مدیریت انرژی پایدار از لجن شوری‌زدایی آب دریا با رویکرد اقتصاد چرخشی

آسیه السادات کاظمی[۱]، مهسا شاهی[۲]، سید موسی حسینی[*،۳]

چکیده

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت جهان، تقاضا برای آب شیرین در حال افزایش است و فرآیند شوری‌زدایی از آب دریا به‌عنوان یک منبع نامتعارف آب شیرین، مورد توجه جهانی قرار گرفته است. پسماند غلیظ حاصل از فرآیند شوری‌زدایی از آب دریا که لجن نامیده می‌شود، به دلیل ملاحظات محیط‌زیستی ناشی از دفع آن در خاک و رعایت استانداردهای قانونی برای بازگردانی آن به دریا، یافتن روشی مناسب برای مدیریت پایدار لجن ضروری است. در این تحقیق به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف بازیافت لجن حاصل از تصفیه آب دریا پرداخته شده است. روش‌های بازیافت بر اساس مفهوم اقتصاد چرخشی شامل استفاده مجدد از لجن به‌عنوان منعقدکننده‌ها، در صنعت کشاورزی، در ساخت‌وساز و در قطعات الکترونیکی جهت ذخیره انرژی است. بررسی‌ها نشان داده است که براساس رشد فزاینده طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های آب‌شیرین‌کن دریا، تبدیل لجن تولیدشده در سیستم‌های شوری‌زدایی از آب دریا به محصولات دارای ارزش‌افزوده، می‌تواند یک روش جایگزین بسیار مناسب و سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت پایدار آن باشد.

واژگان کلیدی: لجن شوری‌زدایی از آب دریا، اقتصاد چرخشی، منعقدکننده، کشاورزی، ساخت‌وساز، ذخیره انرژی

---

[*] عهده‌دار مکاتبات: دانشیار، تلفن: ۶۱۱۱۲۹۳۸ (۹۸۲۱)، پست الکترونیکی: smhosseini@ut.ac.ir

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[۳] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مقدمه

جمعیت جهان با نرخ حدود ۸۰ میلیون نفر در سال در حال افزایش است و تغییرات در سبک زندگی و عادات غذایی در سال‌های اخیر مستلزم مصرف سرانه آب بیشتری است [۱]. امروزه رشد جمعیت، کاهش منابع و تغییرات آب‌وهوایی بر کمبود آب در سطح دنیا اثر دارند [۲و ۳]. بنابراین شوری‌زدایی یک فناوری قدرتمند در جلوگیری از بحران کمبود آب شیرین و کاهش تبعات منفی آن است [۳و ۴]. در حین تولید آب آشامیدنی از فرآیند شوری‌زدایی از آب دریا، پسماندهای مختلفی تولید می‌شوند که در اکثر موارد به‌صورت سوسپانسیون‌های غلیظ به نام «لجن[1]» جمع می‌شوند. ویژگی مشترک همه لجن‌ها این است که پسماندهایی با «ارزش‌افزوده پایین[2]» را تشکیل می‌دهند [۵]. تولید لجن از فرآیند شوری‌زدایی از آب دریا (WTS)[3] معمولاً ۱ تا ۳٪ حجمی از آب خام مصرفی از طریق فرآیند تصفیه می‌باشد. در سطح جهان، سالانه میلیون‌ها تن پسماند WTS تولید می‌شود و با افزایش تقاضای آب، این حجم تولید لجن در حال افزایش است [۶]. برای محافظت از سلامت عمومی، آب خام قبل از توزیع آب آشامیدنی از طریق فرآیند انعقاد، لخته‌سازی، رسوب‌گذاری، فیلتراسیون و گندزدایی با استاندارد بالایی در تصفیه‌خانه‌های آب تصفیه می‌شود [۷]. انعقاد و لخته‌سازی روش‌های پیش‌تصفیه ضروری است که توسط صنایع آب در سراسر جهان برای تصفیه آب از جمله آب دریا استفاده می‌شوند و به‌طور معمول نمک‌های آلومینیوم و آهن با اثربخشی و هزینه کم، به‌عنوان متداول‌ترین عوامل منعقدکننده اولیه کاربرد دارند [۸]. مسئله کلیدی مرتبط با WTS، دفع مقرون‌به‌صرفه و کارآمد به دلیل حجم زیاد لجن و معایب محیط‌زیستی آن است؛ همچنین لازم به ذکر است در اکثر کشورهای توسعه‌یافته دفع WTS در محیط‌زیست به‌دلیل عواملی مانند هزینه‌های بالای دفع، هزینه‌های حمل و نقل بالا و محدودیت‌های قانونی ممنوع شده است، بنابراین یافتن روشی مناسب برای مدیریت WTS ضروری است [۹]. روش‌های دپو کردن[4] لجن، دفع در فاضلاب و دفن آن به‌طور گسترده پذیرفته شده است؛ اما هزینه‌های مالی و محیط‌زیستی این شیوه‌ها در حال افزایش است و صنعت مجبور است تا استراتژی‌های مدیریت بومی جایگزین مانند بازیافت، استفاده مجدد و بازیابی لجن را مورد توجه قرار دهد [۱۰]. بنابراین، نیاز واضحی به بررسی و ارزیابی گزینه‌های مدیریتی مناسب تجاری برای استفاده مجدد از لجن وجود دارد. هدف از این تحقیق، بررسی رویکردهای مختلف در سطح بین‌المللی غیر از دفن، جهت کاربری لجن است. بنابراین در این تحقیق به معرفی لجن، بازیافت منعقدکننده‌ها، کاربرد در کشاورزی و ساخت‌وساز، قطعات ذخیره انرژی و در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

بازیافت لجن تصفیه آب دریا بر اساس مفهوم اقتصاد چرخشی[5]

بر اساس مقررات، WTS به‌عنوان «پسماند غیرخطرناک[6]» یا «پسماند صنعتی معمولی[7]» طبقه‌بندی می‌شود، لذا محدودیت‌های سنگین «پسماندهای خطرناک[8]» برای آن‌ها اعمال نمی‌گردد. در مقایسه با لجن تصفیه فاضلاب، خطرات محیط‌زیستی مرتبط با WTS به‌دلیل تمیزی نسبی منبع آب از نظر فلزات سنگین و مواد آلی و همچنین سطوح پاتوژن، کم‌تر است. ویژگی‌های WTS بر اساس ویژگی آب منبع و روش‌های پیش‌تصفیه متفاوت است. با این حال، از زمان خروج از کارخانه آب آشامیدنی تا پایان بازیابی آن‌ها، طبق مقررات نیاز به ردیابی است [۱۱]. ذخیره‌سازی و سپس تخلیه WTS به محل‌های دفن پسماند[9] رایج‌ترین روش است که به‌طور بالقوه منجر به مشکلات محیط‌زیستی می‌شود. علاوه‌بر این، به‌دلیل کمبود مکان‌های دفن پسماند در کنار اعمال مقررات محیط‌زیستی سخت‌گیرانه توسط جوامع، دفن WTS پرهزینه‌تر می‌شود. به این ترتیب، نیاز به توسعه شیوه‌های مدیریت پایدار لجن، از جمله بازیابی[10]، استفاده مجدد[11] و بازیافت[12] لجن وجود دارد [۱۲]. برای تسلط بر مدیریت لجن از نظر فنی و اقتصادی، جوامع باید به‌سمت راه‌حل‌های انعطاف‌پذیرتر و اغلب چندمنظوره حرکت

---

[1] Sludge

[2] Low value-added

[3] Water treatment sludge

[4] Stockpiling

[5] Circular economy (CE)

[6] Non-hazardous waste

[7] Banal industrial waste (BIW)

[8] Hazardous waste

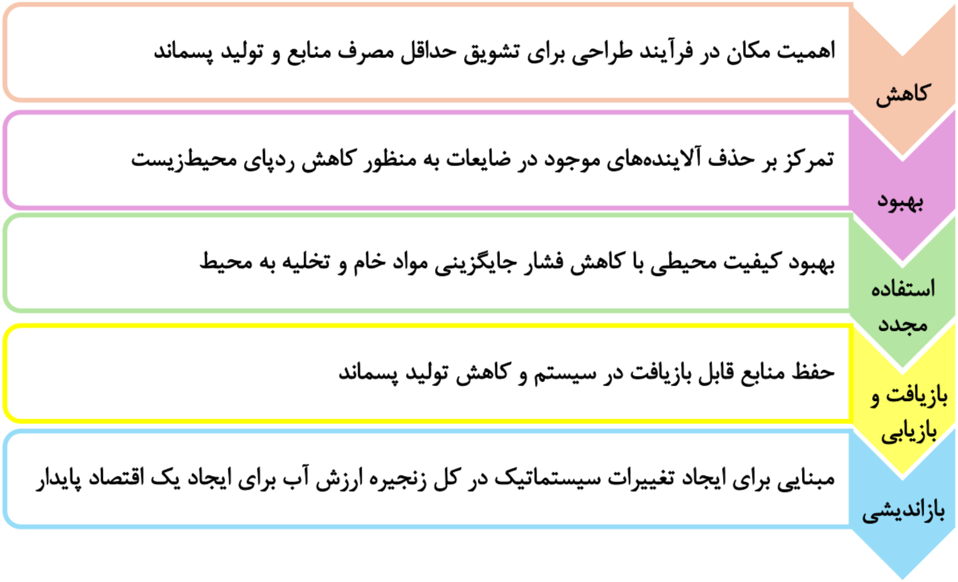
[9] Landfill sites

[10] Recovering

[11] Reuse

[12] Recycling

کنند [۱۳]. اقتصاد چرخشی (CE) در مدیریت محیط‌زیست به‌ویژه در بخش‌های آب و فاضلاب محبوبیت بیشتری پیدا کرده است [۱۴]. از جنبه‌های اساسی مکانیسم CE، حفظ منابع در بیشترین زمان ممکن است تا محصول به‌دست‌آمده از آن به‌طور مداوم برای ایجاد ارزش افزوده، مجددا استفاده شود. شرکت‌های آب، اکنون رویکردهای CE را در مدیریت منابع خود با استراتژی‌های پایدار درنظر می‌گیرند [۱۵]. در CE، مدیریت پسماند نقش مهمی ایفا می‌کند و راهبرد «تولید پسماند صفر» یکی از اهداف اساسی است. این راهبرد شامل اتلاف صفر منابع (انرژی، مواد، نیروی انسانی)، انتشار یا تخلیه صفر پسماند (در آب، هوا، خاک)، اتلاف صفر فعالیت‌ها (تولید، مدیریت)، اتلاف صفر عمر محصول (حمل و نقل، استفاده، پایان عمر) و استفاده صفر از مواد سمی (فرآیندها و محصولات) است [۱۶]. در این راستا، باید در سراسر زنجیره تصفیه آب، کاهش تولید، بازیافت و حذف دفن WTS، طراحی شود. یک چارچوب مدل CE در بخش آب و فاضلاب شامل موارد کاهش، بهبود، استفاده مجدد، بازیافت، بازیابی و بازاندیشی است که در شکل ۱ خلاصه شده است [۱۷].



اهمیت مکان در فرآیند طراحی برای تشویق حداقل مصرف منابع و تولید پسماند

تمرکز بر حذف آلاینده‌های موجود در ضایعات به منظور کاهش ردپای محیط‌زیست

بهبود کیفیت محیطی با کاهش فشار جایگزینی مواد خام و تخلیه به محیط

حفظ منابع قابل بازیافت در سیستم و کاهش تولید پسماند

مبنایی برای ایجاد تغییرات سیستماتیک در کل زنجیره ارزش آب برای ایجاد یک اقتصاد پایدار

شکل ۱: مدل اقتصاد چرخشی CE در بخش آب و فاضلاب [۱۸].

به‌منظور اجرای این رویکردها، تغییرات کل‌نگر در سیستم، نه‌تنها از نظر فنی و مالی، بلکه از نظر سازمانی نیز مورد نیاز است تا یک فرهنگ پایدار و بازیافت‌محور در سازمان‌ها ایجاد شود [۱۷]. مقدار و محتوی تشکیل‌دهنده WTS، به کیفیت آب خام، انواع مواد منعقدکننده و مقدار تزریقی آن‌ها بستگی دارد. درحالی‌که با تغییر فصل کیفیت آب خام به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند، تولید WTS را می‌توان با انتخاب منعقدکننده‌ها و بهینه‌سازی مقدار تزریقی به خواص آب خام و نتایج آزمایش‌های مختلف کاهش داد [۱۹]. همچنین، WTS می‌تواند در بسیاری از کاربردها از تصفیه فاضلاب، رواناب، بازیافت مجدد به فرآیند تصفیه آب یا بازیافت برای منعقدکننده‌ها، کاربردهای زمین کشاورزی، ساخت مصالح ساختمانی و یا ذخیره انرژی مورد استفاده مجدد قرار گیرد [۲۰]. گرایش به مفهوم مدل «استخراج منابع – تولید –مصرف و دورریختن[1]» در مدیریت WTS می‌تواند چندین مزیت محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی را برای شرکت‌های آب به ارمغان آورد. مزایا و موانع این مدیریت در جدول ۱ خلاصه شده است.

---

[1] Take-make-dispose model

جدول ۱: تجزیه‌وتحلیل مزایا و موانع شیوه‌های مدیریت لجن تصفیه آب دریا در راستای مفهوم اقتصاد چرخشی

مزایا	پیامدهای آینده	مرجع
محیط‌زیستی	▪ بهبود سلامت محیط‌زیست و سلامت اکوسیستم‌های آبی ▪ کاهش ردپای محیط‌زیستی فعالیت‌های کشاورزی ▪ کاهش نیاز صنایع به مواد جدید	[۲۰]
اقتصادی	▪ کاهش هزینه مواد اولیه ▪ کاهش هزینه‌های ناشی از قوانین محیط‌زیستی ▪ کاهش مالیات	[۲۱,۲۰]
اجتماعی	▪ ایجاد حس اجتماعی و همکاری ▪ مشارکت از طریق اقتصاد اشتراکی ▪ فرهنگ نوآوری ▪ شناسایی فرصت‌های تجاری جدید ▪ پذیرش فناوری	[۲۰]
موانع		
فنی(تکنیکی)	▪ کاهش سازگارپذیری فناوری	[۲۲]
پردازش مورد نیاز	▪ تغییرات در سیستم برای انطباق با مواد جدید ▪ افزایش هزینه‌های عملیاتی	[۲۴,۲۳]
مالی	▪ افزایش سرمایه‌گذاری ▪ افزایش هزینه‌های سرمایه	[۲۲]
نظارتی	▪ کاهش اطمینان در استفاده از لجن ▪ محدود شدن استفاده بالقوه از لجن ▪ ایجاد رویکردهای شکاکانه مقامات آب به کاربرد لجن	[۲۲]

۱. کاربرد WTS در بازتولید منعقدکننده‌ها

تصفیه آب دریا شامل تولید مقادیر زیادی WTS حاوی انواع مواد آلی و معدنی است [۲۵]. بقایای واحد انعقاد و لخته‌سازی شامل ناخالصی‌های معلق و کلوئیدی و همچنین منعقدکننده‌های مصرفی است که متعاقباً از فاز مایع در واحدهای ته‌نشینی/فیلتراسیون حذف می‌شوند. حجم زیادی از WTS که در طی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی ایجاد می‌شود شامل ذرات خاک، مواد آلی و اکسیدهای فلزی آلومینیوم یا آهن است [۲۶]. انعقاد و لخته‌سازی[1] (CFT) به‌عنوان یک فرآیند کلیدی در تصفیه‌خانه‌های آب دریا، قادر به کاهش یا حذف مواد کلوئیدی، آلاینده‌های نوظهور مانند فلزات سنگین، آنتی‌بیوتیک‌ها، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز از آب خام است [۲۷]. در دهه‌های گذشته، فرآیند CFT به دلیل خواص برجسته‌ای مانند مصرف پایین انرژی، سادگی در طراحی، بهره‌برداری آسان، راندمان بالا، غیرسمی و مقرون‌به‌صرفه بودن به‌طور گسترده برای حذف آلاینده‌ها در تصفیه آب، استفاده شده است [۲۸]. منعقدکننده‌های اصلی به چهار گروه شیمیایی، غیرشیمیایی، مواد مصنوعی یا بیولوژیکی تقسیم می‌شوند [۲۷]. در میان آن‌ها، نمک‌های آهن و ترکیبات آلومینیوم (مانند سولفات آلومینیوم، سولفات آهن و کلرید آهن) به‌عنوان منعقدکننده‌های معدنی [۲۹] شناخته شده است و در اکثر سیستم‌های تصفیه آب در سراسر جهان با ذرات معلق بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۰]. درحالی‌که منعقدکننده اصلی مورد استفاده در فرآیند نرم‌کردن آب با سطوح سختی بالا، آهک است [۳۱]. این منعقدکننده‌ها در حذف طیف گسترده‌ای از ناخالصی‌های آب از جمله ذرات کلوئیدی و مواد آلی محلول مؤثرند. عوامل متعددی از جمله کیفیت بهتر آب تصفیه‌شده، در دسترس بودن محلی، کاهش هزینه و حجم WTS منجر به استفاده از یک نوع خاص از منعقدکننده در تصفیه آب می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از منعقدکننده‌های بیولوژیکی در مقایسه با شیمیایی، منجر به کاهش ۳۰٪ در تولید WTS می‌گردند [۳۲]. از آنجایی‌که تقاضا برای استفاده از منعقدکننده‌ها در سراسر جهان درحال افزایش است، بنابراین، تکنیک‌های مقرون‌به‌صرفه بازیابی منعقدکننده‌ها، می‌تواند راه‌حلی حیاتی برای به‌حداقل‌رساندن نیاز شیمیایی منعقدکننده‌ها و کاهش حجم پسماندهای جامد درنظر گرفته شود. مطالعات نشان داده‌اند که WTS با تمرکز بر بازیافت منعقدکننده‌ها، یک گزینه مؤثر برای مدیریت WTS به‌عنوان یک روش اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست است [۳۳]. در جدول ۲ مزایا و معایب روش‌های جداسازی منعقدکننده‌ها خلاصه شده است.

---

[1] Coagulation-flocculation technique (CFT)

جدول ۲: مقایسه مزایا و معایب فرآیندهای مختلف بازیافت منعقدکننده از WTS [۳۳].

روش	مزایا	معایب
هضم اسیدی	▪ نرخ بازیابی بالای آلومینیوم ▪ کاهش حجم/مواد جامد باقیمانده ▪ افزایش راندمان زهکشی ▪ افزایش سرعت ته‌نشینی لجن	▪ انحلال بیشتر آلومینیوم و در نتیجه افزایش هزینه و خطر ▪ ترکیبات آلی موجود در لجن باقیمانده ▪ رسوب یون‌های معدنی (مانند کلسیم، سیلیس) ▪ فرآیند غیرانتخابی
هضم اسیدی اولتراسونیک	▪ مصرف اسید کمتر ▪ راندمان هضم بیشتر از اسید (به‌تنهایی)	▪ گسستگی شدیدتر لخته‌های لجن با افزایش زمان اولتراسونیک ▪ مصرف انرژی بالا ▪ هزینه بالا
قلیایی‌سازی	▪ نرخ بازیابی بالای آلومینیوم ▪ کاهش حجم/مواد جامد باقیمانده	▪ حل مواد آلی موجود در لجن آلوم در محلول قلیایی قوی
هضم اسیدی دونان[1]	▪ حذف انتخابی ▪ گرفتگی غشاء کم ▪ مصرف کم انرژی	▪ زمان تماس طولانی با سطح غشا به‌دلیل عدم گرادیان فشار
غشای تبادل یونی	▪ بدون خطر ▪ ساده ▪ روند بازیابی ایمن ▪ حداقل تولید رسوب به‌دلیل عدم فشار غشایی ▪ درصد بالای حذف آلاینده‌های آلی	▪ عدم بازیابی غلظت بالای یون‌های آلومینیوم ▪ تولید جریان زباله اسیدی در پایان فرآیند بازیابی

۲. کاربرد WTS در بخش کشاورزی

روش‌های استفاده از WTS در کشاورزی، شامل کاربرد در مراتع و زمین‌های زراعی، جنگل‌ها، پارک‌های عمومی، نهالستان‌های گیاهی، کنار جاده‌ها، زمین‌های گلف، چمن‌ها و باغچه‌های خانگی است. استفاده مجدد اکولوژیکی از WTS شامل احیاء دریاچه‌ها (پوشش رسوبات، با تثبیت فسفر) است. کاربردهای WTS در زمین‌های کشاورزی به‌مقدار (۱۰۰–۲۰۰ تن در هکتار در سال) به‌منظور به‌حرکت درآوردن عملکرد میکروارگانیسم‌های خاک و تثبیت اثرات فلزات توسط خاک است. کاربرد موفقیت‌آمیز WTS در زمین برای استفاده مجدد در کشاورزی، مستلزم ارزیابی اثرات این باقیمانده‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، رشد گیاه و کیفیت آب‌های زیرزمینی است [۳۴]. شایان ذکر است که آلومینیوم و هیدروکسیدهای آهن موجود در WTS، به تثبیت فسفر موجود در خاک کمک می‌کنند. تثبیت فسفر توسط لجن در خاک می‌تواند هم اثر منفی (کاهش فسفر در اختیار گیاه) داشته باشد و اگر خاک تحت بار فسفر بیش‌از حدی قرار گیرد، اثر مثبت داشته باشد [۳۵].

کاربرد زمینی[2] به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین رویکردها و بهترین گزینه محیط‌زیستی برای مدیریت WTS درنظر گرفته شده است. این کاربردها به‌عنوان کود طبیعی[3] کم‌هزینه، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. WTS از عناصر درشت‌مغذی[4] و ریزمغذی[5] تشکیل شده است که می‌تواند خواص فیزیکی خاک و محتوای آلی خاک را افزایش دهد. هنگام افزودن WTS به خاک، خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف خاک مانند ظرفیت نگهداری آب[6] (WHC)، ظرفیت تبادل کاتیونی[7] (CEC)، محتوای مواد آلی، اسیدیته، هدایت الکتریکی (EC) و تهویه خاک بهبود می‌یابد [۳۶]. مزایا و معایب بالقوه لجن تصفیه آب آشامیدنی برای استفاده در زمین در شکل ۲ ارائه شده است.

---

[1] Donnan

[2] Land-based application

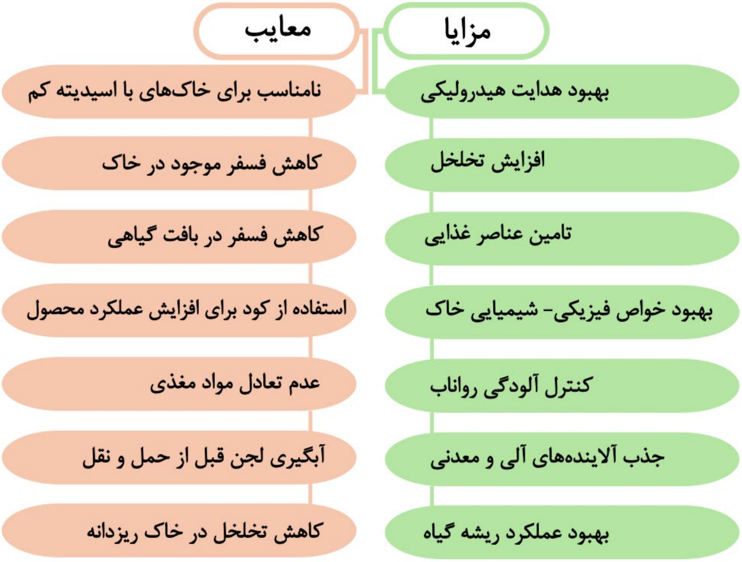
[3] Natural fertilizer

[4] Macronutrient

[5] Micronutrient

[6] Water holding capacity

[7] Cation exchange capacity


مزایا
بهبود هدایت هیدرولیکی
افزایش تخلخل
تامین عناصر غذایی
بهبود خواص فیزیکی- شیمیایی خاک
کنترل آلودگی رواناب
جذب آلاینده‌های آلی و معدنی
بهبود عملکرد ریشه گیاه
معایب
نامناسب برای خاک‌های با اسیدیته کم
کاهش فسفر موجود در خاک
کاهش فسفر در بافت گیاهی
استفاده از کود برای افزایش عملکرد محصول
عدم تعادل مواد مغذی
آبگیری لجن قبل از حمل و نقل
کاهش تخلخل در خاک ریزدانه

شکل ۲: مزایا و معایب بالقوه استفاده از لجن در زمین [۳۷].

۳. کاربرد WTS در ساخت‌وساز

استفاده از WTS برای اجرای برنامه مدیریت پسماند، به‌عنوان جایگزین جزئی خاک‌های طبیعی با کاربردهای ساختمانی از جمله سنگدانه‌های مصنوعی سبک[1]، مصالح سیمانی و آجر در سراسر جهان نتایج مثبتی نشان داده است. این فرآیند نسبتاً آسان و از نظر تجاری امکان‌پذیر است، زیرا WTS حاوی مهم‌ترین اجزاء مانند خاک رس، آلومینیوم، سیلیس و اکسیدهای آهن است. ترکیب WTS بسته به منبع آب و نوع فرآیند تصفیه مورداستفاده، می‌تواند متفاوت باشد، اما معمولاً حاوی مخلوطی از مواد آلی و معدنی است [۳۸]. کاربردهای مختلفی از WTS در مصالح ساختمانی شامل تولید مواد سرامیکی [۳۹] مانند آجر معمولی [۴۰]، آجرهای غیرسازه‌ای و زینتی [۴۱]، ژئوپلیمرهای بدون سیمان [۴۲]، کاشی‌های لعاب‌دار [۴۳]، روسازی، سنگدانه‌های سبک و مصنوعی، بتن [۴۴] و ماده پوششی در محل‌های دفن زباله [۶] بررسی شده است. WTS می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای ماسه در تولید کاشی استفاده شود. محققان دریافته‌اند که کاشی‌های ساخته‌شده با WTS، استحکام مکانیکی را بهبود می‌بخشند و جذب آب را در مقایسه با کاشی‌های معمولی کاهش می‌دهند [۴۳].

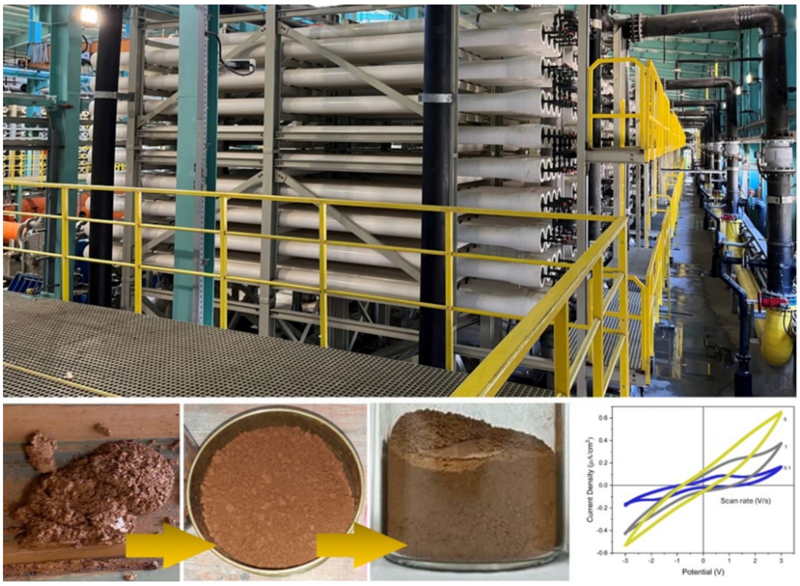
۴. کاربرد WTS در قطعات ذخیره انرژی

یک قطعه ذخیره انرژی با دو الکترود متشکل از مواد مختلف، از طریق اختلاف پتانسیل، جریان ایجاد می‌کند. قطعات ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها و ابرخازن‌ها، انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند که یک فرآیند برگشت‌پذیر است [۴۵]. ابرخازن‌ها ظرفیت بهتری نسبت به خازن‌های معمولی دارند و برخلاف باتری‌ها، واکنش شیمیایی در میان نیست؛ بنابراین، عمر چرخه شارژ–دشارژ ابرخازن‌ها تقریباً نامحدود است [۴۶]. چگالی توان بالاتر، تعداد زیاد سیکل‌های شارژ–دشارژ، و محدوده عملیات حرارتی گسترده از دیگر مزایای این قطعات است [۴۵]. طبق گزارش IDTechEx، بازار جهانی ابرخازن‌ها تا سال ۲۰۲۵ به ۸/۳ میلیارد دلار می‌رسد [۴۷]. خازن‌های الکتریکی دولایه، شبه‌خازن‌ها و ابرخازن‌های هیبریدی، انواع اصلی ابرخازن‌ها می‌باشند. شبه‌خازن‌ها ظرفیت ویژه و چگالی انرژی بالاتری نسبت به خازن‌های دولایه و ابرخازن‌های هیبریدی دارند و با مکانیسم ذخیره بار فارادی، کار می‌کنند [۴۶] درحالی‌که قابلیت سرعت و پایداری چرخه خازن‌های دولایه بهتر از شبه‌خازن‌ها و ابرخازن‌های هیبریدی است [۴۸]. در بین شبه‌خازن‌ها، شبه‌خازن‌های اکسید فلزی مورد توجه است؛ نمونه‌هایی از اکسیدهای فلزی که به‌عنوان مواد الکترود در این خازن‌ها استفاده می شوند عبارتند از MnO_2، NiO، SnO_2، In_2O_3، Co_2O_3، V_2O_5 و Fe_2O_3 [۴۹]؛ که WTS سرشار از این اکسیدهای فلزی است. با اینکه تلاش‌های زیادی برای کاهش استفاده از سوخت‌های

---

[1] Light weight artificial aggregates

فسیلی به‌دلیل آلودگی محیط‌زیست و گرم شدن زمین صورت گرفته است، هنوز هم عمده انرژی الکتریکی در جهان از سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گازهای طبیعی به‌دست می‌آید. درحالی‌که تلاش‌ها برای ذخیره‌سازی منابع انرژی جایگزین یا تجدیدپذیر سبز و پایدار همچنان در حال رشد است [۵۰]، قطعات ذخیره‌سازی انرژی مانند نسل جدید باتری‌ها و ابرخازن‌ها بسیاری از محققین را به خود جذب کرده است [۵۱]. اخیراً ترکیب زباله‌های متنوعی از جمله نخل، پلاستیک، زباله‌های الکترونیکی، چای، ضایعات کشاورزی و ضایعات حیوانی به کربن فعال تبدیل و ابرخازن‌ها تولید شده است؛ بنابراین راه‌های جدیدی برای انرژی پایدار و مدیریت پسماند ایجاد شده است [۵۲]. مطالعات نشان می‌دهد که بازیابی انرژی بیوگاز تجدیدپذیر با هضم بی‌هوازی[1]، یک استراتژی امیدوارکننده برای مقابله با تضاد بین خنثی‌سازی کربن و افزایش شدید لجن فاضلاب است [۵۳]. اسید هیومیک[2] در لجن، یک بازدارنده اصلی تولید بیوگاز است و نیاز به حذف یا پیش‌تصفیه دارد. با این حال، اسید هیومیک در لجن به‌عنوان ماده‌ای شبیه اکسید گرافن، یک پیش‌ساز ایده‌آل برای تهیه قطعات ذخیره انرژی با عملکرد بالا مانند ظرفیت ویژه بسیار بالا، سرعت عالی و پایداری چرخه شارژ–دشارژ است. مطالعه دیگر حاکی از تهیه نانوصفحات کربنی حاوی نیتروژن با سطح بسیار بالا از لجن فاضلاب برای ذخیره انرژی و تصفیه فاضلاب است [۵۴]. مدیریت لجن فاضلاب با تولید نیرو به‌عنوان انرژی زیستی با سیستم جذب کربن و با تمرکز بر فناوری‌های ترموشیمیایی، از تحقیقات دیگر در این حوزه است [۵۵]. WTS حاوی مقادیر قابل‌توجهی از عناصر فلزی است و دارای ظرفیت جذب بالا، تبادل یونی زیاد، مقاومت در برابر دمای بالا و پایداری است [۴۹]؛ که آن را کاندیدای مناسبی برای تهیه حسگرهای الکتروشیمیایی اصلاح‌شده می‌کند. در مطالعه‌ای، از این مواد در تشخیص Bisphenol-A با الکترود خمیر کربن اصلاح‌شده با WTS استفاده شده است [۵۶]. نتایج به‌دست‌آمده نقش WTS را در افزایش انتقال الکترون و فراهم کردن سطح فعال اضافی الکترودها تأیید کرده است. در مطالعه‌ای دیگر، از WTS جامد به‌طور مستقیم و بدون استفاده از فرایندهای پیچیده شیمیایی یا مکانیکی، در دمای اتاق، برای تولید شبه‌خازن‌ها استفاده شده است (شکل ۳) [۵۷]. نتایج این تحقیق می‌تواند بطور قابل‌توجهی به رویکرد اقتصاد چرخشی در استفاده مستمر از منابع و کاهش مسائل زیست‌محیطی کمک کند.



شکل ۳: نمایی از پلنت‌های شوری‌زدایی آب در خلیج فارس و مراحل خشک، پودر و قرص کردن نمونه‌های WTS به‌همراه نتایج سیکلوولتامتری از شبه‌خازن مبتنی بر آن‌ها [۵۷].

---

[1] Anaerobic digestion (AD)

[2] Humic acid (HA)

نتیجه‌گیری

تقاضای جهانی برای آب آشامیدنی به‌طور تصاعدی درحال افزایش است؛ زیرا آب پاک یک کالای ضروری برای زندگی، رشد انسان و حق جهانی بشر است. در نتیجه فرآیندهای مختلف تصفیه آب، حجم زیادی از لجن در سراسر جهان تولید می‌شود و نیاز به مدیریت آن به روشی اقتصادی، پایدار و سازگار با محیط‌زیست وجود دارد. اقتصاد چرخشی، با هدف حذف ضایعات و حفظ منابع در سیستم تا حد ممکن، به‌طور فزاینده‌ای در بخش آب مورد توجه قرار گرفته است. اجرای مفهوم اقتصاد چرخشی با لجن عمدتاً به‌دلیل تنوع در خواص شیمیایی و فیزیکی لجن در طول زمان کاملاً چالش‌برانگیز است. تبدیل لجن حجیم تولیدشده در سیستم‌های تصفیه آب دریا به محصولات با ارزش‌افزوده مفید، می‌تواند یک روش جایگزین بسیار مناسب و سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت لجن باشد.

در این میان بازیابی منعقدکننده‌ها به‌عنوان روشی سبز در دهه‌های اخیر توجه بیشتر دوستداران محیط‌زیست را به خود جلب کرده است. از سوی دیگر، نقاط قوت استفاده مجدد از لجن تولید شده از تصفیه آب، در بخش کشاورزی به‌عنوان جایگزین معتبری برای دفع آن ترجیح داده شده است. لجن می‌تواند به‌عنوان یک ماده کم‌هزینه در کشاورزی به‌منظور اصلاح اسیدیته خاک و بهبود شرایط فیزیکی خاک استفاده شود. همچنین لجن می‌تواند به‌عنوان کاهش‌دهنده مؤثر فسفر با هزینه کم در خاک‌های حاوی مواد مغذی، مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر، ویژگی‌های منحصربه‌فرد لجن، امکان ترکیب آن در مصالح ساختمانی مانند آجر، سرامیک، سنگدانه‌های سبک، سیمان و ژئوپلیمرها را فراهم می‌کند. چالش‌های اصلی در کاربرد لجن در مصالح ساختمانی ناشی از تنوع بالای آن در خواص فیزیکی-شیمیایی و محتوای نسبتاً بالای مواد آلی است؛ که تخلخل و جذب آب را افزایش می‌دهد.

در راستای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل آلودگی محیط‌زیست و گرم‌شدن زمین، تلاش‌های زیادی برای ذخیره‌سازی انرژی با منابع جایگزین تجدیدپذیر سبز و پایدار، در حال توسعه است و مطالعات نشان داده که لجن با ترکیب فلزات مختلف، قابلیت بالایی در تولید نسل جدید قطعات الکترونیکی ذخیره انرژی مانند خازن‌ها دارد. با توجه به موارد ذکرشده و بر اساس پیچیدگی لجن، بهتر است اقدامات و مطالعات بیشتری برای به‌کارگیری اقتصاد چرخشی لجن در صنایع مختلف از جمله کاربردهای احتمالی لجن در صنعت مراقبت سلامت و پزشکی انجام شود.

منابع و ماخذ

[1]. Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., van der Meer, T. (2009). The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. Ecological economics, 68 (4), 1052–1060.

[۲]. اعلائی شهمیرزادی، محمد امین، حسینی، سید سعید (۱۳۹۳). مدیریت شورابه‌های ناشی از نمک‌زدایی آب دریا از منظر محیط زیست، تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۰، شماره ۳، صص ۱۱۲-۱۰۴.

[۳]. فدائی تهرانی، محمدرضا، ابارشی، مریم (۱۴۰۳). بررسی فنی، محیط زیستی و اقتصادی نمک زدایی آب شور و تحلیل شرایط برای ایران، نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، سال ۹، شماره ۱، صص ۸۵-۷۱.

[۴]. رازقی، ناصر (۱۳۹۵) فناوری های نمک زدایی در توسعه منابع آب (پیشگفتار)، نشریه آب و فاضلاب، سال ۲۷، شماره ۵، صص ۲-۱.

[5]. Mogashane, T. M., Maree, J. P., Mujuru, M., Mphahlele-Makgwane, M. M. (2020). Technologies that can be used for the treatment of wastewater and brine for the recovery of drinking water and saleable products. Recovery of Byproducts from Acid Mine Drainage Treatment, 97-156.

[6]. Caniani, D., Masi, S., Mancini, I.M., Trulli, E. (2013). Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. Waste Management, 33(6), 1461-1468.

[7]. Ahmad, T., Ahmad, K., Alam, M. (2017). Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. Environmental Monitoring and Assessment, 189 (9), 1–10.

[8]. Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Hu, Y.S., Kumar, J.L.G., Zhao, X.H. (2011). Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment. Process Biochemistry, 46 (1), 278–283.

[9]. Ayoub, M., Abdelfattah, A. (2016). A parametric study of alum recovery from water treatment sludge. Water Science and Technology, 74(2), 516–523.

[10]. Kolarik, L.O., Priestley, A.J. (1995). Modern techniques in water and waste water treatments. CSIRO Publishing, East Melbourne, Victoria 3002, Australia, pp. 24– 38.

[25]. Pestana, C.J., Reeve, P.J., Sawade, E., Voldoire, C.F., Newton, K., Praptiwi, R., Collingnon, L., Dreyfus, J., Hobson, P., Gaget, V. (2016). Fate of cyanobacteria in drinking water treatment plant lagoon supernatant and sludge. Science of the Total Environment, 565, 1192–1200.

[26]. Ahmad, T., Ahmad, K., Alam, M. (2021). Simultaneous modelling of coagulant recovery and reuse by response surface methodology. Journal of Environmental Management, 285, 112139.

[27]. Tetteh, E.K., Rathilal, S. (2019). Application of organic coagulants in water and wastewater treatment. Organic Polymers, 51.

[28]. Lim, B.-C., Lim, J.-W., Ho, Y.-C. (2018). Garden cress mucilage as a potential emerging biopolymer for improving turbidity removal in water treatment. Process Safety and Environmental Protection, 119, 233–241.

[29]. Ozairi, N., Mousavi, S.A., Samadi, M.T., Seidmohammadi, A., Nayeri, D. (2020). Removal of fluoride from water using coagulation-flocculation process: a comparative study. Desalination and Water Treatment, 180, 265–270.

[30]. Iwuozor, K. O. (2019). Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. Advanced Journal of Chemistry-Section A, 2(2), 105-127.

[31]. Sales, A., de Souza, F.R., Almeida, F.d.C.R. (2011). Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. Construction and Building Materials, 25 (6), 2793–2798.

[32]. Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., Ismail, N. I., Hasan, H. A., Othman, A.R., Purwanti, I. F. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(24), 9312.

[33]. Nayeri, D., Mousavi, S. A. (2022). A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge. Journal of Environmental Management, 319, 115649.

[34]. Elliott, H. A., Dempsey, B. A., Hamilton, D. W., DeWolfe, J. R. (1990). Land application of water treatment sludges: impact and management. Am. Water Works Assoc. Res. Foundation, Denver, CO.

[35]. Wang, X., Shi, C., Hao, X., van Loosdrecht, M. C., Wu, Y. (2023). Synergy of phosphate recovery from sludge-incinerated ash and coagulant production by desalinated brine. Water Research, 231, 119658.

[36]. Zhao, Y., Liu, R., Awe, O.W., Yang, Y., Shen, C. (2018). Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals–an explicit and comprehensive review. Chemical Engineering Journal, 353, 717–726.

[11]. Żoczek, Ł., Dudziak, M. (2022). Types and valorization of sludge generated in water treatment processes. ACEE, 1, 115-121.

[12]. Jung, K.-W., Hwang, M.-J., Park, D.-S., Ahn, K.-H. (2016). Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption processes. Journal of Environmental Management, 181, 425–434.

[13]. Mauter, M. S., Fiske, P. S. (2020). Desalination for a circular water economy. Energy and Environmental Science, 13(10), 3180-3184.

[14]. Ferronato, N., Rada, E.C., Gorritty Portillo, M.A., Cioca, L.I., Ragazzi, M., Torretta, V. (2019). Introduction of the circular economy within developing regions: a comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. Journal of Environmental Management,230, 366–378.

[15]. MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. Journal of Industrial Ecology, 2(1), 23–44.

[16]. Curran, T., Williams, I. (2012). A zero waste vision for industrial networks in Europe. Journal of Hazardous Materials, 207, 3–7.

[17]. Smol, M., Adam, C., Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. Journal of Material Cycles and Waste Management, 22, 682-697.

[18]. Lee, P., Sims, E., Bertham, O., Symington, H., Bell, N., Pfaltzgraff, L., Sjögren, P., Wilts, C.H., O'Brien, M. (2017). Towards a Circular Economy: Waste Management in the EU; study. Europ. Union.

[19]. Wilson, H.E. (2003). Innovative reuse options for water treatment plant sludges. Deakin University.

[20]. Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., Milne, N. A. (2022). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. Environmental Technology and Innovation, 102651.

[21]. Maiden, P., Hearn, M., Boysen, R., Chier, P., Warnecke, M., Jackson, W. (2015). Alum sludge re-use, Investigation (10OS-42) prepared by GHD and Centre for Green Chemistry (Monash University) for the Smart Water Fund. Victoria, ACTEW Water and Seawater', Melbourne, Australia.

[22]. Muisa, N., Nhapi, I., Ruziwa, W., Manyuchi, M.M. (2020). Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: a review. Journal of Water Process Engineering, 35, 101187.

[23]. Guine, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Udo de Haes, H., Van der Voet, E., Wrisberg, M. (2002). Life cycle assessment. In: An Operational Guide to ISO Stand, Vols: 1-3.

[24]. Pradel, M., Aissani, L., Villot, J., Baudez, J.-C., Laforest, V. (2016). From waste to added value product: towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge – a review. Journal of cleaner production, 131, 60–75.

device applications. Journal of Energy Storage, 31, 101652.

[48]. Benoy, S. M., Pandey, M., Bhattacharjya, D., Saikia, B. K. (2022). Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials. Journal of Energy Storage, 52, 104938.

[49]. Augustyn, V., Simon, P., Dunn, B. (2014). Pseudocapacitive oxide materials for high-rate electrochemical energy storage. Energy and Environmental Science, 7(5), 1597-1614.

[50]. Vangari, M., Pryor, T., Jiang, L. (2013). Supercapacitors: review of materials and fabrication methods. Journal of Energy Engineering, 139(2), 72-79.

[51]. Iqbal, J., Numan, A., Rafique, S., Jafer, R., Mohamad, S., Ramesh, K., Ramesh, S. J. E. A. (2018). High performance supercapattery incorporating ternary nanocomposite of multiwalled carbon nanotubes decorated with Co_3O_4 nanograins and silver nanoparticles as electrode material. Electrochimica Acta, 278, 72-82.

[52]. Bhat, S. A., Kumar, V., Kumar, S., Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Chae, K. J. (2023). Supercapacitors production from waste: a new window for sustainable energy and waste management. Fuel, 337, 127125.

[53]. Li, Y., Jia, X., Li, X., Liu, P., Zhang, X., Guo, M. (2023). Study on the potential of sludge-derived humic acid as energy storage material. Waste Management, 162, 55-62.

[54]. Du, Z., Wang, Q., Du, Y., Xu, Q., Wang, D., Zhang, W. (2022). Obtaining high-value nitrogen-containing carbon nanosheets with ultrahigh surface area from waste sludge for energy storage and wastewater treatment. Science of the Total Environment, 805, 150353.

[55]. Nkuna, S. G., Olwal, T. O., Chowdhury, S. D., Ndambuki, J. M. (2024). A review of wastewater sludge-to-energy generation focused on thermochemical technologies: an improved technological, economical and socio-environmental aspect. Cleaner Waste Systems, 7, 100130.

[56] Mouratib, R., Oularbi, L., Achargui, N., El Krati, M., Younssi, S. A., Tahiri, S., El Rhazi, M. (2022). Carbon paste electrode modified with Al-and Si-rich water treatment sludge for Bisphenol-A detection. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(4), 108072.

[57] Kazemi, A.S., Arshia, M.J., Khabazian, A. (2025). Sea water desalination sludge properties and applications; from membranes to energy storage devices, In peer review.

[37]. Gilmour, D., Jorat, E., Minto, A., Tierney, I., Aitkenhead, M., Coull, M., Hough, R. (2022). Applying drinking water treatment residuals to land: opportunities and implications.

[38]. Mattoso, A. P., Cunha, S., Aguiar, J., Duarte, A., Lemos, H. (2024). Valorization of water treatment sludge for applications in the construction industry: a review. Materials, 17(8), 1824.

[39]. Ramirez Zamora, R., Ayala, F.E., Garcia, L.C., Moreno, A.D., Schouwenaars, R. (2008). Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges. Journal of Environmental Science and Health Part A, 43 (13), 1562–1568.

[40]. Niwagaba, C.B., Ayii, A.E., Kibuuka, A.O., Pomi, R. (2019). Possibilities for the use of sludge from A drinking water treatment plant at Ggaba III in Kampala, Uganda. Detritus, 6, 59–67.

[41]. Herreno, ˜ L.C.F., Solano, D.M.V., Sarabia, K.D.R., P´erez, J.O.C., Quintero, A.A.M. (2019). Drinking water treatment sludge as a partial substitute for clays in nonstructural brick production. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1409, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.

[42]. Dohim, M.A., Abdelaal, A., Beheary, M.S., Abdullah, N.A., Razek, T.M.A. (2019). Compressive strength of geopolymeric cubes produced from solid wastes of alum industry and drinking water treatment plants. Egyptian Journal of Chemistry, 62(12), 2331-2340.

[43]. Cremades, L.V., Cusidó, J.A., Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. Journal of Cleaner Production, 201, 1071–1080.

[44]. Gomes, S.D.C., Zhou, J.L., Li, W., Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. Resources, Conservation and Recycling, 145, 148–159.

[45]. Gerard, O., Numan, A., Krishnan, S., Khalid, M., Subramaniam, R., Kasi, R. (2022). A review on the recent advances in binder-free electrodes for electrochemical energy storage application. Journal of Energy Storage, 50, 104283.

[46]. Afif, A., Rahman, S. M., Azad, A. T., Zaini, J., Islan, M. A., Azad, A. K. (2019). Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage–A review. Journal of Energy Storage, 25, 100852.

[47] Raghavendra, K. V. G., Vinoth, R., Zeb, K., Gopi, C. V. M., Sambasivam, S., Kummara, M. R., Obaidat, I.M., Kim, H. J. (2020). An intuitive review of supercapacitors with recent progress and novel

Sustainable Energy Management From Seawater Desalination Sludge With a Circular Economy Approach

Asieh Sadat Kazemi[1], Mahsa Shahi[2], Seiyed Mossa Hosseini[3,*]

In recent years, the demand for fresh water has been increasing with the increase in the world population and seawater desalination has attracted global attention. The concentrated waste resulting from the desalination process of seawater is called sludge. Since the disposal of sludge in the environment is limited due to factors such as high disposal costs, and some legal restrictions, it is necessary to find a suitable method for managing seawater treatment sludge. In this study, various methods of recycling sludge from seawater treatment have been investigated and compared. Recycling methods based on the concept of circular economy include the reuse of sludge as coagulants, in the agricultural and construction industries and in fabrication of electronic energy storage devices. Studies have shown that converting bulky sludge produced in seawater treatment systems into value-added products can be a very suitable and environmentally friendly alternative method for sludge management.

Keywords: Seawater Desalination Sludge, Circular Economy, Coagulant, Agriculture, Construction, Energy Storage

---

[*] Corresponding Author. Associate Professor, Tel/Fax: (9821)6111 2938, Email: smhosseini@ut.ac.ir

[1] Department of Physics, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Tehran, Iran

[2] Civil and Environmental Engineering Department (CEE), Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

[3] Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.