه‌حیات مطابق شکل۱ دارای ۴ گام است: گام اول تعریف هدف و دامنه مورد بررسی، گام دوم تجزیه و تحلیل موجودی، گام سوم ارزیابی پیامد وگام چهارم تفسیر است. همچنین از این روش می‌توان برای توسعه و بهبود محصول، طرح‌ریزی راهبردی، تهیه خط مشی عمومی و بازاریابی استفاده کرد. این کاربری‌ها می‌توانند در ارزیابی سیستم‌ها، محصولات، فرآیندها و خدماتی مانند تصفیه آب و فاضلاب، مدیریت پسماند، فناوری‌های تولید انرژی و غیره مورد استفاده قرارگیرند.



شکل ۱- مراحل روش ارزیابی چرخه حیات (Gamage, 2011).

طی سال‌های اخیر دو رویکرد برای ارزیابی چرخه حیات به وجود آمده است؛ ۱- رویکردی که به عنوان تاریخچه محصول، جریان‌های اولیه و پیامدهای محیط‌زیستی آن را بیان می‌کند؛ ۲- رویکردی که به بررسی و مقایسه عواقب بالقوه محیط زیستی سیستم‌ها و فرایندهای مختلف محصول می‌پردازد. سازمان بین المللی استاندارد در استانداردهای ۱۴۰۴۰ تا ۱۴۰۴۳ ارزیابی چرخه حیات را مستند سازی نموده و به صورت دستورالعمل‌هایی ارائه کرده است. این سازمان در سال ۲۰۰۶ استاندارد شماره ۱۴۰۴۴ را به عنوان جایگزین سه استاندارد ۱۴۰۴۱ تا ۱۴۰۴۳ معرفی کرده است (عطاریان و مختارانی، ۱۳۹۳).

۱-۳-۱- مراحل ارزیابی اثرات و کاربرد ارزیابی چرخه‌حیات

از روش ارزیابی چرخه‌حیات برای به دست آوردن سیاهه داده‌ها، مجموعه‌ای از نیازها (منابع) و خروجی‌های سیستم در حال ارزیابی استفاده می‌شود. مکان‌هایی که منابع از آن‌ها گرفته می‌شود و همچنین محل پردازش در طول چرخه عمر محصول ذکر می‌شود. در مرحله ارزیابی تأثیر، از یک روش ارزیابی با استفاده از چندین دسته تأثیر (محیط‌زیستی،

اجتماعی و اقتصادی) استفاده می‌شود. این دسته از اثرات برای شناسایی ریسک برای سیستم‌های سطح بالاتر که قادر به تأثیر بر سیستم محصول هستند، امکان پذیر است. نتایج ارزیابی تأثیر نقش مهمی در شناسایی نقاط حساس در طول چرخه حیات دارد. این نقاط با توجه به مواد، منشأ ، نوع تأثیر و غیره مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و خطرات ناشی از این نقاط برای شناسایی حوادثی که ممکن است بر سیستم محصول از سیستم‌های سطح پایین تأثیرگذار باشد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (Gamage, 2011).

ارزیابی تأثیر با استفاده از روش‌های موجود مانند EDIP 97، EDIP 2003، CML2001، EcoIndicator99، TRACI و ReCiPe صورت می‌گیرد. این روش‌ها از نظر ارزیابی مسئله، نوع گرا (همچنین به عنوان نقطه میانی شناخته می شوند) یا آسیب گرا (یا نقطه پایانی) تفکیک می‌شوند. روش نقطه میانی، جریان‌ها را به درون مضامین محیطی (بین میزان انتشار و خسارت) که در آن سهیم هستند، طبقه‌بندی می‌کند، در حالی که روش نقطه پایانی خسارت به مضامین محیط‌زیستی مانند آسیب به سلامت انسان، سلامت اکوسیستم یا منابع را مدل می‌کند (Gamage, 2011).

(Yoonus et al. ,2020) مزایای محیط‌زیستی ارزیابی چرخه‌حیات یک سیستم بازیافت آب خاکستری مستقر در خوابگاه دانشجویی دختران در قطر را در مقایسه با سیستم‌های فرآیند نمک زدایی معمولی (۹۹ درصد آب مصرفی قطر از فرآیند دقیق شیرین‌سازی آب دریا بدست می‌آید) ارزیابی کرد. در این مطالعه، سیستم راکتور زیستی-غشایی[8] به عنوان تکنیک تصفیه آب خاکستری انتخاب و به‌منظور ارزیابی اثرات از مدل ReCiPe استفاده شده است که میزان انتشار کربن، کاهش فسیلی و سمی بودن برای انسان در سیستم راکتور زیستی-غشایی به ترتیب، ۸/۴۰ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل، ۳/۵۹ کیلوگرم روغن معادل و ۰/۰۶۶ کیلوگرم دیکلرو بنزن[9] کمتر از سیستم نمک‌زدایی است. این نتایج نشان می‌دهد سیستم‌های تصفیه آب خاکستری با استفاده از سیستم رآکتور زیستی-غشایی در مقایسه با فرآیند نمک‌زدایی بسیار سودمند است.

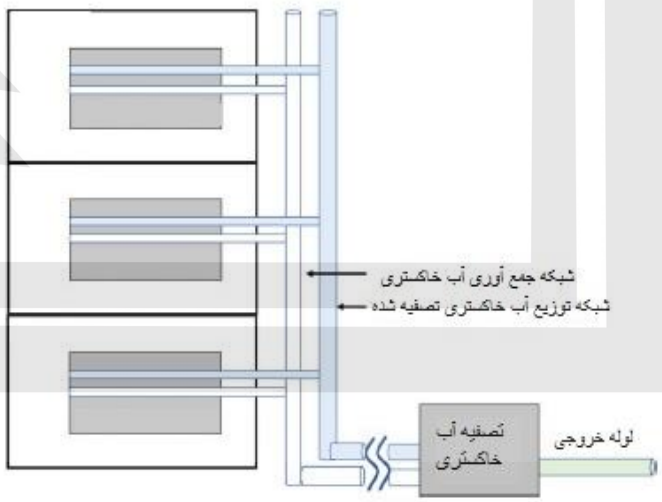
(Cashman et al. ,2018) به مطالعه و ارزیابی محیط‌زیستی و هزینه چرخه عمر در هر دو سیستم بیورآکتورهای غشایی بی‌هوازی و هوازی پرداختند، در این پژوهش تصفیه فاضلاب غیر متمرکز، با استفاده از روش ارزیابی اثرات TRACI مورد بررسی قرار گرفته‌است. مدلهای ارزیابی چرخه عمر برای بیورآکتورهای غشایی هوازی که در دمای محیط کار می‌کنند و همچنین بیورآکتورهای غشایی بی‌هوازی مزوفیلیک، به ترتیب در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد، انتخاب شد.

(Council et al. ,2011) به تجزیه و تحلیل و مقایسه اثرات محیط‌زیستی مربوط به مدل‌های فعلی سیستم‌های متمرکز تصفیه در برابر سیستم‌های غیر متمرکز جایگزین در مقیاس کوچک‌تر با استفاده ازنرم افزار GaBi ارزیابی چرخه‌حیات پرداخت. بیورآکتورهای غشایی فرآیندهای بیولوژیکی و اولترا فیلتراسیون را برای تصفیه فاضلاب ترکیب می‌کنند. پس ازآشغالگیر، فاضلاب در یک محفظه سمی مخلوط می‌شود که در آن باکتری‌های شناور آزاد مواد مغذی را مصرف می‌کنند و خصوصیات شیمیایی آب را تغییر می‌دهند. سپس آب از طریق یک محفظه هوادهی جریان می‌یابد و وارد محفظه سوم می‌شود که حاوی بیورآکتور غشایی است. آب از طریق صفحه غشای فیبری پمپ می‌شود که در آن چربی آزاد و میکروب‌های رشد متصل، در فاضلاب غنی از مواد مغذی به عنوان منبع غذایی استفاده می‌کنند. سپس آب بسیار تصفیه شده تخلیه می‌شود. در این سناریو، بیورآکتورهای غشایی در مقیاس محلی[10] قرار می‌گیرند و فاضلاب به صورت ثقلی به محل تصفیه منتقل می‌شود. بر اساس اندازه پیشنهادی سازنده، هر واحد بسته استاندارد ۵۰۰۰ گالون در روز جریان فاضلاب را مدیریت می‌کند .در مجموع ۲۵۰۰ واحد تصفیه برای تأمین جریان فاضلاب تجمعی ۱۲/۵ میلیون گالن در روز از منطقه خدمات شهری مورد نیاز است. شکل ۲ مرزهای سناریوی بیورآکتور غشایی موجود در این تجزیه و تحلیل را نشان می‌دهد.

شکل ۲- تصفیه به روش بیورآکتور زیستی غشایی Council et al. (2011)

۲- روش‌شناسی

در اولین مرحله، به‌منظور برآورد و تشکیل سیاهه داده‌ها، به علت عدم دسترسی به واحد استفاده مجدد از آب خاکستری در محل در ایران، در این پژوهش همانطور که در شکل ۳ آورده شده است، برای یک برج با ۳۰ طبقه روی زمین که در هر طبقه به جز لابی، ۷ واحد مسکونی قرار گرفته‌است و در هر واحد ۴ نفر سکونت دارند، و ۳ طبقه زیر زمین، یک طبقه برای تصفیه‌خانه و ۲ طبقه پارکینگ، سیستم استفاده مجدد از آب خاکستری در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- شماتیک کلی مجتمع در نظر گرفته شده برای بازیابی آب خاکستری (Kobayashi et al., 2020)

با استفاده از مطالعات پیشین، مشخصات آب خاکستری، همانطور که در جدول ۱ آورده شده است، در نظر گرفته خواهد شد.

Unit 4,No.35 ,2nd Alley, Shah nazari St.
Mader Sq, Mirdamad Blvd.
Tehran1547936511- -Iran
E-mail:manager@abpsoil.com
Tel:(+9821)22227849-22261233
Mobile:(+98912) 2880171
Fax : (+9821) 26423668
Web site: www.abpsoil.com

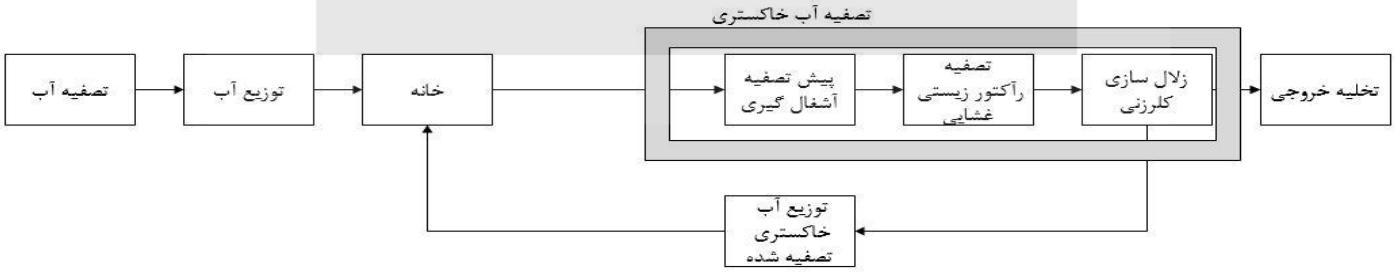
جدول ۱- مشخصات آب خاکستری (Arden et al., 2020)

مشخصات آب خاکستری		مقادیر ورودی آب خاکستری	کیفیت خروجی مورد هدف
مشخصات	واحد		کیفیت خروجی برای مصرف شهری بدون محدودیت
مواد جامد معلق	(میلی گرم بر لیتر)	۹۴	<۵
جامد فرار	درصد	۴۷	-
BODs	(میلی گرم بر لیتر)	۱۹۰	<۱۰
COD	(میلی گرم بر لیتر)	۳۳۰	-
آمونیاک	(میلی گرم نیتروژن بر لیتر)	۱/۹	-
نیتریت	(میلی گرم نیتروژن بر لیتر)	-	-
نیترات	(میلی گرم نیتروژن بر لیتر)	۰/۶۴	-
فسفر کل	(میلی گرم فسفر بر لیتر)	۱/۱	-
کلر باقی مانده	(میلی گرم بر لیتر)	-	۰/۲۵-۰/۵

با توجه به تعریف آب خاکستری که آب مصرف شده در هنگام مسواک زدن، حمام، شست‌وشوی لباس و ظروف، روشویی و توالت است، بنابراین براساس پژوهش‌های بیان شده در بخش۱، میزان تولید آب خاکستری در هر روز به ازای هر فرد حدوداً ۱۱۳ لیتر در نظر گرفته‌می‌شود. از طرف دیگر از آب خاکستری تصفیه شده در فلاش تانک، آبیاری فضای سبز و شست‌وشوی ماشین استفاده خواهد شد که با توجه به سرانه مصرف آب در فلاش تانک توالت فرنگی و ایرانی که به ترتیب ۲۳/۹ درصد و ۱۰/۸ درصد است و همچنین دیگر مقادیر نام برده، میزان مصرف آب خاکستری به ازای هر فرد در هر روز ۶۸ لیتر خواهد بود و مقدار مازاد آب خاکستری به فاضلاب وارد می‌شود.

مطابق پژوهش‌های صورت گرفته، برای طراحی سیستم تصفیه، پارامترهای موثر در طراحی را مطابق جدول ۲ برای سیستم با مشخصات آورده شده در نظر گرفته می‌شود.

برای ارزیابی چرخه حیات واحد تصفیه همانور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، در نظر گرفته می‌شود. سپس انرژی و مواد مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی سیستم و مواد شیمیایی مصرفی در فرآیند مطابق جدول ۲ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۳- مراحل تصفیه آب خاکستری (Kobayashi et al., 2020)

جدول ۲- پارامترهای طراحی سیستم تصفیه آب خاکستری (Arden et al., 2020)

پارامتر	مقادیر در نظر گرفته شده
زمان ماند مواد جامد (روز)	۱۵
زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)	۵
جامدات معلق مایعات مخلوط (میلی گرم بر لیتر)	۱۱۰۰۰
اکسیژن حل شده (میلی گرم اکسیژن در لیتر)	۲
حجم ورودی به بیورآکتور غشایی (لیتر بر متر مربع بر ساعت)	۲۰
سطح عملی بیوراکتور غشایی (متر مربع)	۱۳۰
سطح کلی بیوراکتور غشایی (متر مربع)	۱۹۰
عمق عملی تانکر (متر)	۲/۷
طول تانکر (متر)	۲/۱
عرض یک تانکر (متر)	۱/۱
حجم عملی تانکر (متر مربع)	۱۳
فاصله تمیزکردن فیزیکی (دقیقه)	۱۰
دوره تمیز کردن فیزیکی (ثانیه)	۴۵
فاصله تمیز کردن شیمیایی (ساعت)	۸۴

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی اثرات چرخه‌حیات

اثرات بلند مدت فاز بهره‌برداری سیستم تصفیه آب خاکستری شامل واحد پیش تصفیه و یا آشغالگیری، متعادل‌سازی، بیورآکتورهای غشایی هوازی و واحد زلال‌ساز متشکل از سیستم ماورا بنفش و کلرزنی می‌شود، مورد ارزیابی و مقایسه اثرات قرار می‌گیرد. مطابق گام‌های روش ارزیابی چرخه حیات، به‌منظور ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیستم تصفیه درجا آب خاکستری برای ۱ مترمکعب آب خاکستری تصفیه شده، سیاهه داده‌ها شامل انرژی و مواد مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی سیستم و مواد شیمیایی مصرفی در فرآیند مطابق جدول ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۴- سیاه ورودی داده‌ها

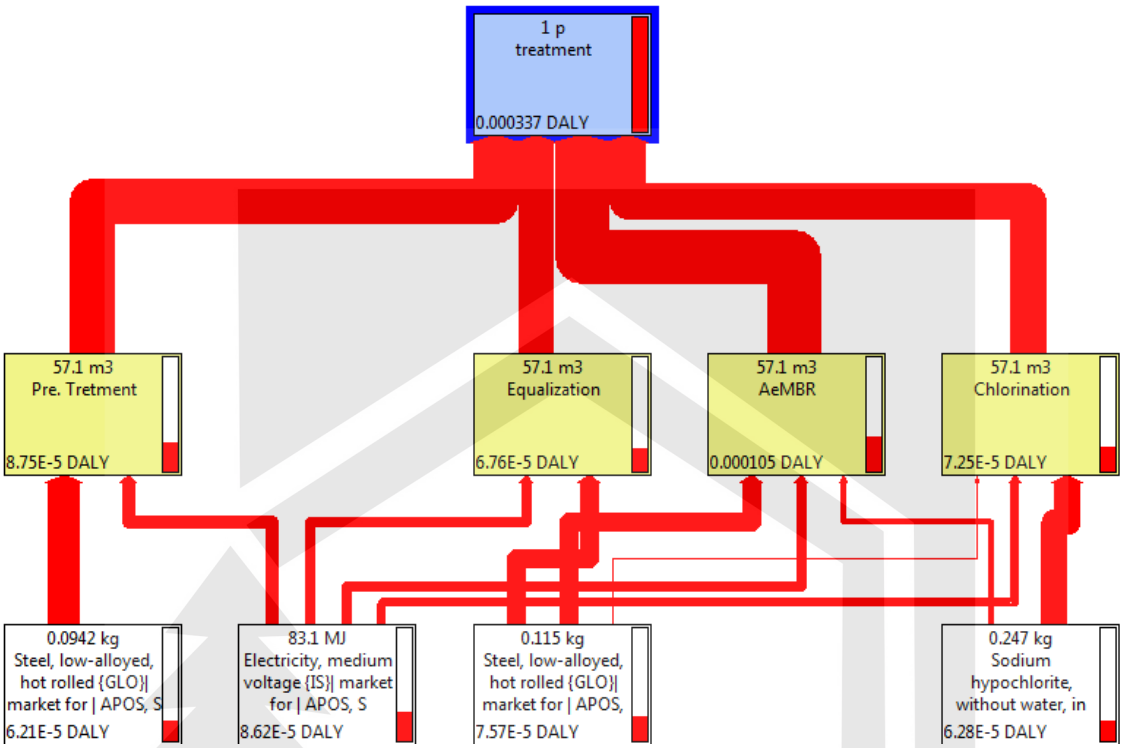
بخش‌های فرآیند	قسمت‌های ورودی	مقادیر	واحد (بر مترمکعب آب خاکستری تصفیه شده)
آشغال گیر	الکتریسیته	۰/۱۱۹	kWh
	ضایعات باقی مانده در آشغال گیر	۰/۰۰۴۰۷	kg
	فولاد	۰/۰۰۱۶۵	kg
مخزن متعادل ساز	بتن	۰/۰۰۰۰۱۶۲	m^3
	فولاد	۰/۰۰۰۹۶۴	kg
	الکتریسیته	۰/۰۹۵	kWh
راکتور زیستی غشایی	بتن	۰/۰۰۰۰۲۵۹	m^3
	فولاد	۰/۰۰۱۶۳	kg
	پلی وینیل فلوراید	۰/۰۰۰۵۹۲	kg
	سدیم‌هایپوکلریت	۰/۰۰۰۷۱۹	kg
	الکتریسیته	۰/۴۲۸	kWh
	متان	۰/۰۰۴۸۶	kg
	نیتروز اکسید	۰/۰۰۰۰۵۰۱	kg
	لجن	۰/۰۰۸۳۲	m^3
اشعه فرا بنفش	الکتریسیته	۰/۰۱۷	kWh
	فولاد	۰/۰۰۰۰۳۴۲	kg
کلرزنی	بتن	۰/۰۰۰۰۰۱۷۳	m^3
	فولاد	۰/۰۰۰۰۴۶۴	kg
	الکتریسیته	۰/۰۸۱	kWh
	سدیم‌هایپوکلریت	۰/۰۰۳۲	kg NaOCL

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Sima pro v9.1 و پایگاه داده‌های Ecoinvent 3 به ارزیابی سیاهه داده‌ها پرداخته می‌شود. از طرفی دیگر در بین روش‌های ارزیابی اثرات بررسی شده، روش ReCiPe 2016 به علت توانایی ارزیابی اثرات میانی برای بررسی دقیق‌تر هر فاز از فرآیند در کنار اثرات نهایی که به سهولت تصمیم‌گیری کمک می‌کند را دارد، انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

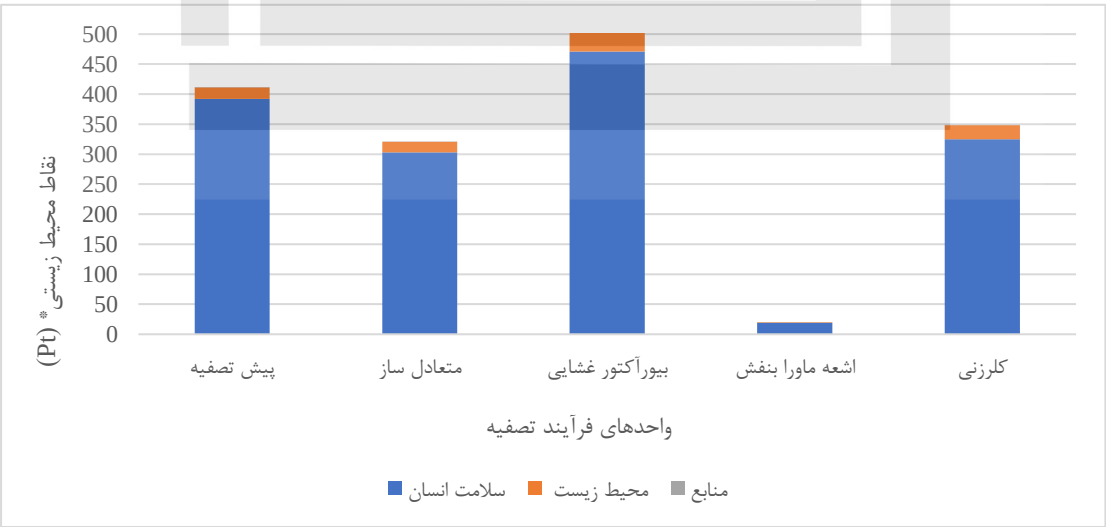
۳-۲- تحلیل نتایج

در شبکه سیستم تصفیه، مطابق شکل ۴ واحد بیورآکتورهای غشایی هوازی بیشتری آثار مخرب را بر انسان را دارد.
مطابق شکل ۵ واحد بیورآکتور غشایی بیشترین اثر مخرب بر سلامت انسان و واحد ضدعفونی توسط اشعه‌ی ماورا بنفش کمترین اثر مخرب بر سه عامل اثر پذیر را دارد؛ و به ترتیب از بیشترین به کمترین اثر در واحد پیش تصفیه،

کلرزنی و متعادل ساز خواهد بود. از طرف ارزیابی اثرات نشان می‌دهد، در فرآیند تصفیه، تأثیر بر منابع و محیطزیستی بسیار کمتر از تأثیر بر سلامت افراد است.



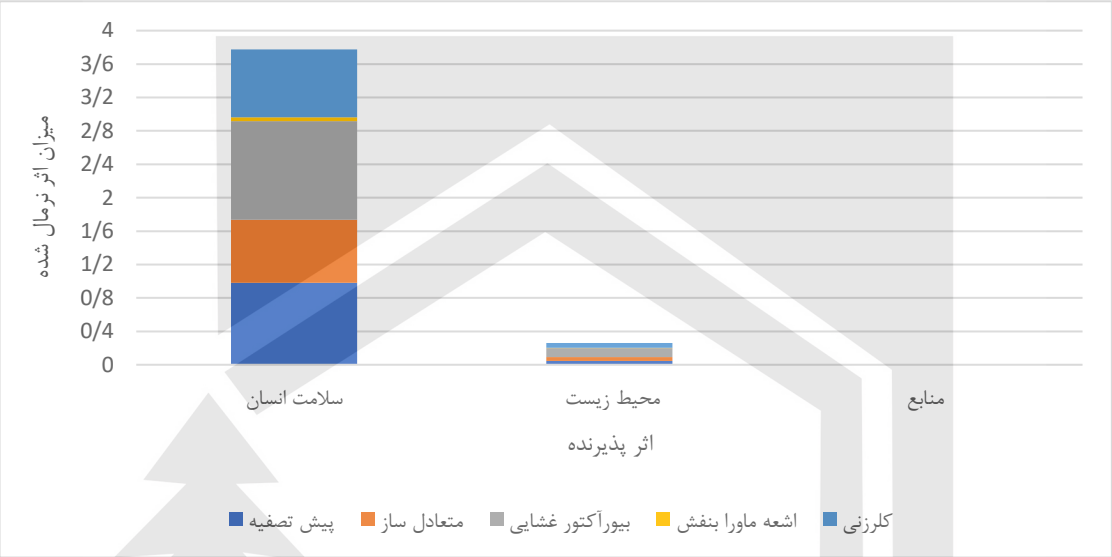
شکل ۴- شبکه واحدهای مختلف تصفیه بر اساس میزان اثرگذاری بر سلامت فرد به روش ReCipe



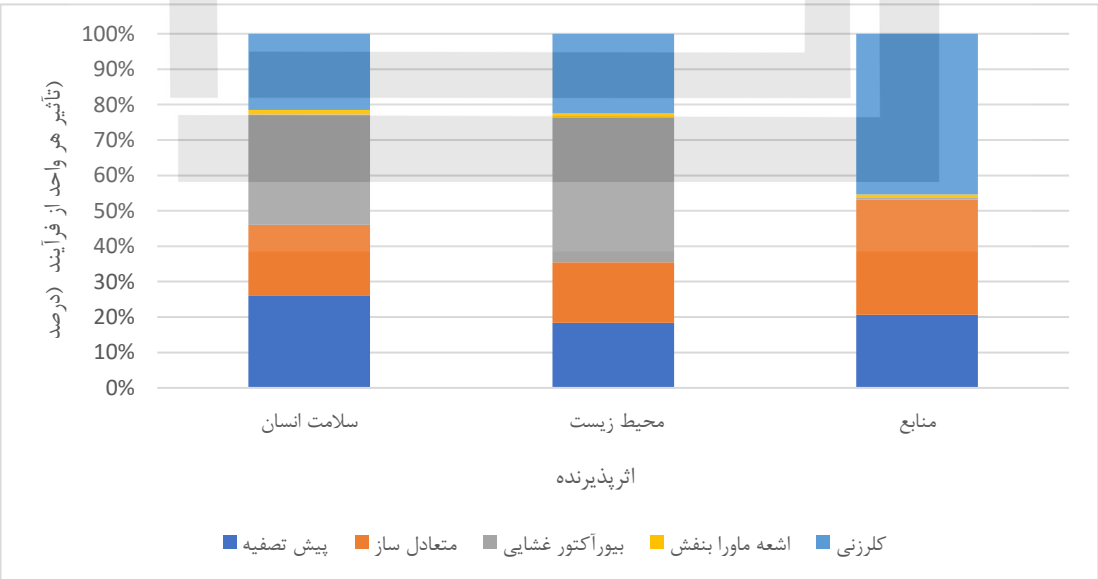
شکل ۵- هیستوگرام وزنی میزان اثرات هر واحد در فرآیند تصفیه آب خاکستری در شاخص اثرات پایانی استفاده از روش ReCipe

*ارزش (Pt=1) نقطه محیط‌زیست نشان‌دهنده یک پنجم بار محیطی سالانه یک ساکن اروپایی متوسط است. با تقسیم کل بار محیطی در اروپا بر تعداد ساکنان و ضرب آن با ۱۰۰۰ محاسبه می‌شود(Bieda et al., 2010).

همانطور که در شکل ۷ مشخص است درصد اثرات مخرب هر یک از واحدها بر سلامت انسان، محیط‌زیست و منابع طبیعی مورد استفاده قرار گرفته در فرآیند بیورآکتور غشایی، متفاوت است و واحد بیورآکتور غشایی بیشترین درصد اثرات مخرب را بر هر سه موارد دارد و پس از آن مرحله کلرزنی بالا ترین درصد تحریب را به خصوص بر منابع و محیط‌زیست خواهد داشت. علاوه بر این، مطابق شکل ۶ که میزان اثرات پایانی پس از نرمال‌سازی را نشان می‌دهد، مشخص است که فرآیند تصفیه بیشترین اثرات مخرب را بر سلامت انسان به‌همراه خواهد داشت.



شکل ۶- مقایسه اثرات پایانی نرمال‌سازی شده، هر واحد در فرآیند تصفیه آب خاکستری بر سلامت انسان، محیط‌زیست و منابع با استفاده از روش ReCipe



شکل ۷- مقایسه تأثیر نرمال‌سازی شده پایانی واحدها در فرآیند تصفیه آب خاکستری بر سلامت انسان، محیط‌زیست و منابع با استفاده از روش ReCipe

۳- نتیجه‌گیری

بازیابی آب خاکستری نیاز به تصفیه متناسب با مصارف در نظر گرفته شده دارد، بنابراین ارزیابی فرآیند تصفیه برای رسیدن به کیفیت آب بازیابی شده مناسب، حائز اهمیت است؛ چرا که در فرآیند بازیابی آب به‌منظور کاهش اثرات مخرب ناشی از مصرف بی‌رویه از منابع طبیعی صورت می‌گیرد و باید به‌گونه‌ای طراحی و اجرا شود تا این اثرات را کاهش دهد. بنابراین ارزیابی اثرات سیستم بازیابی بسیار ضروری است تا با شناخت اثرات و میزان آن‌ها بتوان به‌طور مناسب اثرات را برای کاهش خطرات مدیریت کرد. با توجه به نتایج پژوهش صورت گرفته سیستم تصفیه بازیابی آب خاکستری بیشترین تأثیرات را بر سلامت انسان به‌همراه خواهد داشت، و اثرات محیط‌زیستی و کاهش منابع طبیعی آن به نسبت بسیار کم خواهند بود. همچنین واحد بیورآکتور غشایی بیشترین سهم در این اثرات را خواهد داشت. بنابراین بازیابی آب خاکستری و مدیریت مسائل مرتبط با سلامت انسان ، روشی بسیار مناسب برای کمک به کاهش منابع اولیه و صرفه‌جویی در آب مصرفی خواهد بود.

۴- پی‌نوشت

[1] PH
[2] Conductivity
[3] Turbidity
[4] Total solids (TS)
[5] Chemical Oxygen Demand (COD)
[6] Biological Oxygen Demand (BOD)
[7] Life Cycle Assessment (LCA)
[8] Submerged membrane bioreactor(SMBR)
[9] kg 1,4- Dichlorobenzene equivalent
[10] Neighborhood scale

۵- مراجع

تابش، م، صفرپور، ه، شاهنگیان، ا، (۱۳۹۸) ، "اندازه‌گیری میزان متوسط مصرف سرانه آب خانگی و اجزا مصرف"، *دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدر رفت و بازیافت*، تهران، ایران.

ریاحی نیا، ش.، (۱۳۹۳) ، "آب خاکستری راهکاری جهت استفاده بهینه از آب‌های غیر متعارف"، *اولین همایش ملی محیط زیست دانشگاه پیام نور واحد اصفهان*، اصفهان، ایران.

عطاریان، پ.، مختارانی، ن.، (۱۳۹۳) ، "ارزیابی چرخه حیات (LCA) "، هفتمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی محیط‌زیست، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران

راهداران سما، (۱۳۹۷) ، "منابع آب جایگزین در ساختمان‌ها"، دفتر مدیریت مصرف و ارتقای بهره‌وری آب و آبفا، معاونت آب و فاضلاب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

Albrecht, S., Fischer, M., Leistner, P. and Schebek, L. eds., 2020. *Progress in Life Cycle Assessment 2019*. Springer International Publishing AG.

Arden, S., Morelli, B., Schoen, M., Cashman, S., Jahne, M., Ma, X.C. and Garland, J., 2020. Human Health, Economic and Environmental Assessment of Onsite Non-Potable Water Reuse Systems for a Large, Mixed-Use Urban Building. *Sustainability*, 12(13), 5459.

Bakare, B.F., Mtsweni, S. and Rathilal, S., 2017. Characteristics of greywater from different sources within households in a community in Durban, South Africa. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *7*(4), 520-528.

Benami, M., Gillor, O. and Gross, A., 2016. Potential microbial hazards from graywater reuse and associated matrices: A review. *Water research*, 106, 183-195.

Bieda, B., Henclik, A. and Kulczycka, J., 2010. Life cycle assessment in the energy generation process-variant analysis in metallurgical industry. *Archives of Metallurgy and Materials*, *55*(4), pp.1083-1088.

Cashman, S., Ma, X., Mosley, J., Garland, J., Crone, B. and Xue, X., 2018. Energy and greenhouse gas life cycle assessment and cost analysis of aerobic and anaerobic membrane bioreactor systems: Influence of scale, population density, climate, and methane recovery. *Bioresource technology*, 254, 56-66.

Council, C.G.B., 2011. Clean Water, Healthy Sound, A Life Cycle Analysis of Alternative Wastewater Treatment Strategies in the Puget Sound Area. *Seattle, WA*.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. and Ledin, A., 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85-104.

Eriksson, E., Auffarth, K., Eilersen, A.M., Henze, M. and Ledin, A., 2003. Household chemicals and personal care products as sources for xenobiotic organic compounds in grey wastewater. *Water SA*, 29(2), 135-146.

Babarenda Gamage, G., 2011. *A new model for assessing sustainability of complex systems: Integrating LCA and RA for sustainability*, Doctoral dissertation, ResearchSpace@ Auckland.

Ghisi, E. and Ferreira, D.F., 2007. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512-2522.

Kobayashi, Y., Ashbolt, N.J., Davies, E.G. and Liu, Y., 2020. Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions. *Environment International*, 134, 105215.

Leong, J.Y.C., Oh, K.S., Poh, P.E. and Chong, M.N., 2017. Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *Journal of cleaner production*, 142, pp.3014-3027.

Oh, K.S., Leong, J.Y.C., Poh, P.E., Chong, M.N. and Von Lau, E., 2018. A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, *171*, 17-29.

Shaikh, I.N. and Ahammed, M.M., 2020. Quantity and quality characteristics of greywater: a review. *Journal of Environmental Management*, 261, 110266.

Yoonus, H. and Al-Ghamdi, S.G., 2020. Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis. *Science of the Total Environment*, 712, p.136535.

Life Cycle Assessment of a Graywater Treatment Membrane Bioreactors Process

Zeinab Zarei[1], Masood Tabesh[2*]

1- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, z_zarei@ut.ac.ir

2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, mtabesh@ut.ac.ir

Abstract

Increasing population and cultural level of communities, the demand and use of treated water for domestic use has increased significantly, and on the other hand, increasing global warming, climate change and drought, which leads to a decrease in natural water resources, in contrast to increasing demand has created a water crisis in many countries. One of the best solutions is to help improve water recovery and reuse conditions. Gray water is a good option for reuse due to its low pollution compared to wastewater and sewage. In order to bring gray water quality to appropriate reuse standards, the treatment process plays an important role. In this research, aerobic bioreactors are used for in situ treatment of gray water produced in the complex. In order to evaluate comprehensively, the life cycle evaluation method is studied using purification stages including pre-treatment, flow balancing, secondary treatment in aerobic bioreactors and clarification in the operation phase. The evaluation shows that the destructive effects of the environment and natural resources are very small compared to the effects on human health. Therefore, by making appropriate decisions and managing the harm to human health, the use of this system will be appropriate.

Keywords**: Graywater, Reuse, Treatment, MBRs, LCA**