ترجمک
arjomac
انتشارات ترجمک

جاوید احمد پاری ا ون-جون لی ا ای.کی. حقی

سیستم تصفیه فاضلاب با تخلیه مایع صفر

از معرفی تا بکارگیری



مهندس زینب رفیعی رودبالی

سیستم تصفیه فاضلاب تخلیه مایع صفر بهداشت محیط

توجه :

کتاب حاضر حاصل زحمات **مهندس زینب رفیعی رودبالی** می‌باشد. فایل کتاب حاوی اطلاعات **DRM** (مدیریت حقوق دیجیتال) است. وقتی برای اولین بار فایل را باز می کنید، کد شناسایی کتاب به همراه آدرس **IP** سیستم شما ذخیره شده و زمانیکه آنلاین شوید، به سرور انتشارات ترجمک انتقال می یابد.

خواهشمند است به حقوق نگارنده و انتشارات ترجمک احترام گذاشته و از توزیع بدون مجوز فایل کتاب اجتناب نمایید. شما با خرید و دانلود این کتاب موافقت نموده‌اید که اطلاعات فایل **DRM** به سرور انتشارات ترجمک انتقال یابد و در صورت محرز شدن نقض حقوق صاحب اثر، کلیه خسارات حاصله در طی فرآیند حقوقی و مطابق قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان و ناشران جمهوری اسلامی (مصوب دوازده اسفند ۱۳۶۵ یا بعد از آن) از شما دریافت شود.

از اینکه با عرضه مقرون به صرفه کتاب های الکترونیک و شکوفایی انتشارات ترجمک همیاری می کنید، سپاسگزاریم.

انتشارات ترجمک

https://tarjomac.ir/shop/

جاوید احمد پارای

ون-جون لی | ای. کی. حقی

سیستم تصفیه فاضلاب

تخلیه مایع صفر

از معرفی تا بکارگیری

مترجم

مهندس زینب رفیعی رودبالی

کارشناس ارشد بهداشت محیط

ویراست اول، زمستان ۱۴۰۴

انتشارات ترجمک

شماره کتابشناسی ملی	: ۱۰۳۴۱۲۶۳
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۵۱۲۶-۲۳-۷ ؛ ۳۸۵۰۰۰ تومان
عنوان و نام پدیدآور	: سیستم تصفیه فاضلاب تخلیه مایع صفر/ [ویراستار] جاویداحمد پارای، ون‌جون لی، ای‌کی حقی ؛ مترجم زینب رفیعی‌رودبالی
مشخصات نشر	: همدان، ترجمک، ۱۴۰۴
مشخصات ظاهری	: ۲۵۴ ص.: مصور(بخشی رنگی)، جدول
یادداشت	: عنوان اصلی: Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System
موضوع	: فاضلاب — تصفیه (Sewage – Purification)، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (Sewage disposal plants)، آب -- استفاده مجدد (Water reuse)، فاضلاب -- تاسیسات انتقال و مصرف (Sewage disposal plants)
رده بندی کنگره	: TD745
رده بندی دیویی	: ۶۳۸/۳

شناسنامه کتاب

نام کتاب: سیستم تصفیه فاضلاب تخلیه مایع صفر

نویسنده: جاوید احمد پارای، ون-جون لی، ای. کی. حقی

ترجمه: مهندس زینب رفیعی رودبالی

ناشر: انتشارات ترجمک

صفحه آرایی: انتشارات ترجمک

طراحی جلد: الهام بازوند

نوبت چاپ: اول، ۱۴۰۴

قیمت (پرینت): ۳۸۵۰۰۰ تومان

قیمت (ایبوک): ۱۲۰۰۰۰ تومان

چاپ: گروه نشر الکترونیک ترجمک

شابک (پرینت): ۹۷۸-۶۲۲-۵۱۲۶-۲۳-۷

شابک (ایبوک): ۹۷۸-۶۲۲-۵۱۲۶-۲۴-۴

تلفن تماس: ۰۹۱۸۱۵۰۶۱۰۰

تارنمای اینترنتی: https://tarjomac.ir

ISBN : 978-622-5126-23-7

9 786225 126237

ISBN : 978-622-5126-24-4

9 786225 126244

Fitst Edition, 2025

Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System:

From Introduction to Application

نویسنده:

جاوید احمد پری (Javid Ahmad Parray)

ون-جون لی (Wen-Jun Li)

ای. کی. حقی (A. K. Haghi)

مترجم:

مهندس زینب رفیعی رودبالی

(Zeinab Rafiei Roodbali)

ناشر:

ناشر اورجینال:

اسپرینگر چام (Springer Cham)، ۲۰۲۵

ناشر ترجمه:

انتشارات ترجمک (Tarjomac)، ۱٤۰٤

شابک (ISBN):

شابک اورجینال

ISBN: 978-3-031-84908-4 (hbk)

ISBN: 978-3-031-84909-1 (ebk)

شابک ترجمه فارسی:

ISBN: 978-622-5126-23-7 (hbk)

ISBN: 978-622-5126-24-4 (ebk)

کلیه حقوق این اثر برای انتشارات ترجمک محفوظ است. این اثر شامل کلیه قوانین حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان و ناشران جمهوری اسلامی می باشند (مصوب دوازده اسفند ۱۳٦۵ یا بعد از آن)، و بهره برداری بدون مجوز از آن به هر شکلی ممنوع است.

انتشارات ترجمک: سال ۱٤۰٤

همدان، صندوق پستی ۱۱۷-٦۵۹۱۵

tarjomac@gmail.com

Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System:

From Introduction to Application

معرفی کتاب

سیستم تخلیه مایع صفر (ZLDS)[1] فرآیندی است که آب و حلال‌ها را از فاضلاب بازیابی می‌کند. اجزای باقی‌مانده برای تشکیل آب خالص، آب‌زدایی می‌شوند و در نتیجه پساب صفر حاصل می‌شود. این کتاب یک راهنمای منحصر به فرد تحقیق محور است که کل فرآیند تخلیه مایع صفر را از مقدمه تا کاربرد آن پوشش می‌دهد.

تصفیه‌خانه‌های آب با تخلیه مایع صفر به تخصص مهندسی بالا و برنامه‌ریزی دقیق برای دستیابی به خروجی‌های صفر نیاز دارند. اگرچه این یک تکنیک تصفیه فاضلاب کارآمد است، اما دفع نامناسب فاضلاب صنعتی می‌تواند منجر به خطرات زیست‌محیطی مانند آلودگی آب و خاک شود.

این کتاب بر تخریب اکولوژیک تمرکز دارد و عمیقاً به پیامدهای دفع نامناسب فاضلاب صنعتی می‌پردازد و اثرات آن بر آلودگی آب، عدم تعادل اکوسیستم و خطرات آن برای سلامت انسان را نمایان می‌کند. این کتاب آلودگی حاصله و پیامدهای گسترده آن را به دقت بررسی کرده و بر لزوم روش‌های مناسب دفع تأکید می‌کند.

یکی از حیاتی‌ترین نیازها برای یک زندگی سالم، تأمین آب سالم و حذف آلاینده‌ها از منابع آب عمومی است. این کتاب می‌تواند با ارائه بهترین شیوه‌ها، وضعیت سالم بسیاری از کشورها را منعکس کند و هدف آن تقویت درک نقش آلاینده‌های شیمیایی در سیستم‌های آب در کاهش خطرات زیست‌محیطی و کاربرد دقیق «فناوری تخلیه مایع صفر» است.

با افزایش آلودگی صنعتی، نیاز به بررسی راه‌های عملی برای مدیریت پسماندهای صنعتی از فاضلاب وجود دارد. این کتاب تحقیقات نوآورانه‌ای در مورد استفاده از «سیستم تخلیه مایع صفر» برای دستیابی به این هدف در سطح ملی و بین‌المللی ارائه می‌دهد. همچنین استراتژی‌های مناسب مدیریت منابع را برای رسیدگی به نگرانی‌های زیست‌محیطی بررسی می‌کند.

[1] Zero Liquid Discharge System

این کتاب به طور انتقادی اثرات مواد شیمیایی صنعتی در تامین آب و بر سلامت را بررسی می‌کند. این کتاب محدودیت‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های چارچوب‌های فعلی را بررسی می‌کند و مزایای استفاده از «سیستم تخلیه مایع صفر» و تأثیر آنها بر پایداری جهانی را مورد بحث قرار می‌دهد. این کتاب همچنین بر این فناوری برای محدود کردن استفاده از مواد سمی صنعتی تأکید دارد.

فصول کتاب وجود مواد شیمیایی صنعتی در آب آشامیدنی و خطرات مرتبط با سلامت انسان را بازنگری می کند. این کتاب همچنین سیاست‌های موجود مربوط به فاضلاب صنعتی را تجزیه و تحلیل می‌کند و توصیه‌های راهبردی را برای مدیریت مؤثر فاضلاب با استفاده از سیستم تخلیه مایع صفر ارائه می‌دهد.

این کتاب، استراتژی‌های اجرایی و اتخاذ سیاست را مورد بحث قرار می‌دهد و بر نقش سیاست در شکل‌دهی و بهبود چارچوب‌های مدیریت فاضلاب صنعتی تأکید می‌کند. هدف این کتاب ویرایش‌شده، نمایان کردن عوامل عملیاتی حیاتی و بررسی سرمایه‌گذاری‌های کلان این سیستم و هزینه‌های عملیاتی است.

هرچند در این کتاب پژوهش‌محور، خوانندگان به وضوح متوجه خواهند شد که این سیستم جدید می‌تواند لجن خشکی حاوی غلظت‌های بالای مواد شیمیایی خطرناک و فلزات سنگین از خود به جا بگذارد. این کتاب نشان می‌دهد که کاربرد سیستم تخلیه مایع صفر (ZLDS) نیاز به برنامه‌ریزی و تحلیل دقیق دارد.

ویژگی های مشخصه:

- ☑ یک راهنمای منحصر به فرد مبتنی بر تحقیق که کل فرآیند تخلیه مایع صفر را پوشش می‌دهد
- ☑ بر تخریب زیست‌محیطی و بررسی عمیق پیامدهای دفع نامناسب فاضلاب صنعتی تمرکز دارد
- ☑ هدف آن تقویت درک ما از نقش آلاینده‌های شیمیایی در سیستم‌های آب است

معرفی نویسندگان / ادیتورها

نام: جاوید احمد پری (Javid Ahmad Parray)

بیوگرافی: دکتر جاوید ای. پری دارای مدرک کارشناسی ارشد در رشته علوم محیط زیست است. او برنامه تحقیقاتی خود (MPhil و PhD) را از دانشگاه کشمیر پس از قبولی در آزمون معتبر JKSLET در سطح ایالتی به پایان رسانده است. او همچنین تحقیقات فوق دکترا خود را در دانشگاه کشمیر انجام داده است. دکتر پری همچنین توسط SERB – DST، دولت هند، دهلی نو، موفق به دریافت پروژه دانشمند جوان سریع (Fast Track Young Scientist Project) شده است. او در دپارتمان علوم محیط زیست، GDC Eidgah Srinagar، دانشگاه Cluster Srinagar تدریس می‌کند. او در دوره‌ها و کنفرانس‌های زیادی در مورد مسائل زیست محیطی و سایر جنبه‌های بیوتکنولوژی در داخل و خارج از کشور مانند سریلانکا، اندونزی، مالزی، چین، ازبکستان و غیره شرکت کرده است. علایق تحقیقاتی اساسی او شامل میکروبیولوژی اکولوژیکی و کشاورزی، تغییرات اقلیمی و بیوتکنولوژی میکروبی، میکروبیوم محیطی و غیره است. او بیش از ۵۰ مقاله تحقیقاتی با تأثیر بالا و فصل‌هایی از کتاب‌ها را در مجلات و مراکز انتشاراتی معتبر منتشر کرده است. دکتر پری ۲۵ کتاب با ناشران بین‌المللی مانند Elsevier، Springer، Callisto Reference USA و Wiley-Blackwell تألیف کرده است. دکتر پری عضو هیئت تحریریه و داور دائمی بسیاری از مجلات است و به عنوان سخنران مدعو در جلسات/کنفرانس‌های علمی مختلف در داخل و خارج از کشور حضور داشته است. او به عنوان ویراستار مهمان، مقالات ویژه مختلفی در مورد بیوفیلم‌های محیطی، سیستم‌های غذایی پایدار و محیط زیست را با BioMed Research International، Hindwaii. ،Frontiers in Sustainable Food Systems و غیره ویرایش کرده است. او عضو بسیاری از سازمان‌ها و انجمن‌های علمی بین‌المللی و ملی مانند انجمن PGPR آسیا، IJMS، Mumbai، Academy of Eco science، IAES Haridwar و غیره است. دکتر جاوید همچنین "مدال طلای سال دانشمندان نوظهور" را برای سال ۲۰۱۸ توسط آکادمی علوم محیطی هند دریافت کرد. دکتر پری هماهنگ‌کننده دوره‌های ۰۳ CeC-MOOCS National Swayam در علوم محیطی است. دکتر پری اخیراً توسط آکادمی علوم چین بورسیه تحصیلی PIFI Visiting را دریافت کرده است.

نام: ون-جون لی (Wen-Jun Li)

بیوگرافی: دکتر ون-جون لی دکترای خود را در رشته میکروبیولوژی از موسسه بوم‌شناسی کاربردی شنیانگ، آکادمی علوم چین دریافت کرد. او در حال حاضر به عنوان استاد برجسته در دانشکده علوم زیستی، دانشگاه سون یات-سن، گوانگژو، چین مشغول به کار است. انتشارات او شامل شش تک‌نگاری، ۳۰ اختراع ثبت شده و بیش از ۱۰۰۰ مقاله تحقیقاتی داوری شده توسط همتایان است. تحقیقات او عمدتاً بر تنوع میکروبی در آن محیط‌های غیرمعمول، با استفاده از روش‌های وابسته به کشت و مستقل از کشت، و همچنین بر مکانیسم‌های میکروب‌های اکستریموفیل برای سازگاری با آن محیط‌های غیرمعمول متمرکز است. او در سال ۲۰۰۷ جایزه اسکرمن WFCC (فدراسیون جهانی مجموعه‌های کشت) را برای طبقه‌بندی میکروبی و شش جایزه دیگر در سطح استانی و وزارتخانه‌ای را به خاطر مشارکت‌های تحقیقاتی برجسته‌اش در زمینه سیستماتیک میکروبی و بوم‌شناسی میکروبی دریافت کرد. او با موفقیت بیش از ۱۵۰ دانشجوی کارشناسی ارشد و نسل جوان در سطح فوق دکترا را در زمینه طبقه‌بندی میکروبی و بوم‌شناسی میکروبی در داخل و خارج از کشور آموزش داده است. ایشان به عنوان عضو هیئت تحریریه یا ویراستار وابسته بیش از ۱۰ مجله بین‌المللی فعالیت دارند و از سال ۲۰۱۷ به عنوان عضو کمیته بین‌المللی سیستماتیک پروکاریوت‌ها (ICSP) و دبیر انجمن بین‌المللی سیستماتیک میکروبی برگی (BIS) منصوب شده‌اند.

نام: ای. کی. حقی (A. K. Haghi)

بیوگرافی: دکتر ای. کی. حقی استاد بازنشسته مهندسی در دانشگاه گیلان است و بیش از ۲۵۰ کتاب دانشگاهی پژوهشی و بیش از ۱۰۰۰ مقاله پژوهشی در مجلات و مجموعه مقالات کنفرانس‌های مختلف منتشر کرده است. رهبری ایشان در انتشارات دانشگاهی شامل تأسیس و سردبیری مجلات معتبر است. پیشینه تحصیلی گسترده و نقش‌های نظارتی پروفسور حقی، تخصص و مشارکت‌های ایشان در حوزه علوم مهندسی را برجسته می‌کند. ایشان به عنوان همکار پژوهشی افتخاری (HRA) در دانشگاه کویمبرا، پرتغال منصوب شده‌اند.

فهرست مندرجات در یک نگاه

عنوان | صفحه

فصل ۱- مقدمه‌ای بر تخلیه مایع صفر (ZLD): یک نگرانی رو به رشد جهانی ۱

فصل ۲- حفاظت از منابع آب در مقابل آلودگی با زباله‌های شیمیایی صنعتی..... ۱۲

فصل ۳- پیاده‌سازی سیستم‌های تخلیه مایع صفر برای کمینه‌سازی پسماندهای فاضلاب صنعتی ۳۸

فصل ۴- اثرات منفی آلودگی آب صنعتی بر سلامت انسان و مزایای سیستم تخلیه مایع صفر..... ۶۵

فصل ۵- فناوری‌های پیشرفته تصفیه الکتریکی برای پیشگیری از ورود مواد شیمیایی صنعتی ۸۰

فصل ۶- تحقیقات مهندسی در مورد تلفیق ماکروفیت‌ها، زئوپلانکتون‌ها و یادگیری ماشین..... ۱۰۰

فصل ۷- پاسخ جامعه میکروبی به تخلیه فاضلاب در پیکره‌های آبی ۱۱۹

فصل ۸- کاربرد ابزار دقیق آنلاین و یادگیری ماشینی نظارت شده برای شناسایی تخلیه صنعتی ۱۳۹

فصل ۹- مسیرهای آینده برای اینترنت اشیا و سیستم‌های تخلیه صفر مایع (ZLD) ۱۶۱

فصل ۱۰- به سوی سیستم تخلیه مایع صفر پایدار..... ۱۷۷

فصل ۱۱- حفاظت از منابع آب در مقابل آلودگی دفع فاضلاب شیمیایی صنعتی در ۲۰۰

فصل ۱۲- توصیه‌های سیاست استراتژیک و پیامدهای آن..... ۲۱۰

فهرست مندرجات کتاب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه‌ای بر تخلیه مایع صفر (ZLD): یک نگرانی رو به رشد جهانی ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ آشنایی با تخلیه مایع صفر ۳

۱-۲-۱ اصول کلیدی ZLD ۳

۱-۲-۲ اجزای کلیدی سیستم‌های تخلیه مایع صفر (ZLD) ۴

۱-۲-۳ مقایسه ZLD با روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب ۴

۱-۳ اهمیت ZLD در مدیریت پایدار آب ۵

۱-۴ پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ZLD ۶

۱-۵ مطالعات موردی و دیدگاه‌های جهانی ۷

۱-۶ چشم‌انداز و چالش‌های آینده ۸

۱-۶-۱ چشم‌انداز آینده ۸

۱-۶-۲ چالش‌ها ۹

۱-۷ نتیجه‌گیری ۹

منابع فصل ۱۰

فصل ۲- حفاظت از منابع آب در مقابل آلودگی با زباله‌های شیمیایی صنعتی ۱۲

۲-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های تخلیه مایع صفر (ZLD) ۱۳

۲-۱-۱ تعریف و مفهوم ZLD ۱۳

۲-۱-۲ توسعه و تکامل تاریخی ZLD ۱۴

۲-۱-۳ اهمیت ZLD در مدیریت مدرن آب ۱۴

۲-۲ اصول بنیادین سیستم‌های ZLD ۱۵

۲-۲-۱ هدف از بین بردن ضایعات مایع ۱۶

۲-۲-۲ اجزای کلیدی سیستم‌های ZLD ۱۷

۲-۲-۲-۱ فناوری‌های پیشرفته فیلتراسیون ۱۸

۲-۲-۲-۲ فناوری‌های تبخیر ۱۹

۲-۲-۲-۳ فناوری‌های تبلور ۲۰

۲-۲-۳ بازیابی و استفاده مجدد فاضلاب ۲۱
۲-۲-۴ تحقیقات جاری سیستم‌های ZLD ۲۲
۲-۳ مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم‌های ZLD ۲۳
۲-۳-۱ مقابله با کمبود آب ۲۳
۲-۳-۲ رعایت مقررات و کنترل آلودگی ۲۴
۲-۳-۳ بازیابی منابع و استفاده مجدد از آب ۲۵
۲-۳-۴ بازده مالی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها ۲۶
۲-۴ طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های ZLD ۲۶
۲-۴-۱ انتخاب فناوری‌های مناسب ۲۷
۲-۴-۲ بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی ۲۷
۲-۴-۳ مدیریت چالش‌های عملیاتی ۲۸
۲-۴-۴ ادغام با فرآیندهای صنعتی موجود ۲۹
۲-۵ ملاحظات اقتصادی سیستم‌های ZLD ۲۹
۲-۵-۱ هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و سرمایه‌ای ۲۹
۲-۵-۲ هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۳۰
۲-۵-۳ مزایای اقتصادی و بازده مالی ۳۱
۲-۵-۴ فرصت‌های تأمین مالی و تشویقی ۳۲
۲-۶ مطالعات موردی پیاده‌سازی موفق ZLD ۳۳
۲-۶-۱ ZLD در صنعت تولید برق ۳۳
۲-۶-۲ ZLD در صنعت نساجی ۳۳
۲-۶-۳ ZLD در صنعت داروسازی ۳۴
۲-۶-۴ تحلیل اثرات و مزایای زیست‌محیطی ۳۴
۲-۷ نتیجه‌گیری ۳۵
منابع فصل ۳۶
فصل ۳- پیاده‌سازی سیستم‌های تخلیه مایع صفر برای کمینه‌سازی پسماندهای فاضلاب صنعتی ۳۸
۳-۱ مقدمه ۳۹
۳-۱-۱ پیشینه و اهمیت تخلیه مایع صفر (ZLD) ۳۹
۳-۱-۲ دامنه ZLD ۴۰
۳-۱-۳ اهداف ۴۱
۳-۲ بازنگری فاضلاب صنعتی در تولید مکانیکی ۴۲
۳-۲-۱ منابع فاضلاب در فرآیندهای تولید مکانیکی ۴۲
۳-۲-۲ آلاینده‌های معمول در فاضلاب صنعتی ۴۳

۳-۲-۳ تأثیر زیست محیطی فاضلاب صنعتی تصفیه نشده ۴۴
تحقیقات و پیشرفت‌های جاری ۴۵
۳-۳ اصول سیستم‌های تخلیه مایع صفر (ZLD) ۴۶
۳-۳-۱ اجزای کلیدی سیستم‌های ZLD ۴۶
۱. فرآیندهای پیش تصفیه: ۴۷
۲. فناوری‌های تصفیه اولیه: ۴۷
۳. فناوری‌های تصفیه ثانویه: ۴۷
۴. فناوری‌های پیشرفته تصفیه و بازیابی: ۴۷
۳-۳-۲ مزایای اجرای ZLD در تولید مکانیکی ۴۸
۱. مزایای زیست‌محیطی: ۴۸
۲. مزایای اقتصادی: ۴۸
۳. مزایای عملیاتی: ۵۰
تحقیقات و پیشرفت‌های تکنولوژیک جاری ۵۰
۱. فناوری‌های غشایی بهبود یافته: ۵۰
۲. تبخیر و تبلور با بهره‌وری انرژی: ۵۰
۳. سیستم‌های تصفیه پیوندی: ۵۱
۴. بازیابی و ارزش‌گذاری منابع: ۵۱
۵. تولید هوشمند و اتوماسیون: ۵۱
۶. فناوری‌های پایدار و سبز: ۵۱
۳-۴ فناوری‌های تخلیه مایع صفر ۵۲
۳-۴-۱ فرآیندهای پیش تصفیه ۵۲
۳-۴-۱-۱ انعقاد و لخته‌سازی ۵۲
۳-۴-۱-۲ فیلتراسیون ۵۳
۳-۴-۲ فناوری‌های تصفیه اولیه ۵۳
۳-۴-۲-۱ اسمز معکوس (RO) ۵۳
۳-۴-۲-۲ نانوفیلتراسیون (NF) ۵۴
۳-۴-۳ فناوری‌های تصفیه ثانویه ۵۴
۳-۴-۳-۱ تبخیر و تبلور ۵۴
۳-۴-۳-۲ الکترودیالیز ۵۵
۳-۴-۴ فناوری‌های پیشرفته تصفیه و بازیابی ۵۵
۳-۴-۴-۱ اسمز مستقیم (FO) ۵۵
۳-۴-۴-۲ تقطیر غشایی (MD) ۵۶
۳-۴-۴-۳ تغلیظ و مدیریت آب نمک ۵۶
۳-۵ طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های ZLD در تولید مکانیکی ۵۷
۳-۵-۱ ملاحظات طراحی ۵۷
۳-۵-۱-۱ پیکربندی سیستم ۵۷
۳-۵-۱-۲ انتخاب مواد ۵۸
۳-۵-۱-۳ بهره‌وری انرژی ۵۸

۳-۵-۲ استراتژی‌های پیاده‌سازی ۵۹
۳-۵-۲-۱ آزمایش راهنما و افزایش مقیاس ۵۹
۳-۵-۲-۲ ادغام با فرآیندهای موجود ۵۹
۳-۵-۲-۳ ملاحظات هزینه و امکان‌سنجی اقتصادی ۶۰
۳-۶ مطالعات موردی ۶۰
۳-۶-۱ اجرای موفقیت‌آمیز ZLD در تولید خودرو ۶۰
۳-۶-۲ کاربرد ZLD در تولید قطعات هوافضا ۶۱
۳-۶-۳ درس‌های آموخته‌شده از پیاده‌سازی در تولید ماشین‌آلات سنگین ۶۱
۳-۷ مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم‌های ZLD ۶۱
۳-۷-۱ کاهش ردپای زیست‌محیطی ۶۱
۳-۷-۲ صرفه‌جویی و استفاده مجدد از آب ۶۲
۳-۷-۳ صرفه‌جویی اقتصادی و تحلیل ROI ۶۲
۳-۷-۴ تبعیت از مقررات و مشوق‌ها ۶۲
۳-۸ نتیجه‌گیری ۶۳
منابع فصل ۶۳
فصل ۴- اثرات منفی آلودگی آب صنعتی بر سلامت انسان و مزایای سیستم تخلیه مایع صفر ۶۵
۴-۱ مقدمه ۶۶
۴-۲ اثرات خطرناک آلودگی آب صنعتی بر سلامت انسان ۶۷
۴-۲-۱ آلاینده‌های اصلی فاضلاب صنعتی ۶۸
۴-۲-۲ سمیت فاضلاب صنعتی ۷۰
۴-۳ مزایای فناوری‌های تخلیه صفر مایع: ۷۱
۴-۳-۱ تکنیک‌های مرتبط با ZLD ۷۱
۴-۳-۱-۱ فرآیندهای حرارتی ۷۳
۴-۳-۱-۲ فرآیندهای غشایی ۷۳
۴-۳-۱-۳ پیش تصفیه بیولوژیکی ۷۳
۴-۴ خطرات سلامتی آلودگی آب: تنوع بیماری‌ها و تأثیر جهانی ۷۵
۴-۴-۱ نقش آلودگی آب در چالش‌های بهداشت همگانی: علل و پیامدها ۷۶
۴-۴-۲ درک ناهمگونی بیماری ناشی از آلودگی آب ۷۶
۴-۴-۳ مبارزه با آلودگی آب و تأثیرات آن بر سلامت: فراخوان عمل ۷۶
۴-۴-۴ آلودگی جهانی آب و سلامت انسان ۷۶
۴-۵ نتیجه‌گیری ۷۷
منابع فصل ۷۷

فصل ۵- فناوری‌های پیشرفته تصفیه الکتریکی برای پیشگیری از ورود مواد شیمیایی صنعتی ۸۰

۵-۱ مقدمه ۸۱

۵-۲ فناوری‌های پیشرفته تصفیه الکتریکی ۸۵

۵-۲-۱ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی (EAOPs) ۸۵

۵-۲-۲ سلول‌های الکترولیز میکروبی برای حذف فلزات سنگین ۸۵

۵-۲-۳ سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی برای حذف فلزات و پرکلرات ۸۷

۵-۲-۴ کاویتاسیون ناشی از فراصوت و بازده سونوشیمیایی ۸۷

۵-۲-۵ کاربردهای فوتوکاتالیستی میکرو و نانو TiO_2 ..... ۸۷

۵-۲-۶ اسمز معکوس و کربن فعال برای حذف ریزآلاینده‌ها ۸۸

۵-۲-۷ تصفیه شیرابه با اکسیداسیون فتوشیمیایی و فرآیندهای بیولوژیکی ۸۸

۵-۲-۸ تراوش تبخیری در خلاء با غشاهای سرامیکی آبگریز ۸۹

۵-۲-۹ فناوری‌های غشایی برای تصفیه فاضلاب ۸۹

۵-۲-۱۰ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر فنتون و ازن ۸۹

۵-۳ جنبه‌های فنی ۸۹

۵-۳-۱ طراحی سیستم ۸۹

۵-۳-۲ مواد و پیکربندی الکترود ۹۰

۵-۳-۳ طراحی راکتور ۹۰

۵-۳-۴ تلفیق با فناوری‌های مکمل ۹۰

۵-۴ چگالی جریان و ولتاژ ۹۱

۵-۵ دما ۹۱

۵-۶ pH ۹۱

۵-۷ نرخ جریان و زمان ماند هیدرولیکی ۹۱

۵-۸ تخریب و حذف مواد شیمیایی خطرناک ۹۲

۵-۹ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی (EAOPs): ۹۲

۵-۱۰ سلول‌های الکترولیز میکروبی (MECs): ۹۲

۵-۱۱ سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی (BES) ۹۲

۵-۱۲ حذف فلزات سنگین، ترکیبات آلی و آلاینده‌های مقاوم ۹۳

۵-۱۳ فلزات سنگین ۹۳

۵-۱۴ ترکیبات آلی ۹۳

۵-۱۵ آلاینده‌های آلی مقاوم (POPs) ۹۴

۵-۱۶ ملاحظات اقتصادی ۹۴

۵-۱۷ هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی ۹۴
۵-۱۸ مقایسه هزینه‌ها با روش‌های متداول ۹۵
۵-۱۹ مزایای اقتصادی بلندمدت ۹۵
۵-۲۰ تولید مواد شیمیایی ۹۵
۵-۲۱ داروسازی ۹۶
۵-۲۲ آبکاری فلزات ۹۶
۵-۲۳ مزایای زیست‌محیطی ۹۶
۵-۲۴ ادغام در سیستم‌های موجود ۹۷
۵-۲۵ افزایش راندمان کلی تصفیه ۹۷
۵-۲۶ رعایت مقررات زیست‌محیطی ۹۷
۵-۲۷ مقیاس‌پذیری و سازگاری ۹۸
۵-۲۸ نتیجه‌گیری ۹۸
منابع فصل ۹۸

فصل ۶- تحقیقات مهندسی در مورد تلفیق ماکروفیت‌ها، زئوپلانکتون‌ها و یادگیری ماشین ۱۰۰

۶-۱ بازنگری روش‌های سنتی تصفیه فاضلاب در مقابل روش‌های نوآورانه ۱۰۱
۶-۲ چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های تصفیه فاضلاب متداول ۱۰۲
۶-۳ روندهای نوظهور در مدیریت پایدار فاضلاب ۱۰۳
۶-۴ نقش ماکروفیت‌ها در تصفیه فاضلاب ۱۰۴
۶-۴-۱ قابلیت‌های جذب مواد مغذی گونه‌های مختلف ماکروفیت ۱۰۵
۶-۴-۲ مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها توسط ماکروفیت‌ها ۱۰۵
۶-۴-۳ مطالعات موردی سیستم‌های تصفیه مبتنی بر ماکروفیت ۱۰۶
۶-۵ بازنگری گونه‌های زئوپلانکتون مورد استفاده در برنامه‌های تصفیه ۱۰۷
۶-۵-۱ نقش زئوپلانکتون‌ها در تجزیه مواد آلی و کاهش پاتوژن‌ها ۱۰۸
۶-۵-۲ اثرات هم‌افزایی ترکیب کردن ماکروفیت‌ها و زئوپلانکتون‌ها ۱۰۸
۶-۶ طراحی زیستگاه‌های اثربخش برای ماکروفیت‌ها و زئوپلانکتون‌ها در سیستم‌های تصفیه ۱۰۹
۶-۶-۱ بهینه‌سازی شرایط محیطی ۱۱۰
۶-۶-۲ چالش‌ها و راه‌حل‌های مهندسی برای تلفیق سیستم ۱۱۱
۶-۷ تکنیک‌های بهینه‌سازی در سیستم‌های تصفیه فاضلاب ۱۱۲
۶-۷-۱ مدلسازی پیشگو برای جذب مواد مغذی و تجزیه آلاینده‌ها ۱۱۲
۶-۷-۲ پایش زمان واقعی و استراتژی‌های مدیریت تطبیقی ۱۱۳
۶-۸ هزینه-اثربخشی روش‌های تصفیه مبتنی بر ماکروفیت‌ها و زئوپلانکتون‌ها ۱۱۴

۶-۹ مقایسه با سیستم‌های تصفیه شیمیایی و مکانیکی متداول ۱۱۵
۶-۱۰ سنجش تاثیر زیست محیطی و مزایای اکولوژیکی ۱۱۶
۶-۱۱ نتیجه‌گیری ۱۱۷
منابع فصل ۱۱۷
فصل ۷- پاسخ جامعه میکروبی به تخلیه فاضلاب در پیکره‌های آبی ۱۱۹
۷-۱ مقدمه ۱۲۰
خواص فیزیکی شیمیایی منابع آب: ۱۲۱
۷-۲ تغییرات گیاهان و جانوران پیکره‌های آبی ۱۲۱
۷-۳ فلزات سنگین و تأثیر آنها بر جامعه میکروبی ۱۲۲
۷-۴ تأثیر زباله‌های آلی بر جوامع میکروبی ۱۲۴
۷-۵ تاثیر فاضلاب صنایع رنگ بر جوامع میکروبی ۱۲۷
۷-۶ تاثیر فاضلاب صنایع شوینده بر جوامع میکروبی ۱۲۹
۷-۷ اثرات فاضلاب صنایع غذایی بر جوامع میکروبی ۱۳۲
۷-۸ نتیجه‌گیری ۱۳۵
منابع فصل ۱۳۵
فصل ۸- کاربرد ابزار دقیق آنلاین و یادگیری ماشینی نظارت شده برای شناسایی تخلیه صنعتی ۱۳۹
۸-۱ اهمیت پایش تخلیه صنعتی ۱۴۰
۸-۲ پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشت عمومی ۱۴۰
۸-۳ روش‌های تشخیص سنتی: محدودیت‌ها و چالش‌ها ۱۴۱
۸-۳-۱ فرآیندهای تحلیلی تأخیری ۱۴۱
۸-۳-۲ محدودیت‌های نمونه‌برداری دستی ۱۴۲
۸-۳-۳ مشکلات زمان پاسخ ناکافی ۱۴۳
۸-۴ پیشرفت‌ها و نیاز به روش‌های بهبود یافته ۱۴۴
۸-۵ بازنگری فناوری حسگر ۱۴۴
۸-۶ اندازه‌گیری پارامترهای کلیدی فاضلاب (pH، رسانایی، ترکیب شیمیایی) ۱۴۶
۸-۶-۱ اندازه‌گیری pH ۱۴۶
۸-۶-۲ اندازه‌گیری رسانایی ۱۴۷
۸-۶-۳ اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی ۱۴۷
۸-۷ بهبود صحت شناسایی از طریق یادگیری ماشین ۱۴۸
۸-۸ بهبود زمان پاسخ با سیستم‌های یکپارچه ۱۴۹

۸-۹ مطالعات موردی و کاربردهای دنیای واقعی ۱۵۰
۸-۱۰ چالش‌های فنی و مسیرهای آینده ۱۵۱
۸-۱۱ تکنیک‌های یادگیری ماشین نظارت شده برای تشخیص ۱۵۲
۸-۱۱-۱ تشخیص الگو و تشخیص ناهنجاری ۱۵۳
۸-۱۱-۲ پیش‌پردازش داده‌ها و انتخاب ویژگی ۱۵۳
۸-۱۱-۳ اعتبارسنجی مدل و آزمایش استحکام ۱۵۴
۸-۱۲ مطالعات موردی صنعتی: کاربردها و نتایج ۱۵۵
۸-۱۲-۱ مطالعات موردی از بخش‌های مختلف صنعتی ۱۵۶
۸-۱۲-۲ بهبود قابلیت شناسایی و زمان پاسخ ۱۵۷
۸-۱۳ نتیجه‌گیری ۱۵۸
منابع فصل ۱۵۹

فصل ۹- مسیرهای آینده برای اینترنت اشیا و سیستم‌های تخلیه صفر مایع (ZLD) ۱۶۱

۹-۱ اصول و مبانی سیستم‌های تخلیه مایع صفر (ZLD) ۱۶۲
۹-۲ اینترنت اشیا (IoT) در مدیریت فاضلاب صنعتی ۱۶۶
۹-۳ هوش مصنوعی (AI) برای سیستم‌های ZLD ۱۶۸
۹-۴ ادغام اینترنت اشیا و هوش مصنوعی در سیستم‌های ZLD ۱۷۰
۹-۵ بهینه‌سازی فرآیند و تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه ۱۷۲
۹-۶ انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی و مقررات ۱۷۳
۹-۷ روندهای آینده سیستم‌های ZLD مبتنی بر اینترنت اشیا و هوش مصنوعی ۱۷۴
۹-۸ نتیجه‌گیری ۱۷۵
منابع فصل ۱۷۶

فصل ۱۰- به سوی سیستم تخلیه مایع صفر پایدار ۱۷۷

۱۰-۱ مقدمه ۱۷۸
۱۰-۲ مفهوم سیستم ZLD پایدار ۱۷۹
سیستم ZLD حرارتی ۱۷۹
سیستم ZLD حرارتی با اسمز معکوس ۱۸۰
۱۰-۳ پیاده‌سازی سیستم ZLD در صنایع ۱۸۳
صنایع دباغی ۱۸۳
صنایع نساجی ۱۸۵
صنایع داروسازی ۱۸۵
۱۰-۴ چالش‌های پیاده‌سازی ZLD در صنایع ۱۸۶

هزینه‌های گزاف عملیاتی و سرمایه‌ای ۱۸۷
مصرف انرژی زیاد ۱۸۷
فناوری پیچیده ۱۸۸
کمبود نیروی انسانی ماهر ۱۸۸
رویارویی با مقررات ۱۸۸
کمبود آگاهی ۱۸۸
سازگاری با زیرساخت‌های موجود ۱۸۹
در دسترس بودن منابع آب ۱۸۹
رسوب‌گیری و پوسته‌ریزی ۱۸۹
انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا ۱۸۹
خطر نشت و آبشویی ۱۹۰
دشواری دفع لجن و بقایای نمک ۱۹۱
کاربرد محدود ۱۹۱
۱۰-۵ مسیر پایدار غلبه بر چالش‌ها و دیدگاه اجتماعی ۱۹۱
مزایای اجتماعی-اقتصادی ZLD ۱۹۱
چالش‌های اجتماعی عمده پایداری برای ZLD ۱۹۲
غلبه بر چالش‌های اجتماعی پایداری برای ZLD ۱۹۴
۱۰-۶ نتیجه‌گیری ۱۹۵
منابع فصل ۱۹۵
فصل ۱۱- حفاظت از منابع آب در مقابل آلودگی دفع فاضلاب شیمیایی صنعتی در ۲۰۰
۱۱-۱ مقدمه ۲۰۱
۱۱-۲ موقعیت مکانی ۲۰۱
۱۱-۳ فیزیوگرافی و زهکشی ۲۰۲
۱۱-۴ بارندگی و آب و هوا ۲۰۲
۱۱-۵ مواد و روش‌ها ۲۰۲
۱۱-۶ منطقه مورد مطالعه ۲۰۲
۱۱-۶-۱ جمع‌آوری نمونه ۲۰۴
۱۱-۷ یافته ها و بحث ۲۰۴
۱۱-۸ مشاهدات و پیشنهادات ۲۰۵
۱۱-۸-۱ دما ۲۰۶
۱۱-۸-۲ pH ۲۰۶
۱۱-۸-۳ رنگ ۲۰۶
۱۱-۸-۴ قلیائیت ۲۰۶
۱۱-۸-۵ کلرید ۲۰۶

۱۱-۸-۶ سختی کل ۲۰۷
۱۱-۸-۷ اکسیژن محلول ۲۰۷
۱۱-۸-۸ تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD) ۲۰۷
گزارش تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب در سپتامبر (۲۰۲۳) ۲۰۷
۱۱-۹ نتیجه‌گیری ۲۰۸
منابع فصل ۲۰۸
فصل ۱۲- توصیه‌های سیاست استراتژیک و پیامدهای آن ۲۱۰
۱۲-۱ مقدمه‌ای بر سیاست استراتژیک در چارچوب‌های سازمانی و نظارتی ۲۱۱
۱۲-۲ تحول شیوه‌های مدیریتی (۲۰۱۸-۲۰۲۴) ۲۱۳
۱۲-۲-۱ مطالعات موردی و کاربردهای عملی ۲۱۵
۱۲-۳ سیستم‌های مدیریت یکپارچه (IMS) ۲۱۶
۱۲-۳-۱ رویکرد ساختاریافته ۲۱۸
۱۲-۳-۲ مطالعات موردی و کاربردهای عملی ۲۱۸
۱۲-۴ مکانیسم‌های پایش انطباق ۲۱۹
۱۲-۴-۱ تأثیر بر تبعیت از مقررات و کارایی سازمانی ۲۲۱
۱۲-۴-۲ مطالعات موردی و کاربردهای عملی ۲۲۱
۱۲-۴-۳ چارچوب‌های حاکمیت و سیاست‌گذاری ۲۲۲
۱۲-۵ تخصیص و بهینه‌سازی منابع ۲۲۴
۱۲-۶ مشارکت ذینفعان و شفافیت ۲۲۵
۱۲-۶-۱ مطالعات موردی در مورد تأثیر مشارکت ذینفعان ۲۲۶
۱۲-۶-۲ استراتژی‌های مدیریت تطبیقی ۲۲۷
۱۲-۷ مدیریت ریسک در سیستم‌های یکپارچه ۲۲۸
۱۲-۸ پایش و بهبود عملکرد ۲۲۹
۱۲-۹ پایداری در مدیریت سازمانی ۲۳۰
۱۲-۹-۱ استراتژی‌های دستیابی به پایداری سازمانی ۲۳۱
۱۲-۹-۲ مطالعات موردی نمایانگر شیوه‌های پایدار ۲۳۱
۱۲-۱۰ نتیجه‌گیری ۲۳۲
منابع فصل ۲۳۲

فصل

۱

مقدمه‌ای بر تخلیه صفر مایع (ZLD): یک نگرانی رو به رشد جهانی

راشمی چاتورودی[1]

چکیده: تخلیه صفر مایع (ZLD)[2] به عنوان یک راه حل محوری برای رسیدگی به کمبود آب و چالش‌های آلودگی در سطح جهان ظهور کرده است. این مقاله تحقیقاتی به کاوش مفهوم ZLD، اهمیت آن در زمینه مدیریت پایدار آب و پیشرفت‌های فناوری که منجر به اتخاذ آن می‌شود، می‌پردازد. این مقاله با تجزیه و تحلیل مطالعات موردی و روندهای فعلی، اهمیت رو به رشد ZLD را به عنوان یک رویکرد پایدار در جهت تصفیه فاضلاب و حفاظت از منابع روشن می‌کند. مطالعه حاضر کیفی است و داده‌ها از طریق منابع بسیاری مانند مجلات، گزارش‌ها، رسانه‌های چاپی و سایر وب‌سایت‌های دولتی جمع‌آوری شده است. در این مقاله پژوهشی، محقق در مورد مفهوم ZLD، اصل کلیدی ZLD، مولفه‌های کلیدی سیستم‌های تخلیه صفر مایع (ZLD)، روش‌های متداول تصفیه فاضلاب و ZLD، اهمیت ZLD در مدیریت پایدار آب، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ZLD، چشم‌انداز و چالش‌های آینده و غیره بحث می‌کند.

کلمات کلیدی: تخلیه صفر مایع، اصل ZLD، اجزای کلیدی ZLD، اهمیت ZLD، چشم‌انداز و چالش‌های آینده، مدیریت پایدار آب

[1] Rashmi Chaturvedi
[2] Zero Liquid Discharge

۱-۱ مقدمه

در دورانی که با تشدید کمبود آب و تخریب محیط زیست مشخص می‌شود، مدیریت فاضلاب صنعتی به یک نگرانی اساسی تبدیل شده است. تخلیه صفر مایع (ZLD) به عنوان یک راه حل پایدار برای کاهش اثرات نامطلوب تخلیه فاضلاب بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان مورد توجه قرار گرفته است [۱]. هدف از این مقاله بازنگری ZLD، اهمیت آن و عواملی است که باعث پذیرش جهانی آن می‌شوند [۲]. سیستم تصفیه فاضلاب تخلیه صفر مایع (ZLD) روشی پیچیده و محیط زیست دوست است که برای تصفیه فاضلاب صنعتی استفاده می‌شود [۳]. همانطور که از نامش پیداست، هدف سیستم ZLD حذف تخلیه مایع است، به این معنی که هیچ پسابی در محیط زیست رها نمی‌شود [٤]. این امر با بازیافت کل آب فاضلاب و به حداقل رساندن حجم لجن یا آب نمک تولید شده حاصل می‌شود [٥]. این معمولاً مانند پیش تصفیه عمل می‌کند، فاضلاب تحت تصفیه اولیه برای حذف جامدات بزرگ، روغن، گریس و سایر آلاینده‌ها قرار می‌گیرد [٦]. این مرحله ممکن است شامل فرآیندهایی مانند غربالگری، ته‌نشینی یا فیلتراسیون باشد. پس از پیش‌تصفیه، فاضلاب وارد مرحله تصفیه اولیه می‌شود که در آن جامدات معلق و مواد آلی از طریق فرآیندهایی مانند رسوب‌گذاری، شناورسازی یا تصفیه بیولوژیکی (مانند فرآیند لجن فعال) بیشتر حذف می‌شوند [۷]. تصفیه ثانویه شامل روش‌های پیشرفته تصفیه مانند فیلتراسیون غشایی (اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس) یا تبخیر برای حذف آلاینده‌های محلول و تولید پساب با کیفیت بالاتر است [۸]. فاضلاب تصفیه شده تحت فرآیندهای تغلیظ قرار می‌گیرد تا حجم زباله مایع بیشتر کاهش یابد [۹]. این می‌تواند شامل فرآیندهایی مانند اسمز معکوس باشد، که در آن آب از طریق یک غشای نیمه‌تراوا مجبور به جدا شدن از نمک‌های محلول و آلاینده‌ها می‌شود. در برخی موارد، فاضلاب غلیظ شده برای جدا کردن نمک‌های محلول و سایر جامدات از آب باقیمانده، کریستالی می‌شود [۱۰]. این مرحله یک جریان زباله جامد تولید می‌کند و حجم زباله مایع را بیشتر کاهش می‌دهد. از تکنیک‌های تبخیر مانند فشرده‌سازی بخار حرارتی یا مکانیکی برای تبخیر آب باقیمانده از آب نمک غلیظ استفاده می‌شود و نمک‌های جامد یا سایر باقیمانده‌ها باقی می‌مانند [۱۱]. پسماندهای جامد تولید شده از فرآیندهای تغلیظ و تبلور، اغلب از طریق دفن زباله یا در صورت امکان استفاده مجدد، جمع‌آوری و به طور مناسب دفع می‌شوند [۱۲]. با اجرای یک سیستم ZLD، صنایع می‌توانند به طور قابل توجهی ردپای آب خود را کاهش دهند، آلودگی محیط زیست را به حداقل برسانند و مقررات سختگیرانه تخلیه فاضلاب را رعایت کنند [۱۳]. هرچند نصب و راه‌اندازی سیستم‌های ZLD می‌تواند پیچیده و پرهزینه باشد و برای اطمینان از عملکرد کارآمد و بهینه، به فناوری‌های پیشرفته و مدیریت دقیق نیاز دارند [۱٤].

۲-۱ آشنایی با تخلیه مایع صفر

تخلیه مایع صفر (ZLD) یک فرآیند تصفیه فاضلاب پیشرفته است که برای حذف تخلیه پساب مایع از منابع صنعتی یا شهری طراحی شده است [۱۵]. اصل بنیادی ZLD بهبود و بازیافت تمام آب از جریان‌های فاضلاب و در عین حال کمینه سازی یا حذف کامل تولید زباله یا تخلیه مایع است [۱۶]. این رویکرد با اصول مدیریت پایدار آب از طریق حفظ منابع آب، کاهش آلودگی و ترویج استفاده مجدد از آب تصفیه شده همراستا می‌باشد [۱۷].

۱-۲-۱ اصول کلیدی ZLD

این اصول کلیدی راهنمای طراحی، بهره‌برداری و مدیریت سیستم‌های ZLD می‌باشد و صنایع را قادر می‌سازند تا به تصفیه فاضلاب مؤثر، بازیابی منابع و نظارت بر محیط زیست دست یابند.

۱) **بیشینه سازی بازیافت آب**: ZLD با هدف بازیابی هرچه بیشتر آب از جریان‌های فاضلاب از طریق فناوری‌های پیشرفته تصفیه، به حداقل رساندن هدررفت آب و حفظ منابع آب شیرین [۱] عمل می‌کند.

۲) **کمینه سازی تخلیه مایع**: تولید زباله یا تخلیه مایع در سیستم‌های ZLD با تغلیظ اجزای فاضلاب به اشکال جامد یا آب نمک کمینه می‌شود و از عدم تخلیه پساب مایع به محیط زیست اطمینان حاصل می‌شود.

۳) **بازیابی منابع**: فراتر از بازیابی آب، ZLD بر استخراج و استفاده مجدد از منابع ارزشمند موجود در جریان‌های فاضلاب تأکید دارد و مفهوم اقتصاد چرخشی را ترویج می‌کند و ردپای زیست‌محیطی فرآیندهای صنعتی را کاهش می‌دهد.

٤) **تلفیق فناوری‌های پیشرفته تصفیه**: سیستم‌های ZLD فناوری‌های پیشرفته تصفیه مانند فیلتراسیون غشایی، تبخیر، تبلور و تبادل یونی را برای دستیابی به سطوح بازیابی و خلوص مطلوب آب به طور مؤثر با هم تلفیق می‌کنند.

٥) **بهینه‌سازی جامع فرآیند**: اجرای موفقیت‌آمیز ZLD نیازمند بهینه‌سازی دقیق پارامترهای تصفیه، مصرف انرژی، دوز مواد شیمیایی و طراحی سیستم برای اطمینان از عملکرد کارآمد و توجیه اقتصادی است.

٦) **انطباق و پایداری زیست محیطی**: سیستم‌های ZLD نقش مهمی در تضمین انطباق با مقررات زیست‌محیطی حاکم بر تخلیه فاضلاب دارند و در عین حال به پایداری محیط زیست و اهداف مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها کمک می‌کنند.

۱-۲-۲ اجزای کلیدی سیستم‌های تخلیه مایع صفر (ZLD)

اجزای کلیدی سیستم‌های تخلیه مایع صفر عبارتند از:

۱. سیستم‌های پیش‌تصفیه: تصفیه اولیه برای حذف جامدات بزرگ، روغن، گریس و آلاینده‌های درشت.

۲. واحدهای تصفیه اولیه: حذف بیشتر جامدات معلق، مواد آلی و آلاینده‌ها از فاضلاب پیش‌تصفیه شده با استفاده از روش‌های رسوب‌گذاری، شناورسازی یا بیولوژیکی [۱۶].

۳. فناوری‌های پیشرفته تصفیه: اجزای اصلی برای حذف آلاینده‌های محلول و تولید پساب با کیفیت بالا، از جمله فیلتراسیون غشایی (RO، NF، UF)، تبخیر (MEE، MVC)، تبلور و تبادل یونی.

٤. سیستم‌های مدیریت آب نمک: مدیریت و تصفیه آب نمک غلیظ یا زباله‌های جامد تولید شده از فرآیندهای تصفیه، از جمله گزینه‌های تغلیظ، جداسازی جامد-مایع و دفع/استفاده مجدد.

٥. سیستم‌های بازیافت و استفاده مجدد آب: تسهیل استفاده مجدد از آب تصفیه شده برای فرآیندهای صنعتی یا کاربردهای غیر آشامیدنی از طریق تصفیه‌های اضافی، سیستم‌های توزیع و ذخیره‌سازی.

٦. سیستم‌های نظارت و کنترل: نظارت مداوم بر پارامترهای کلیدی و فناوری‌های اتوماسیون برای جمع‌آوری داده‌های زمان واقعی، بهینه‌سازی فرآیند و بهره‌برداری از راه دور تأسیسات ZLD.

۱-۲-۳ مقایسه ZLD با روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب

ZLD با حذف تخلیه مایع، بیشینه سازی بازیابی آب و کمینه سازی تاثیر بر محیط زیست در مقایسه با روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب، رویکرد پایدارتری را برای تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهد [۲]. هدف از سیستم‌های ZLD حذف کامل تخلیه مایع است، در حالی که روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب معمولاً شامل تخلیه پساب تصفیه شده به آب‌های پذیرنده یا سیستم‌های فاضلاب شهری است [۱۸]. سیستم‌های ZLD بیشینه بازیابی آب را در اولویت قرار می‌دهند و فاضلاب را برای تولید آب با کیفیت بالا و مناسب برای استفاده مجدد تصفیه می‌کنند، در حالی که روش‌های مرسوم در درجه اول بر حذف آلاینده‌ها بدون بازیابی قابل توجه آب تمرکز دارند [۱۹]. ZLD از فناوری‌های پیشرفته تصفیه مانند فیلتراسیون غشایی، تبخیر و تبلور استفاده می‌کند که منجر به راندمان بالاتر تصفیه و حذف آلاینده‌های محلول در مقایسه با روش‌های مرسوم می‌شود [۲۰]. سیستم‌های ZLD با تغلیظ اجزای فاضلاب به اشکال جامد یا آب نمک، تخلیه مایع را به حداقل می‌رسانند و حجم زباله‌های مایع تولید شده را کاهش می‌دهند، در حالی

که روش‌های مرسوم ممکن است حجم قابل توجهی از پساب مایع تولید کنند که نیاز به تصفیه یا دفع بیشتر دارد [۲۱]. ZLD با حذف تخلیه پساب مایع و به حداقل رساندن مصرف آب، اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تخلیه فاضلاب را کاهش می‌دهد، در حالی که روش‌های مرسوم ممکن است به آلودگی آب‌ها و کاهش منابع آب شیرین کمک کنند [۲۲]. سیستم‌های ZLD به صنایع کمک می‌کنند تا با مقررات سختگیرانه زیست‌محیطی حاکم بر تخلیه فاضلاب، به ویژه در مناطق کم آب، هماهنگ باشند، در حالی که روش‌های مرسوم ممکن است در رعایت محدودیت‌های تخلیه فزاینده با چالش‌هایی روبرو شوند [۲۳].

۱-۳ اهمیت ZLD در مدیریت پایدار آب

ZLD با بیشینه کردن بازیابی آب، کمینه سازی آلودگی، ارتقاء بهره‌وری منابع و افزایش پایداری صنعتی، نقش مهمی در پیشبرد مدیریت پایدار آب ایفا می‌کند و در نتیجه به تاب‌آوری و پایداری بلندمدت منابع آب و اکوسیستم‌ها کمک می‌کند [۳].

ZLD با بیشینه کردن بازیابی آب از جریان‌های فاضلاب، کاهش وابستگی به منابع آب شیرین و حفظ منابع ارزشمند آب برای سایر مصارف، نقش مهمی در مقابله با کمبود آب دارد [٤]. سیستم‌های ZLD با حذف تخلیه پساب مایع، آلودگی آب‌ها و اکوسیستم‌ها را به حداقل می‌رسانند، از زیستگاه‌های آبزی محافظت می‌کنند و سلامت عمومی را از اثرات مضر آب آلوده محافظت می‌کنند [۲٤]. ZLD با بازیابی منابع ارزشمند مانند آب، مواد مغذی و انرژی از جریان‌های فاضلاب، اصول اقتصاد چرخشی را تقویت می‌کند و در نتیجه وابستگی به منابع محدود را کاهش داده و تولید زباله را به حداقل می‌رساند. اجرای سیستم‌های ZLD با کاهش مصرف آب، کمینه کردن اثرات زیست محیطی و تضمین انطباق با الزامات نظارتی، پایداری عملیات صنعتی را افزایش می‌دهد و در نتیجه مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها (CSR)[1] و اعتبار را بهبود می‌بخشد. ZLD یک راه حل مناسب برای صنایعی که در مناطق کم آب یا با چالش‌های کمبود آب فعالیت می‌کنند، ارائه می‌دهد و آنها را قادر می‌سازد تا عملیات خود را حفظ کنند و در عین حال ردپای آب و ردپای زیست‌محیطی خود را به حداقل برسانند [۲۵]. سیستم‌های ZLD استفاده مجدد و بازیافت فاضلاب تصفیه شده را برای فرآیندهای مختلف صنعتی یا کاربردهای غیرآشامیدنی تسهیل می‌کنند، منابع آب شیرین را حفظ کرده و نیاز به مصرف آب شیرین را کاهش می‌دهند و در نتیجه به شیوه‌های مدیریت پایدار آب کمک می‌کنند [۲٦].

[1] Corporate Social Responsibility

۱-۴ پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ZLD

پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ZLD منجر به توسعه راه‌حل‌های کارآمدتر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و پایدارتر برای تصفیه فاضلاب شده است و صنایع را قادر می‌سازد تا به نرخ بازیابی آب بالاتری دست یابند، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند و الزامات نظارتی را به طور مؤثر رعایت کنند.

(۱) **فناوری‌های فیلتراسیون غشایی**[۱]: فناوری‌های پیشرفته فیلتراسیون غشایی مانند اسمز معکوس (RO)[۲]، نانوفیلتراسیون (NF)[۳] و اولترافیلتراسیون (UF)[۴] برای دستیابی به راندمان بالاتر در حذف آلاینده‌های محلول از فاضلاب و در نتیجه بهبود نرخ بازیابی و کیفیت آب، بهینه شده‌اند.

(۲) **فرآیندهای تبخیر و تبلور**[۵]: نوآوری‌های فرآیندهای تبخیر و تبلور منجر به توسعه سیستم‌های با بهره‌وری انرژی بیشتر، مانند تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای (MEE)[۶] و فشرده‌سازی مکانیکی بخار (MVC)[۷] شده است که هزینه‌های عملیاتی و اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد و در عین حال نرخ بالای بازیابی آب را حفظ می‌کند.

(۳) **تلفیق روش‌های پیشرفته تصفیه**[۸]: سیستم‌های ZLD به طور فزاینده‌ای چندین روش پیشرفته تصفیه، از جمله فیلتراسیون غشایی، تبخیر، تبلور و تبادل یونی را به صورت هم‌افزایی ادغام می‌کنند تا راندمان تصفیه را بهینه کرده و به سطوح بازیابی و خلوص آب مورد نظر دست یابند.

(۴) **راهکارهای هزینه-اثربخش با بهره‌وری انرژی**[۹]: پیشرفت‌های فناوری بر توسعه راهکارهای ZLD مقرون‌به‌صرفه و کم‌مصرف با بهینه‌سازی طراحی فرآیند، افزایش راندمان انتقال حرارت و جرم و استفاده از مواد نوآورانه و راهکارهای مهندسی برای کمینه کردن مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی متمرکز شده‌اند.

(۵) **سیستم‌های اتوماسیون و کنترل**[۱۰]: پیاده‌سازی سیستم‌های اتوماسیون و کنترل پیشرفته، امکان نظارت، بهینه‌سازی و بهره‌برداری از راه دور در تأسیسات ZLD را در زمان واقعی فراهم می‌کند و ضمن کاهش نیاز به مداخله دستی و به حداقل رساندن خطای انسانی، کارایی عملیاتی را نیز بهبود می‌بخشد.

---

[1] Membrane Filtration Technologies
[2] Reverse Osmosis
[3] Nanofiltration
[4] Ultrafiltration
[5] Evaporation and Crystallization Processes
[6] Multiple-Effect Evaporators
[7] Mechanical Vapor Compression
[8] Integration of Advanced Treatment Methods
[9] Cost-effective and Energy-efficient Solutions
[10] Automation and Control Systems

۱-۵ مطالعات موردی و دیدگاه‌های جهانی

- ☑ صنعت نساجی در هند: اجرای ZLD در کارخانه‌های نساجی هند، اثربخشی این رویکرد را در پرداختن به چالش‌های کمبود آب و آلودگی نشان می‌دهد. با تلفیق فناوری‌های فیلتراسیون غشایی، تبخیر و تبلور، این کارخانه‌ها به نرخ بالای بازیابی آب دست یافته و تخلیه مایع را حذف می‌کنند و به مدیریت پایدار آب در یک صنعت آب‌بر کمک می‌کنند.
- ☑ پالایشگاه نفت در خاورمیانه: پالایشگاه‌های نفت در مناطق کم‌آب خاورمیانه، ZLD را برای کاهش مصرف آب شیرین و رعایت مقررات زیست‌محیطی اتخاذ کرده‌اند [۹]. سیستم‌های ZLD، با استفاده از تبخیرکننده‌ها و تبلورکننده‌های چند مرحله‌ای، این پالایشگاه‌ها را قادر می‌سازند تا آب و نمک‌های جامد را از فاضلاب بازیابی کنند، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند و پایداری عملیاتی را افزایش دهند [۱۳].
- ☑ کارخانه تولید مواد شیمیایی در ایالات متحده: اجرای ZLD در یک کارخانه تولید مواد شیمیایی در ایالات متحده، مزایای بازیابی کامل آب و حذف تخلیه مایع را نشان می‌دهد [۲۷]. با به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته تصفیه مانند اسمز معکوس، تبادل یونی و تبخیر، این کارخانه مصرف آب را کاهش داده، هزینه‌های دفع فاضلاب را پایین می‌آورد و نظارت بر محیط زیست را بهبود می‌بخشد.
- ☑ تصفیه فاضلاب شهری در اروپا: شهرداری‌های سراسر اروپا اصول ZLD را در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای ترویج استفاده مجدد از آب و کاهش آلودگی محیط زیست اتخاذ کرده‌اند [۷]. سیستم‌های ZLD در این کارخانه‌ها از فیلتراسیون غشایی، اکسیداسیون پیشرفته و ضدعفونی برای تولید پساب با کیفیت بالا و مناسب برای استفاده مجدد غیر آشامیدنی استفاده می‌کنند و به شیوه‌های پایدار مدیریت آب و حفاظت از آب کمک می‌کنند.
- ☑ صنعت معدن در استرالیا: اجرای ZLD در صنعت معدن در استرالیا، چالش‌های مدیریت آب در مناطق دورافتاده را برطرف می‌کند و رعایت مقررات سختگیرانه زیست‌محیطی را تضمین می‌کند.

با تلفیق فناوری‌های فیلتراسیون غشایی، تبخیر و تبلور، شرکت‌های معدن‌کاری آب و مواد معدنی را از فاضلاب بازیابی می‌کنند، اثرات زیست‌محیطی را کمینه و از مدیریت پایدار منابع حمایت می‌کنند.

۱-۶ چشم‌انداز و چالش‌های آینده

تخلیه صفر مایع راه‌حل‌های امیدوارکننده‌ای برای کمبود آب، آلودگی و چالش‌های پایداری ارائه می‌دهد و به مسائلی مانند هزینه، انرژی، پیچیدگی فنی و موانع نظارتی که برای تحقق پتانسیل کامل آن و پیشبرد شیوه‌های مدیریت پایدار آب در سطح جهان حیاتی هستند، می‌پردازد [۲۶]. همکاری بین صنعت، دولت و دانشگاه، کلید غلبه بر این چالش‌ها و پیشبرد پذیرش گسترده ZLD در آینده خواهد بود [۵].

۱-۶-۱ چشم‌انداز آینده

- ☑ آینده‌ی ZLD شاهد پیشرفت‌های مداوم فناوری با هدف افزایش راندمان تصفیه، کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی خواهد بود [۲۸]. نوآوری در مواد غشایی، تکنیک‌های تبخیر و بهینه‌سازی فرآیند، پیشرفت‌های بیشتری را در سیستم‌های ZLD به همراه خواهد داشت.
- ☑ انتظار می‌رود که اتخاذ ZLD در طیف وسیع‌تری از صنایع و فراتر از بخش‌های سنتی مانند پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های شیمیایی گسترش یابد [۱۲]. صنایعی مانند معدن، مواد غذایی و آشامیدنی و داروسازی به طور فزاینده‌ای ZLD را برای رفع و رجوع کمبود آب، رعایت مقررات و اهداف پایداری در پیش خواهند گرفت.
- ☑ تلفیق سیستم‌های ZLD با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، پایداری را افزایش داده و ردپای کربن را کاهش می‌دهد. سیستم‌های ZLD مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر، انعطاف‌پذیری و استقلال بیشتری از سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهند و به نظارت بر محیط زیست کمک می‌کنند.
- ☑ چارچوب‌های نظارتی که حفاظت از آب، جلوگیری از آلودگی و بازیابی منابع را ترویج می‌کنند، باعث پذیرش ZLD در سراسر جهان خواهند شد [۹]. دولت‌ها احتمالاً از طریق یارانه‌ها، مشوق‌های مالیاتی و مکانیسم‌های انطباق با مقررات، اجرای ZLD را برای تشویق شیوه‌های مدیریت پایدار آب تشویق می‌کنند.
- ☑ بازارهای نوظهور و مناطقی که با چالش‌های کمبود آب مواجه هستند، به نقاط کانونی برای پذیرش ZLD تبدیل خواهند شد. کشورهای خاورمیانه، آسیا و آفریقا با بخش‌های صنعتی رو به رشد و منابع آب محدود، به طور فزاینده‌ای در ZLD سرمایه‌گذاری خواهند کرد تا تأمین آب را تضمین کنند، از رشد اقتصادی حمایت کنند و به اهداف پایداری دست یابند.

۲-۶-۱ چالش‌ها

- ☑ هزینه‌های بالای سرمایه‌ای و عملیاتی مرتبط با اجرای ZLD همچنان یک چالش مهم برای صنایع، به ویژه شرکت‌های کوچک و متوسط (SME)[1] است. غلبه بر موانع هزینه از طریق نوآوری در فناوری، مکانیسم‌های تأمین مالی و صرفه‌جویی به مقیاس برای ترویج پذیرش گسترده‌تر ZLD ضروری خواهد بود.
- ☑ سیستم‌های ZLD اغلب به انرژی ورودی قابل توجهی نیاز دارند، در درجه اول برای فرآیندهای تبخیر و غشایی. ایجاد تعادل بین ماهیت انرژی‌بر ZLD با اقدامات بهره‌وری انرژی، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی فرآیند برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی و بهبود پایداری اقتصادی بسیار مهم خواهد بود.
- ☑ مدیریت مؤثر جریان‌های غلیظ آب نمک تولید شده توسط سیستم‌های ZLD چالش‌هایی را از نظر دفع، تأثیر زیست‌محیطی و رعایت مقررات ایجاد می‌کند. توسعه روش‌های پایدار دفع آب نمک، مانند استفاده مجدد مفید، تزریق به چاه عمیق یا تبلور آب نمک، برای رفع چالش‌های مدیریت آب نمک بسیار مهم خواهد بود.
- ☑ سیستم‌های ZLD ذاتاً پیچیده هستند و نیاز به تخصص در رشته‌های مختلف، از جمله شیمی، مهندسی و علوم محیطی دارند. غلبه بر موانع فنی از طریق تحقیق، توسعه و اشتراک دانش برای اطمینان از طراحی، بهره‌برداری و نگهداری موفقیت‌آمیز تأسیسات ZLD ضروری خواهد بود.
- ☑ تطبیق سیستم‌های ZLD با الزامات نظارتی و فرآیندهای صدور مجوز در حال تحول، چالش‌هایی را برای صنایع فعال در حوزه‌های قضایی مختلف ایجاد می‌کند. همکاری نزدیک بین تنظیم‌کنندگان، ذینفعان صنعت و ارائه‌دهندگان فناوری برای تدوین مقررات عملی که پذیرش ZLD را ترویج می‌دهد و در عین حال حفاظت از محیط زیست و سلامت عمومی را تضمین می‌کند، ضروری خواهد بود.

۱-۷ نتیجه‌گیری

تخلیه صفر مایع نمایانگر یک تغییر الگو در مدیریت فاضلاب به سمت پایداری و حفاظت از منابع است. با حذف تخلیه مایع و بازیابی منابع ارزشمند از فاضلاب، ZLD یک راه‌حل جامع برای مقابله با

[1] Small and Medium-Sized Enterprises

کمبود آب و چالش‌های آلودگی ارائه می‌دهد. هرچند تلاش‌های هماهنگ دولت‌ها، صنایع و ذینفعان برای غلبه بر موانع و تحقق پتانسیل کامل ZLD در مقیاس جهانی ضروری است.

منابع فصل

1. M. Date, V. Patyal, D. Jaspal, A. Malviya, K. Khare, Zero liquid discharge technology for recovery, reuse, and reclamation of wastewater: a critical review. J. Water Process Eng. **49**, 103129 (2022).
2. A. Panagopoulos, Energetic, economic and environmental assessment of zero liquid discharge (ZLD) brackish water and seawater desalination systems. Energy Convers. Manage. **235**, 113957 (2021)
3. T. Tong, M. Elimelech, The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. Environ. Sci. Technol. **50**(13), 6846–6855 (2016)
4. J.H. Tsai, F. Macedonio, E. Drioli, L. Giorno, C.Y. Chou, F.C. Hu, C.L. Li, C.J. Chuang, K.L. Tung, Membrane-based zero liquid discharge: myth or reality? J. Taiwan Inst. Chem. Eng. **80**, 192–202 (2017)
5. R. Xiong, C. Wei, Current status and technology trends of zero liquid discharge at coal chemical industry in China. J. Water Process Eng. **19**, 346–351 (2017)
6. S.B. Grant et al., Taking the 'waste' out of 'wastewater' for human water security and ecosystem sustainability. Science **337**(6095), 681–686 (2012). https://doi.org/10.1126/science.1216852
7. M. Yaqub, W. Lee, Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: a review. Sci. Total Environ. **681**, 551–563 (2019). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv. 2019.05.062
8. P.N. Cheremisinoff, in *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*, 1st edn. (Routledge, 2019). https://doi.org/10.1201/9780203752494
9. J.-H. Tsai et al., Membrane-based zero liquid discharge: myth or reality? J. Taiwan Inst. Chem. Eng. **80**, 192–202 (2017). https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.06.050
10. M. Elimelech, W.A. Phillip, The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. Science **333**(6043), 712–717 (2011). https://doi.org/10.1126/science.1200488
11. R. Bond, S. (Vasu) Veerapaneni, Zeroing in on ZLD technologies for inland desalination. J. AWWA **100**(9), 76–89 (2008). https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09722.x
12. J. Ramasamy, M.K. Al-Arfaj, S.C. Ayirala, S.H. Saleh, Sustainability in drilling operations using zero liquid discharge wastewater, in *Day 3 Wed, October 04, 2023* (SPE, Abu Dhabi, UAE, October 2023), p. D031S081R002. https://doi.org/10.2118/216591-MS
13. S. Abdelkader, A. Boubakri, S.U. Geissen, L. Bousselmi, Direct contact membrane distillation applied to saline wastewater: parameter optimization. Water Sci. Technol. **77**(12), 2823–2833 (2018). https://doi.org/10.2166/wst.2018.274
14. D.J. Barrington, G. Ho, Towards zero liquid discharge: the use of water auditing to identify water conservation measures. J. Clean. Prod. **66**, 571–576 (2014). https://doi.org/10.1016/j.jcl epro.2013.11.065
15. P. Shetty, S. Sophia, V. Shetty Kodialbail, Zero liquid discharge technology strategies in Indian distilleries and pharmaceutical industries—a paradigm shift toward sustainability, in *Concept of Zero Liquid Discharge* (Elsevier, 2023), pp. 347–372. https://doi.org/10.1016/B978-0-323- 91745-2.00005-X
16. F. Macedonio, E. Drioli, Zero liquid discharge in desalination, in *Sustainable Membrane Tech- nology for Water and Wastewater Treatment*, ed. by A. Figoli, A. Criscuoli (Springer Singapore, Singapore, 2017), pp. 221–241. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5623-9_8
17. S. Salvador Cob, Towards zero liquid discharge in drinking water production (Delft University of Technology, 2014). https://doi.org/10.4233/UUID:1A347058-8F9B-4A67-AB2B-120A5B C969B7
18. N.N. Rao, S.N. Rao, Zero liquid discharge: water recycling in industries towards sustainability, in *Sustainable Engineering, Energy, and the Environment*, 1st edn. (Apple Academic Press, Boca Raton, 2022), pp. 281–305. https://doi.org/10.1201/9781003277484-24
19. R. Wang, S. Lin, Thermodynamics and energy efficiency of zero liquid discharge. ACS EST Eng. **2**(8), 1491–1503 (2022). https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00013
20. H.-F. Xiao et al., Zero liquid discharge hybrid membrane process for separation and recovery of ions with equivalent and similar molecular weights. Desalination **482**, 114387 (2020). https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114387
21. A.I. Safia, A. Salima, B. Ibrahim, Zero liquid discharge management: optimizing sustainable reverse osmosis desalination practices. Stud. Eng. Exact Sci. **5**(2), e5930 (2024). https://doi.org/10.54021/seesv5n2-040
22. J. Buljan, K.V. Emmanuel, M. Bosnić, I. Král', Assessment of performance of zero liquid discharge (ZLD) operations in some tannery clusters, Vellore districts, Tamil Nadu, India
23. R. Xiong, C. Wei, Current status and technology trends of zero liquid discharge at coal chemical industry in China. J. Water Process Eng. **19**, 346–351 (2017). https://doi.org/10.1016/j.jwpe. 2017.09.005