

Investigating the Performance of Membrane Technology with UV System for the Treatment of Gray water and Rainwater

E. Sadati Seyedmahalleh^{1*}, N. Mehrdadi², Gh. R. Nabi Bidhendi², M. J. Amiri³

1- Ph.D. Student of Environmental Engineering, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. 2- Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. 3- Assistant Professor, Department of Environmental Planning, Management and Education, Graduate School of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

* (Corresponding Author Email: esadati@ut.ac.ir)

Received: 22-05-2023 Revised: 23-09-2023
Accepted: 19-10-2023 Available Online: 13-02-2024

بررسی عملکرد تکنولوژی غشایی همراه با سیستم UV جهت تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران

احسان ساداتی سیدمحلله^{۱*}، ناصر مهرداد^۲، غلامرضا نبی بیدهندی^۲، محمدجواد امیری^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۲- استاد دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۳- استادیار گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* (نویسنده مسئول، E-Mail: esadati@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

Abstract

Graywater and rainwater reuse is one of the primary alternatives for diminishing water consumption in households, commercial and industrial buildings. However, investigating the performance of membrane technology coupled with UV system for the treatment of gray water and rainwater needs more applicable information. The purpose of this study is to evaluate the performance of an experimental system based on membrane technology combined with UV for the treatment of gray water and rainwater in Iran. In this regard, at different pressures (9.5, 4.5, and 1.5 bar), different arrangements of membranes, including microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), and reverse osmosis membranes were investigated along with UV lamps. Laboratory scale experiments were conducted to investigate the potential of these technologies and present an optimal membrane arrangement. The efficiency of the process has been discussed in terms of turbidity, TDS, pH, COD, Escherichia coli, and total coliforms. The results indicated that for both gray water and rainwater treatment, the arrangement consisting of a screen, MF, UF, RO, and UV with a pressure of 9.5 bar is the best scenario for reducing COD, TDS, turbidity, and coliform. According to the obtained results, the output flow in the optimal state was 6 liters per minute, and the mentioned scenario was able to remove 95% COD, 98% TDS, 96% turbidity, and 100% coliform from graywater, as well as 82% COD, 94% TDS, 91% turbidity, and 100% coliform from rainwater. Therefore, the study acknowledges that membrane technology with UV is an attractive process and will play an important role in future sustainable life.

Keywords: Rainwater, Gray Water, Reuse, Membrane Technology, UV.

چکیده

استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری و آب باران یکی از جایگزین‌های اولیه برای کاهش مصرف آب در خانوارها و ساختمان‌های تجاری و صنعتی است. با این حال، بررسی عملکرد فناوری غشایی به همراه سیستم UV جهت تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران به اطلاعات کاربردی بیشتری نیاز دارد. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی عملکرد یک سیستم آزمایشی مبتنی بر فناوری غشایی همراه با UV برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران در کشور ایران می‌باشد. در این راستا در فشارهای مختلف (۹/۵، ۴/۵، ۱/۵ بار)، آرایش‌های مختلفی از غشاهای شامل میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF) و غشاهای اسمز معکوس به همراه لامپ UV بررسی شدند. آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی پتانسیل این فناوری‌ها و ارائه آرایش بهینه غشاهای انجام شد. کارایی فرآیند از نظر کدورت، Escherichia coli، COD، pH، TDS و توتال کلیفرم مورد بحث قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که هم برای تصفیه فاضلاب خاکستری و هم برای تصفیه آب باران، چیدمانی متشکل از دانه‌گیر، RO، UF، MF و UV با فشار ۹/۵ بار، بهترین سناریو در کاهش COD، TDS، کدورت و کلیفرم می‌باشد. مطابق با نتایج به دست آمده، دبی خروجی در حالت بهینه ۶ لیتر بر دقیقه بود و سناریو مذکور قادر به حذف ۹۵٪ COD، ۹۸٪ TDS، ۹۶٪ کدورت و ۱۰۰٪ کلیفرم برای فاضلاب خاکستری و همچنین ۸۲٪ COD، ۹۴٪ TDS، ۹۱٪ کدورت و ۱۰۰٪ کلیفرم برای آب باران می‌باشد. از این رو پژوهش حاضر بیان می‌کند فناوری غشایی همراه با UV فرآیندی جذاب است و نقش مهمی در زندگی پایدار در آینده خواهد داشت. **واژه‌های کلیدی:** آب باران، آب خاکستری، استفاده مجدد، فناوری غشاهای UV.

Etchepare و Van der Hoek، ۲۰۱۵) که در سطح جهانی از اقیانوس‌ها تا مناطق قطبی توزیع شده‌اند (Mahmoudnia، ۲۰۲۳، Mahmoudnia و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری برای جبران تقاضای آب و جلوگیری از آلودگی جهانی به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از آب باران و فاضلاب خاکستری برای جایگزینی آب غیر آشامیدنی مفهوم جدیدی نیست بلکه جایگزینی قدرتمند برای مدیریت پایدار آب می‌باشد (Kim و همکاران، ۲۰۰۷). آب باران را می‌توان از سطوح غیر قابل نفوذ ساختمان جمع‌آوری کرد. آب باران معمولاً به برخی فرایندهای تصفیه از جمله ته‌نشینی، فیلتراسیون و گندزدایی نیاز دارد. علاوه بر این، فاضلاب خاکستری از منابع داخلی به غیر از توالت‌ها از جمله دوش و سینک و دستشویی‌ها جمع‌آوری می‌شود. فاضلاب خاکستری معمولاً به برخی تکنیک‌های تصفیه از جمله غربالگری، فیلتراسیون و ضد عفونی نیاز دارد. استفاده مجدد و بازیافت فاضلاب خاکستری - آب باران توسط بسیاری از محققان در گذشته با استفاده از تکنیک‌های مختلف از جمله فیلتراسیون، جذب، انعقاد و تصفیه بیولوژیکی انجام شده است که جدول (۱) به ارائه خلاصه‌ای از این پژوهش‌ها می‌پردازد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از تصفیه آب باران و فاضلاب خاکستری در پژوهش‌های اخیر

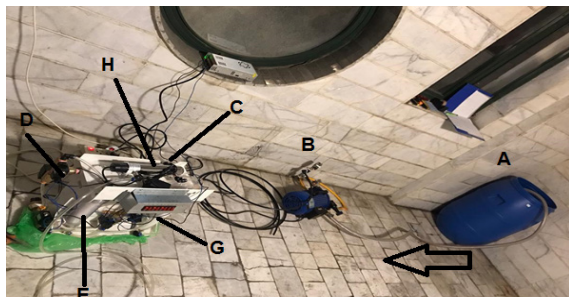
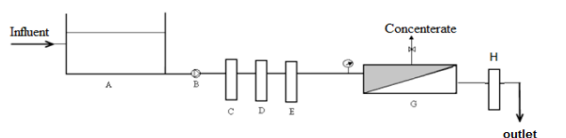
ردیف	نوع پساب	روش	نتایج	مرجع
۱	فاضلاب خاکستری	میکروفیلتراسیون (MF) به‌همراه اسمز معکوس (RO)	این روش تصفیه کل مواد جامد معلق، مواد آلی، آلکیل بنزن سولفونات خطی، رنگ ظاهری و پارامترهای کدورت را تا ۹۰ درصد حذف کرد.	de Oliveira و همکاران، (۲۰۲۰)
۲	فاضلاب خاکستری	فیلترهای رسوبی، فیلتر کربن بلوکی و RO	نرخ حذف حدود ۸۰٪ برای پارامترهای BOD و COD	Onkal Engin و همکاران، (۲۰۱۱)
۳	فاضلاب خاکستری	MBR گرانشی مبتنی بر MF همراه با الکترواکسیداسیون	این روش قادر به ایجاد نفوذ پایدار حاوی کدورت کم و مواد آلی (تا ۶۷/۴٪) است.	Du و همکاران، (۲۰۲۲)
۴	صنایع لبنی	اولترافیلتراسیون و نانو فیلتراسیون	UF و NF دو مرحله‌ای می‌توانند در شرایط رسوب کمتر و شار بالاتر نسبت به NF تک مرحله‌ای عمل کنند	Luo و همکاران، (۲۰۱۱)
۵	فاضلاب خاکستری	سیستم اولترافیلتراسیون با ممبران‌های اسپیرال و RO	حذف ۹۳٪ BOD	Reang و Nath، (۲۰۲۱)
۶	آب باران	فیلتر فیبر و غشای فلزی	ادغام مدیا فیلتر فیبر در اولین واحد تصفیه امکان تصفیه کارآمد آب باران را در شرایط مختلف فراهم کرد.	Kim و همکاران، (۲۰۰۷)
۷	آب باران	فیلتراسیون غشایی مبتنی بر گرانش کم (GDM)	کربن آلی محلول (DOC) را می‌توان با فرآیند GDM حذف کرد در حالی که راندمان حذف باکتری و کدورت خوب بود. حتی اگر تحت تأثیر اندازه منافذ غشای UF قرار گیرد، میزان حذف باکتری همچنان می‌تواند به نزدیک به ۹۵٪ برسد.	Ding و همکاران، (۲۰۱۷)

خانگی فشرده در پژوهش Onkal Engin و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شد. آن‌ها همچنین دریافتند که برای فاضلاب خاکستری پیش‌تصفیه شده، نرخ حذف COD حدود ۸۰ درصد است. در مطالعه دیگری با هدف استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری توسط یک ماژول UF ماریچی غوطه ور، مشاهده شد میانگین

فشار فزاینده بر منابع آب برای پاسخگویی به نیازهای جامعه، سیستم تامین را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است. همچنین استفاده‌های متناقض به افزایش نگرانی‌ها در مورد کمبود آب دامن زده است. بنابراین، حفاظت از منابع آب و استفاده مجدد از پساب در سال‌های اخیر اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است و بخش جدی از استراتژی‌های افزایش کارایی و امنیت مصرف آب می‌باشد (Wanjiru و همکاران، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر اجرای این جایگزین‌ها برای مدیریت آب شهری، عمدتاً در سطح غیرمتمرکز، مانند سیستم‌های استفاده مجدد از آب باران و فاضلاب خاکستری افزایش یافته است (Sauri و Domènech، ۲۰۱۰). فاضلاب خاکستری به‌عنوان فاضلاب حاصل از دوش‌ها، دستشویی‌ها، سینک‌های آشپزخانه، ماشین‌های لباسشویی و وان حمام تعریف می‌شود و در سطح بین‌المللی به‌عنوان یک منبع آب جایگزین برای مصرف غیر شرب شناخته می‌شود (Yadav و Ghaitidak، ۲۰۱۳). Van der Hoek و Etchepare همچنین بیان کردند که فاضلاب خاکستری می‌تواند منبع ریزآلاینده‌های مختلف باشد

محققان همچنین عملکرد یک سیستم فیلتراسیون غشایی UF مستقیم برای تصفیه فاضلاب خاکستری غیرمتمرکز مغذی را بررسی کردند (Li و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس نتایج آنها میزان حذف مواد آلی به ۸۱٫۶ درصد رسید. علاوه بر این، امکان استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری پیش‌تصفیه شده با یک سیستم RO

غشا الترافیلتراسیون مورد استفاده ساخت شرکت کره‌ای CSM و با جنس پلی‌اترولفون به شکل فیبر توخالی در ابعاد $5 \times 5 \times 51$ سانتی‌متر می‌باشد. غشا اسمز معکوس ساخت شرکت FilmTecTM membranes به صورت ماریچج بافته شده از پلی‌امید و در ابعاد $1/6 \times 3/5 \times 53$ سانتی‌متر می‌باشد. طول لامپ UV ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و تمامی غشاها در محفظه‌ای به ابعاد 65×70 سانتی‌متر نصب شدند. از فیلترهای دانه‌گیر برای محافظت از غشا در برابر ذرات وارد شده به سیستم استفاده شد. علاوه بر این، لامپ UV به عنوان یک ضد عفونی کننده عمل می‌کند. بنابراین، فیلترهای دانه‌گیر و لامپ‌های UV در همه حالت‌ها فعال هستند. یک شیر برقی که سیگنال‌ها را از سویچ‌های فشار پایین و فشار قوی دریافت می‌کند نیز از غشا محافظت می‌کرد.



شکل ۱- طرح پایلوت آزمایشی (A) مخزن تغذیه، (B و F) پمپ، (C) دانه‌گیر، (D) میکروفیلتراسیون، (E) اولترافیلتراسیون (G) واحد اسمز معکوس و (H) واحد UV

• مشخصات پساب ورودی

۱- آب باران

آب باران می‌تواند شامل سطوح زمین و پشتبام باشد. در مطالعه حاضر تنها سیستم جمع‌آوری سقفی در نظر گرفته شده است. نمونه‌های آب باران از بام یک منزل ویلایی واقع در شهر ساری، مازندران، ایران جمع‌آوری شد و زمان ماند در سپتیک تانک ۳۰ روز بود. اجزای تشکیل دهنده آب باران در جدول (۲) ارائه شده است.

۲- فاضلاب خاکستری

فاضلاب خاکستری از سینک حمام، دستشویی، دوش، سینک آشپزخانه و ماشین لباسشویی یک خانواده ۵ نفره در شهر ساری، استان مازندران جمع‌آوری شد. فاضلاب خاکستری توسط گرانش در یک مخزن ذخیره و سپس به یک مخزن سپتیک پمپ شد. همه نمونه‌ها مستقیماً استفاده شدند یا در دمای 1 ± 4 درجه سانتیگراد نگهداری شدند و ظرف ۷ ساعت آنالیز شدند. اجزای تشکیل دهنده فاضلاب خاکستری در جدول (۲) ارائه شده است.

میزان حذف TOC 83.4% بود (Li و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین نیترژن کل و فسفر کل پساب به ترتیب به $16/7$ و $6/7$ میلی‌گرم در لیتر رسید. به طور مشابه، در مطالعه‌های دیگر، عملکرد فرآیندهای UF و RO را برای تصفیه فاضلاب خاکستری و بازیابی سورفکتانت بررسی شد، محققان گزارش کردند حداکثر بازیابی سورفکتانت به 82% می‌رسد (Nath و Reang، ۲۰۲۱).

استفاده از اسمز معکوس برای استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری-آب باران یک جایگزین نسبتاً قابل استفاده است (Luo و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال، برای حفظ عملکرد بالا و افزایش عمر سیستم‌های RO، لازم است قبل از سیستم RO، پیش‌تصفیه انجام شود. یک پیش‌تصفیه مناسب می‌تواند رسوب، رسوب هم‌زمان و قطبش غلظت سیستم RO را به حداقل برساند. در نتیجه، راندمان حذف، نرخ بازیابی، شار نفوذ و هزینه‌های عملیاتی بهینه می‌شوند.

با توجه به جدول (۱) می‌توان دریافت اگرچه پژوهش‌هایی در خصوص عملکرد سیستم‌های غشایی برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران وجود دارد، بررسی سناریو بهینه برای آرایش غشا و فشار برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف مطالعه حاضر پایش یک سیستم آزمایشی برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران در کشور ایران، با تمرکز بر کیفیت فاضلاب خاکستری تصفیه شده و آب باران با استفاده از فناوری غشایی همراه با UV می‌باشد. سیستم تصفیه شامل میکروفیلتراسیون تحت فشار (MF)، اولترافیلتراسیون (UF) همراه با غشاها اسمز معکوس و UV می‌باشد. ارزیابی تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران بر اساس پایش پارامترهای فیزیکی‌شیمیایی برای ارزیابی کیفیت فاضلاب خاکستری و آب باران انجام شده است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از یک سیستم تصفیه ترکیبی حاوی MF، UF، RO و UV به منظور تعیین کارایی تصفیه و استفاده مجدد از آب باران و فاضلاب خاکستری برای مصارف شهری از جمله آبیاری فضای سبز استفاده شد (شکل ۱). مشخصات خوراک ورودی به سیستم در جدول (۲) و توضیحات مربوط به سیستم تصفیه مورد استفاده در ادامه آورده شده است.

مجموعه مورد استفاده در این کار شامل مخزن پساب ورودی ساخته شده از پلی‌اتیلن (۳۰ لیتر)، پمپ‌های تغذیه (Pedro Water Pump)، دانه‌گیر، غشاهای میکروفیلتر، غشاهای اولترافیلتر، واحد اسمز معکوس و لامپ UV می‌باشد. غشا میکروفیلتراسیون مورد استفاده ساخت شرکت کره‌ای CSM به شکل فیبر توخالی و با سایز مش 0.4 میکرومتر و ابعاد $50 \times 4/5$ سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۲- خواص نمونه‌های آب باران و فاضلاب خاکستری

نوع فاضلاب	پارامترها	غلظت
فاضلاب خاکستری	EC	۶۶۲ $\mu\text{s}/\text{cm}$
	pH	۷/۴۵
	TDS	۴۸۵ mg/l
	TSS	۲۱۸ mg/l
	کدورت	۱۷۲/۸ NTU
	COD	۵۵۴ mg/l
	کلیفرم‌های مدفوعی	۱۱۰۰ < MPN/100ml
آب باران	توتال کلیفرم	۱۱۰۰ < MPN/100ml
	EC	۳۴۵ $\mu\text{s}/\text{cm}$
	pH	۸/۱
	TDS	۴۰ mg/l
	TSS	۲۳/۲ mg/l
	کدورت	۶/۲ NTU
	COD	۳۲ mg/l
کلیفرم‌های مدفوعی	۱۱۰۰ < MPN/100ml	
توتال کلیفرم	۱۱۰۰ < MPN/100ml	

اعمال شد و در نهایت سناریوی تصفیه بهینه انتخاب شد. دبی طراحی در پژوهش حاضر ۸ لیتر در دقیقه بوده است.

جدول ۳- سناریوهای مختلف فیلتراسیون مورد استفاده در پژوهش حاضر

سناریو/فیلترهای فعال	دانه‌گیر	MF	UF	RO	UV
۱	*	*	*	*	*
۲	*	*	*		*
۳	*		*	*	*
۴	*	*		*	*
۵	*	*			*
۶	*		*		*
۷	*			*	*

علامت * به معنای فعال بودن فیلتر مورد اشاره می‌باشد.

نتایج و بحث

طیف گسترده‌ای از پارامترها برای تعیین کیفیت استفاده مجدد آب برای اهداف مختلف استفاده می‌شوند. غلظت کل نمک‌های محلول یکی از مهمترین عوامل در تعیین کیفیت آب برای آبیاری مزرعه و باغداری است. شوری آب معمولاً با EC یا TDS اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این، COD، کدورت و pH از جمله پارامترهای مهم در تعیین امکان استفاده مجدد و بازیافت پساب هستند. در بخش‌های بعدی، حذف این عوامل از فاضلاب خاکستری و آب باران مورد بحث قرار گرفته است.

۱- تصفیه فاضلاب خاکستری

به منظور بررسی احتمالات استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری، فاضلاب خاکستری از سینک حمام، دستشویی، دوش، سینک آشپزخانه و ماشین لباسشویی یک خانواده ۵ نفره در شهر ساری، استان مازندران جمع‌آوری و به پایلوت معرفی شدند و آنالیزهای TDS، pH، COD، کدورت، اشربشیا کلیفرم و توتال کلیفرم انجام شد. جداول (۳) و (۴) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به دست آمده در جدول‌های (۴) و (۵) مشاهده شد در تمام سناریوها فشارهای بالاتر عملکرد مناسب‌تری در کاهش پارامترهای کیفی فاضلاب خاکستری دارند. این امر را می‌توان به افزایش سطح غشا به دلیل کاهش نیرو محرکه نسبت داد. نتایج این بخش از پژوهش را دستاوردهای پژوهش Kimura و Oki (۲۰۱۷) تایید می‌کند.

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۴) و (۵) می‌توان دریافت اولین سناریویی که حاوی دانه‌گیر، RO، UF، MF و UV است بهترین سناریو در کاهش COD، TDS، کدورت می‌باشد. بنابراین،

• فرآیند عملیاتی

ارزیابی تغییرات پارامترهای کیفی (TSS، TDS، pH، EC، کدورت، COD، کلیفرم مدفوعی و کلیفرم کل) که برای نظارت بر کارایی پایلوت به کار گرفته شد، با استفاده از روش‌های ارائه شده در استاندارد انجام شدند (WHO، ۲۰۰۶). تجزیه و تحلیل COD بر اساس روش STM 5220 C و آنالیزهای نیترات با استفاده از روش STM 4500 Nitrate-B انجام شد. اندازه‌گیری هدایت و pH با استفاده از یک مولتی‌متر دستی انجام شد. تمامی مواد شیمیایی دارای کیفیت مناسب بودند و در طول آزمایش از آب مقطر آزمایشگاهی استفاده شد.

در مطالعه حاضر عملکرد سناریوهای مختلف فیلتراسیون و فشار برای دستیابی به سناریوی بهینه برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران بررسی شدند. سناریوهای فیلتراسیون مطابق جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفتند. مطابق این جدول، در سناریوی ۱ تمام واحدهای تصفیه، یعنی دانه‌گیر، RO، UF، MF و UV در حالت فعال هستند. در سناریوی ۲ دانه‌گیر، UF، MF و لامپ UV فعال هستند. سناریو ۳ حالتی است که دانه‌گیر، RO، UF و UV فعال هستند. در سناریوی ۴ دانه‌گیر، RO، MF و UV در حالت فعال هستند. در سناریوی ۵ دانه‌گیر، MF و لامپ UV فعال هستند. در سناریوی ۶ دانه‌گیر، لامپ UF و UV فعال و در سناریو ۷ دانه‌گیر، RO و لامپ UV در حالت فعال هستند. برای هر یک از سناریوهای تصفیه فوق، فشارهای ۱/۵، ۴/۵ و ۹/۵ بار به سیستم

سناریوی یک با فشار ۹/۵ بار به عنوان بهترین آرایش فرآیندهای تصفیه برای تصفیه فاضلاب خاکستری انتخاب شد. نتایج برای حذف COD (۹۵٪)، TDS (۹۸٪) و کدورت (۹۶٪) رضایت بخش بود. نتایج نشان داد فرآیند حاوی دانه گیر، UF، RO، MF و UV یک فناوری امیدوارکننده است که می تواند برای تصفیه فاضلاب خاکستری استفاده شود. کیفیت پساب به خوبی دستورالعمل ها را برای استفاده مجدد از فاضلاب خاکستری از جمله $TSS \geq 30$ میلی گرم در لیتر، pH در ۶-۹ و در نهایت $BOD_5 \geq 10-30$ میلی گرم در لیتر، به ویژه

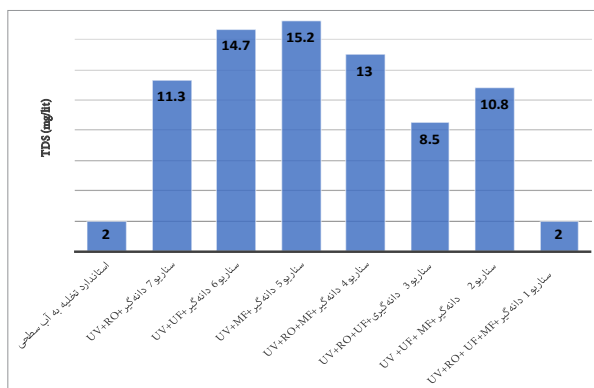
برای آبیاری و شستشوی توالی دارد (WHO، ۲۰۰۶). همچنین از آب تصفیه شده می توان برای کاربردهای مختلف از قبیل کارواش، فلاش تانک و شستشو استفاده کرد (Farago و همکاران، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است در طول آزمایش دبی خروجی در حالت بهینه به میزان ۶ لیتر بر دقیقه بوده است. در شکل های (۲)، (۳) و (۴) نمودار مقایسه ای پارامترهای کیفی برای پساب تصفیه شده برای آرایش های مختلف غشایی در فشار ۹/۵ بار آورده شده است.

جدول ۴- نتایج حذف آلاینده برای تصفیه فاضلاب خاکستری تحت سناریوهای ۱ تا ۴

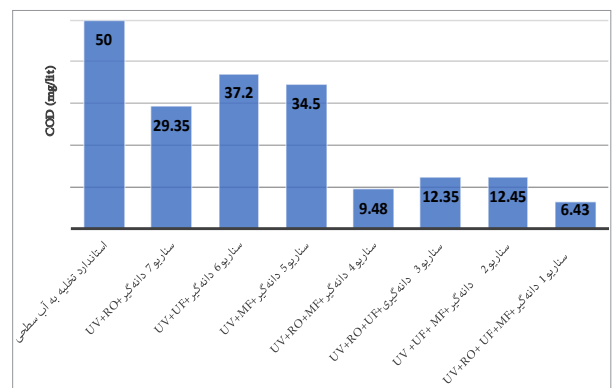
پارامترها	استاندارد تخلیه به آب سطحی	سناریو ۱			سناریو ۲			سناریو ۳			سناریو ۴		
		فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	
کدورت (NTU)	۵۰	۶/۴۳	۷/۷۸	۷/۸۴	۱۲/۴۵	۱۲/۸۷	۱۳/۲	۱۲/۳۵	۱۲/۸۸	۱۲/۸	۹/۴۸	۹/۹۳	۹/۸۴
pH	۸/۶-۵/۵	۷/۳	۷/۰۵	۷/۰۶	۷/۱۵	۷/۰۵	۷/۰۵	۷/۱۶	۶/۹۵	۷/۰۳	۷/۰۶	۶/۹۶	۷/۰۱
TDS (mg/l)	۲	۲	۲/۵	۳/۵	۱۰/۸	۱۱	۱۱/۵	۸/۵	۹	۹/۵	۱۳	۱۳/۶	۱۴/۵
COD	۶۰	۲۵	۲۹	۳۱	۳۱	۳۳	۳۵	۲۸	۳۰	۳۴	۲۹	۳۲	۳۳
E. Coli (mg/l)	۴۰۰	۰	۰±۱	۰±۱	۰±۱	۲	۲	۰±۱	۰±۱	۰±۱	۲	۲	۲
توتال کلیفرم	۱۰۰۰	۰	۰±۱	۰±۱	۰±۱	۲	۲	۰±۱	۰±۱	۰±۱	۲	۲	۲

جدول ۵- نتایج حذف آلاینده برای تصفیه فاضلاب خاکستری تحت سناریوهای ۵ تا ۷

پارامترها	استاندارد تخلیه به آب سطحی	سناریو ۵			سناریو ۶			سناریو ۷		
		فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)
کدورت (NTU)	۵۰	۱۲/۷۷	۱۳/۸۰	۱۳/۸۵	۱۳/۶۵	۱۳/۸۸	۱۳/۹۶	۸/۸۹	۸/۹۲	۸/۹۷
pH	۸/۶-۵/۵	۷/۱۲	۷/۰۷	۷/۰۹	۷/۱۶	۷/۱۵	۷/۰۴	۷/۱۸	۶/۹۹	۷/۰۲
TDS (mg/l)	۲	۱۵/۲	۱۵/۸	۱۶/۴	۱۴/۷	۱۵	۱۵/۸	۱۱/۳	۱۱/۶	۱۲
COD	۶۰	۳۴/۵	۳۴/۶	۳۵	۳۷/۲	۳۸/۶	۳۸/۶۵	۲۹/۳۵	۲۹/۸۵	۳۰
E. Coli (mg/l)	۴۰۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰±۱	۰±۱
توتال کلیفرم	۱۰۰۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰±۱	۰±۱



شکل ۳- مقایسه TDS (mg/lit) خروجی برای فاضلاب خاکستری در آرایش های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار

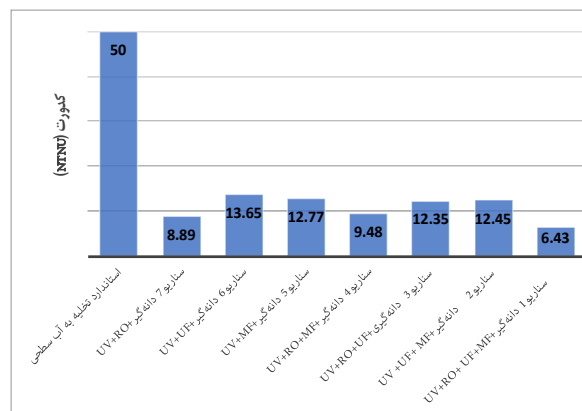


شکل ۲- مقایسه COD (mg/lit) خروجی برای فاضلاب خاکستری در آرایش های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار

۲- تصفیه باران

به منظور بررسی احتمالات استفاده مجدد از آب باران، آب باران از بام یک منزل ویلایی واقع در شهر ساری، مازندران، ایران جمع آوری شد و به سیستم معرفی شد و آنالیزهای pH، COD، TDS، کدورت، اشریشیا کلیفرم و توتال کلیفرم انجام شد. جدول‌های (۶ و ۷) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. براساس داده‌های به دست آمده در جدول (۶ و ۷) مشاهده شد در تمام سناریوهای فشارهای پایین‌تر عملکرد مناسب‌تری در کاهش پارامترهای کیفی فاضلاب خاکستری دارند. این امر را می‌توان به افزایش سطح غشا به دلیل کاهش نیرو محرکه نسبت داد. این نتیجه را نتایج پژوهش Kimura و Oki (۲۰۱۷) تایید می‌کند. در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نمودار مقایسه‌ای پارامترهای کیفی برای آب باران تصفیه شده برای آرایش‌های مختلف غشایی در فشار ۹/۵ بار آورده شده است.

همانطور که در جدول‌های (۶) و (۷) قابل مشاهده است با افزایش فشار راندمان حذف آلاینده‌ها بهتر می‌شود. این پدیده را می‌توان به به دام افتادن بیشتر آلاینده‌ها درون منافذ غشا در فشارهای بالا نسبت داد. این نتیجه با نتایج پژوهش لشگری و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص استفاده از غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون مطابقت دارد. باتوجه به نتایج، سناریوی اول حاوی دانه‌گیر، UF، RO، MF و UV بهترین سناریو در حذف مواد آلی، TDS و کدورت بود. بنابراین، سناریوی یک برای آرایش غشایی با فشار ۹/۵ بار به عنوان بهترین ترتیب فرآیندهای تصفیه برای تصفیه آب باران تعیین شد. نتایج برای حذف مواد آلی (۸۲٪)، TDS (۹۴٪) و کدورت (۹۱٪) قابل توجه بود. باتوجه به نتایج، فرآیند حاوی دانه‌گیر، RO، UF، MF و UV روشی امیدوار کننده برای تصفیه آب باران است. کیفیت پساب به خوبی دستورالعمل‌ها را برای استفاده مجدد و بازیافت آب باران (محیط زیست، نامحدود، محدود) از جمله $TSS \geq 30$ میلی‌گرم در لیتر، pH در ۶-۹ و $BOD_5 \geq 10-30$ میلی‌گرم در لیتر را برآورده می‌کند (WHO، ۲۰۰۶). همچنین از آب تصفیه شده می‌توان برای کاربردهای مختلف از قبیل کارواش، فلاش تانک و شستشو استفاده کرد (Faragò و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۴- مقایسه کدورت (NTU) خروجی برای فاضلاب خاکستری در آرایش‌های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار

همانطور که در نتایج جدول‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است با افزایش فشار راندمان حذف آلاینده‌ها بهبود می‌یابد. این پدیده را می‌توان به به دام افتادن بیشتر آلاینده‌ها درون منافذ غشا در فشارهای بالا نسبت داد. این نتیجه با نتایج پژوهش لشگری و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص استفاده از غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون مطابقت دارد. باتوجه به پیشینه پژوهش، اگر چه ممکن است در خصوص حذف یکی از پارامترهای کیفی مانند COD یکی از واحدهای غشایی به تنهایی نیز پاسخگو باشد، اما باید توجه کرد امروزه که امکان حضور آلاینده‌های نوظهور مختلف در فاضلاب خاکستری بیش از گذشته وجود دارد، استفاده همزمان از غشاءهای مختلف جهت جهت تصفیه این پساب بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. این فرآیند رد پای محیط‌زیستی کمی دارد و کیفیت پساب تصفیه شده آن می‌تواند برای استفاده مجدد مناسب باشد. علاوه بر این، فرآیند عملکرد بهتری نسبت به یک فرآیند بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب خاکستری نشان داد. به عنوان مثال، در پژوهش Teh و همکاران (۲۰۱۵) یک واحد هضم هوازی همراه با یک واحد ضد عفونی H_2O_2 برای تصفیه فاضلاب خاکستری برای استفاده غیر شرب بررسی شده که منجر به حذف ۶۸٪ COD و ۸۸٪ TSS شد.

جدول ۶- نتایج حذف آلاینده برای تصفیه آب باران تحت سناریوهای ۱ تا ۴

پارامترها	استاندارد تخلیه به آب سطحی	سناریو ۱ فشار (bar)	سناریو ۲ فشار (bar)	سناریو ۳ فشار (bar)	سناریو ۴ فشار (bar)
کدورت (NTU)	۵۰	۰/۵۳	۰/۶۱	۳/۴۵	۳/۶۶
pH	۸/۶-۵/۵	۷/۰۳	۷/۰۵	۷/۱۶	۷/۰۳
TDS (mg/l)	۲	۱/۵	۲/۸	۱۳/۹	۱۳/۵
COD	۶۰	۴/۶	۴/۹	۷/۸	۱۱/۸
E. Coli (mg/l)	۴۰۰	۰	۰±۱	۰±۱	۰±۱
توتال کلیفرم	۱۰۰۰	۰	۰±۱	۰±۱	۰±۱

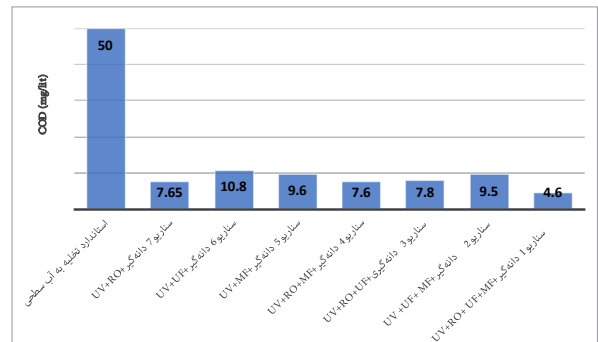
جدول ۷- نتایج حذف آلاینده برای تصفیه آب باران تحت سناریوهای ۵ تا ۷

پارامترها	استاندارد تخلیه به آب سطحی	سناریو ۵			سناریو ۶			سناریو ۷		
		فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)	فشار (bar)
کدورت (NTU)	۵۰	۳/۸۸	۳/۷۸	۳/۶۵	۳/۷۰	۳/۷۲	۳/۷۶	۳/۱۵	۳/۲۶	۳/۳۰
pH	۸/۶-۵/۵	۷/۰۹	۷/۰۷	۷/۱۲	۷/۱۵	۷/۲	۷/۰۲	۷/۱۸	۶/۹۹	۷/۰۵
TDS (mg/l)	۲	۱۴/۲	۱۳/۸۶	۱۳/۲۱	۱۱/۵	۱۱/۸۹	۱۲/۴۵	۱۰/۵۸	۱۱	۱۰/۹۸
COD	۶۰	۱۳/۸۵	۱۲/۲	۹/۶	۱۰/۸	۱۱/۲۶	۱۲/۶	۷/۶۵	۹/۴	۹/۷۸
E. Coli (mg/l)	۴۰۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰	۰
توتال کلیفرم	۱۰۰۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰	۰

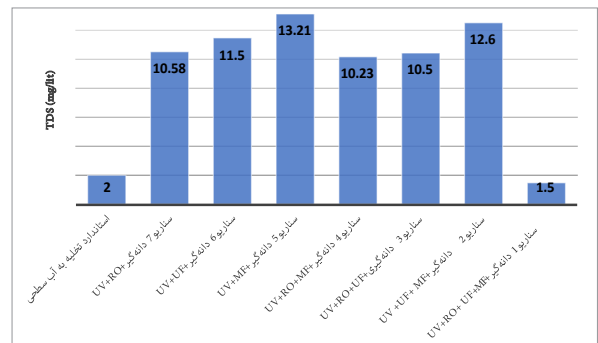
با توجه به پژوهش‌های اخیر امکان‌سنجی فنی فرآیند UF قبل از روش‌های ضد عفونی (UV و H_2O_2) برای تصفیه آب باران در مقیاس آزمایشی برای منابع آب غیر آشامیدنی توسط محققان تأیید شد (Faragò و همکاران، ۲۰۱۹). آنها تصدیق کردند که غشای UF با ایجاد ارزش افزوده برای محیط‌زیست و به‌عنوان یک فناوری غشایی سازگار با محیط‌زیست شناخته می‌شود. Naddeo و همکاران (۲۰۱۳) همچنین از یک واحد FAD در مقیاس کامل (فیلتراسیون، جذب، و ضد عفونی) برای تصفیه آب باران برای استفاده آشامیدنی استفاده کردند. آنها گزارش دادند کارایی فرآیند FAD در حذف COD، TOC و کدورت به ترتیب ۴۹/۹، ۴۲/۸، ۹۸/۳ درصد است.

نتیجه‌گیری

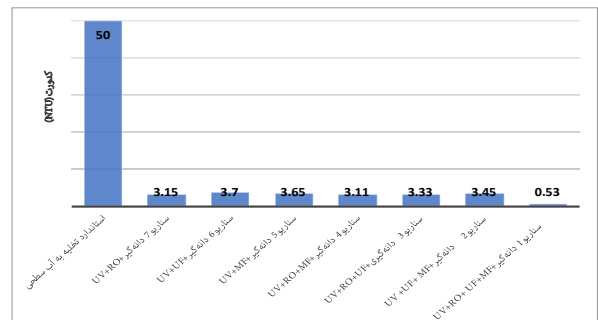
در اکثر کشورهای در حال توسعه اقتصادی، تامین آب همچنان موضوعی نگران‌کننده است که باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که کمبود آب در حال تبدیل شدن به یک مشکل جدی است، استفاده مجدد و بازیافت فاضلاب خاکستری و آب باران به‌عنوان یک راه حل پایدار برای کاهش تقاضای کلی آب به‌نظر می‌رسد. فاضلاب خاکستری و باران را می‌توان در عرض چند ساعت با استفاده از ترکیب بهینه فناوری غشایی همراه با واحد ضد عفونی برای امکان استفاده مجدد تصفیه نمود. نتایج مطالعه حاضر حاکی از آن بود که هم برای تصفیه فاضلاب خاکستری و هم برای تصفیه آب باران، آرایشی متشکل از دانه‌گیر، UF، RO، MF و UV و با فشار ۹/۵ بار، بهترین عملکرد را در کاهش COD، TDS و همچنین کدورت دارد. براساس نتایج آزمایشگاهی، سناریو مذکور قادر به حذف ۹۵٪ COD، ۹۸٪ TDS و ۹۶٪ کدورت برای فاضلاب خاکستری و همچنین ۸۲٪ COD، ۹۴٪ TDS و ۹۱٪ کدورت برای آب باران می‌باشد. بنابراین نتایج مطالعه حاضر تأیید کرد دانه‌گیر، MF و UF قبل از سیستم غشایی RO یک تکنیک موثر برای تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران محسوب می‌شود. کیفیت آب



شکل ۵- مقایسه COD (mg/lit) خروجی برای آب باران تصفیه شده در آرایش‌های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار



شکل ۶- مقایسه TDS (mg/lit) خروجی برای آب باران تصفیه شده در آرایش‌های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار



شکل ۷- مقایسه کدورت (NTU) خروجی برای آب باران تصفیه شده در آرایش‌های مختلف غشایی برای فشار ۹/۵ بار

assessment of organic micropollutants in greywater for potable reuse. *Water research*, 72, 186-198. doi: [10.1016/j.watres.2014.10.048](https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.048)

Faragò, M., Brudler, S., Godsken, B., & Rygaard, M. (2019). An eco-efficiency evaluation of community-scale rainwater and stormwater harvesting in Aarhus, Denmark. *Journal of Cleaner Production*, 219, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.265>

Ghaididak, D. M., & Yadav, K. D. (2013). Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2795-2809. doi: [10.1007/s11356-013-1533-0](https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0)

Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K. (2007). Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, 202(1-3), 326-332. doi: [10.1016/j.desal.2005.12.071](https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.071)

Kimura, K., & Oki, Y. (2017). Efficient control of membrane fouling in MF by removal of biopolymers: Comparison of various pretreatments. *Water research*, 115, 172-179. doi: [10.1016/j.watres.2017.02.033](https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.033)

Li, F., Gulyas, H., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Treatment of household grey water with a UF membrane filtration system. *Desalination and Water Treatment*, 5(1-3), 275-282. doi: [10.5004/dwt.2009.550](https://doi.org/10.5004/dwt.2009.550)

Luo, J., Ding, L., Qi, B., Jaffrin, M. Y., & Wan, Y. (2011). A two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater. *Biore-source technology*, 102(16), 7437-7442. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.012>

Mahmoudnia, A. (2023). The role of PFAS in unsettling ocean carbon sequestration. *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 310. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10912-8>

Mahmoudnia, A., Mehrdadi, N., Baghdadi, M., & Mousavi, G. (2022). Change in global PFAS cycling as a response of permafrost degradation to climate change. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100039>

Naddeo, V., Scannapieco, D., & Belgiorno, V. (2013). Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. *Journal of Hydrology*, 498, 287-291. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.012>

تصفیه شده نشان داد می‌توان از آن برای برخی کاربردهای مختلف مانند تخلیه به آب‌های سطحی، آبیاری مزرعه/پارک‌ها، باغبانی، شیرهای آتش‌نشانی یا شستشوی توالت‌ها پس از ضدعفونی مجدد استفاده کرد. اگرچه، درباره این واقعیت که سیستم‌های اسمز معکوس قادر به حذف ریزآلاینده‌های موجود در فاضلاب هستند، پژوهش‌های زیادی انجام شده است، اما با این وجود بررسی کارایی فناوری غشائی جهت حذف آلاینده‌های نوظهور از جمله PFAS، نانوپلاستیک‌ها می‌تواند موضوعات جذابی برای پژوهش‌های آینده باشد. علاوه بر این، عملکرد اسمز معکوس همراه با سایر تکنیک‌های تصفیه از جمله انعقاد الکتریکی و الکترواکسیداسیون در تصفیه فاضلاب خاکستری و آب باران، حذف ریزآلاینده‌ها با این ترکیبات و بهینه‌سازی این روش‌ها را می‌توان در تحقیقات آینده بررسی کرد.

منابع

لشگری، سمیه، لشگری، سهیلا، کشاورز، فاطمه، و عیسوندی، زهرا. (۱۴۰۱). بررسی و مقایسه عملکرد غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در تصفیه پساب صنعتی عسلویه. *مجله آب و فاضلاب*, ۳۳(۱)، ۱-۱۱. doi: [10.22093/wwj.2021.266314.3101](https://doi.org/10.22093/wwj.2021.266314.3101)

de Oliveiraa, T. M., Benattib, C. T., & Tavaresc, C. R. G. (2020). Pilot system of microfiltration and reverse osmosis membranes for greywater reuse. *Desalination and Water Treatment*, 201, 13-19. doi: [10.5004/dwt.2020.26020](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26020)

Ding, A., Wang, J., Lin, D., Tang, X., Cheng, X., Wang, H., ... Liang, H. (2017). A low pressure gravity-driven membrane filtration (GDM) system for rainwater recycling: Flux stabilization and removal performance. *Chemosphere*, 172, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.111>

Domènech, L., & Saurí, D. (2010). Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.07.001>

Du, X., Wang, Z., Liu, Y., Ma, R., Lu, S., Lu, X., Liu, L., Liang, H. (2022). Gravity-driven membrane bioreactor coupled with electrochemical oxidation disinfection (GDMBR-EO) to treat roofing rainwater. *Chemical Engineering Journal*, 427, 131714. doi: [10.1016/j.jclepro.2021.128055](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128055)

Etchepare, R., & van der Hoek, J. P. (2015). Health risk

- Onkal Engin, G., Sinmaz Ucar, B., & Senturk, E. (2011). Reuse feasibility of pre-treated grey water and domestic wastewater with a compact household reverse osmosis system. *Desalination and Water Treatment*, 29(1-3), 103-109. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2155>
- Reang, S., & Nath, H. (2021). Grey water treatment with spiral wound UF and RO membranes. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6253-6259. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.781>
- Teh, X. Y., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Chong, M. N. (2015). Decentralized light greywater treatment using aerobic digestion and hydrogen peroxide disinfection for non-potable reuse. *Journal of Cleaner Production*, 99, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.015>
- World Health Organization (WHO). (2006). WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater (Vol. 1): World Health Organization. Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/item/9241546824>
- Wanjiru, E. M., Sichilalu, S. M., & Xia, X. (2017). Optimal control of heat pump water heater-instantaneous shower using integrated renewable-grid energy systems. *Applied Energy*, 201, 332-342. doi: [10.1016/j.apenergy.2016.10.041](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.041)