سلسله گزارش های

اکوتک eco tech

اتاق بازرگانی یزد

شماره دوم

موضوع این شماره:

فناوری تخلیه مایع صفر (ZLD)

برای مدیریت پایدار آب و تاب‌آوری زیست‌محیطی

اکوتک مجموعه‌ای است که به بررسی و معرفی نوآوری ها، اختراعات، فناوری‌ها و راهکارهای نوین می‌پردازد؛ راهکارها و ایده‌هایی که می‌توانند به بهبود عملکرد اقتصادی، ارتقای کیفیت زندگی، ایجاد تحولات صنعتی و تقویت مسیر توسعه استان یزد کمک کنند و می‌توانند ایده‌ای برای گفتمان و شروع پروژه‌های امکان‌سنجی و قابل اجرا باشند.

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce
Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

مسئله چیست؟

امروزه کمبود آب از یک دغدغه صرفاً زیست‌محیطی فراتر رفته و به‌عنوان چالشی فوری و چندبُعدی مطرح شده است که امنیت اقتصادی، پایداری اکوسیستم‌ها و رفاه جوامع انسانی را تهدید می‌کند. رشد اقتصادی و توسعه صنعتی، در کنار تشدید پیامدهای تغییرات اقلیمی، تقاضا برای منابع آبی را به طور قابل‌توجهی افزایش داده است.

در این میان، بخش صنعت نیز همانند سایر بخش‌ها سهم چشمگیری از مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد و در مقابل، پساب‌هایی تولید می‌کند که رهاسازی کنترل‌نشده یا تصفیه ناکافی آن‌ها سلامت عمومی و تنوع زیستی را با مخاطره مواجه می‌سازد. تداوم این چرخه معیوب مصرف بالا و آلودگی فزاینده نشان داده است که رویکردهای سنتی تصفیه فاضلاب دیگر پاسخگوی شرایط موجود نیستند؛ ازاین‌رو، حرکت به سمت فناوری‌هایی با هدف قطع کامل جریان آلاینده‌ها و بازگرداندن آب به چرخه تولید، به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

با وجود اینکه این چالش در مقیاس جهانی مطرح است، اما در فلات مرکزی ایران و به‌ویژه استان یزد، جلوه‌ای به‌مراتب حادتر و بحرانی‌تر دارد. شواهد اقلیمی و هیدرولوژیکی استان، عمق ناترازی میان منابع و مصارف آب را آشکار می‌سازند؛ به‌گونه‌ای که بررسی داده‌های سال‌های مختلف، نوسانات شدید و ناپایداری الگوی بارش را تأیید می‌کند.

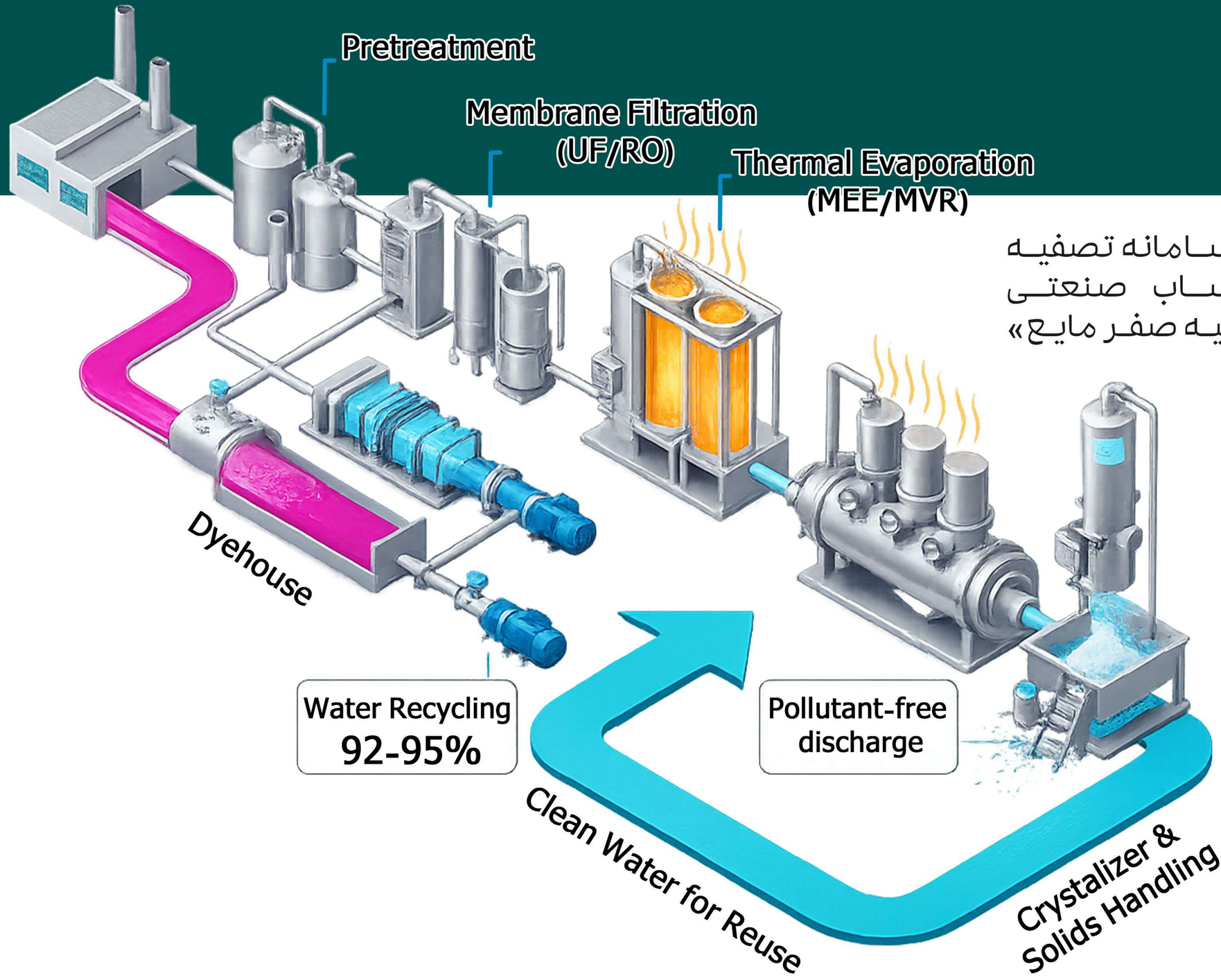
با این حال، مسئله اساسی آن است که استان یزد، با ساختار اقتصادی متکی بر صنایع معدنی و تولیدی، در اقلیمی قرار گرفته که بارندگی آن کم بوده و منابع آب زیرزمینی آن تحت فشار شدید ناشی از آب قرار دارند. تداوم شیوه‌های کنونی مدیریت پساب، به معنای هدررفت منابع محدود آبی و تشدید بحران موجود خواهد بود.

بر این اساس، مسئله کلیدی آن است که چگونه می‌توان تداوم حیات صنعتی و حفظ مسیر توسعه اقتصادی استان یزد را در شرایطی تضمین کرد که منابع آب متعارف دیگر پاسخگوی نیازها نیستند، و چه فناوری‌هایی قادرند پاسخی مؤثر و پایدار به این چالش ارائه دهند. در این شماره، به معرفی و بررسی یکی از این فناوری‌ها می‌پردازیم؛ فناوری‌ای که می‌تواند برای متخصصان و تصمیم‌گیران حوزه صنعت و آب، قابل بررسی باشد.

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

فناوری تخلیه مایع صفر (ZLD)
Zero Liquid Discharge

فناوری تخلیه مایع صفر (ZLD) به‌عنوان یکی از رویکردها، در مدیریت فاضلاب صنعتی شناخته می‌شود. این فناوری با مهندسی دقیق و هدفمند، به‌منظور حذف کامل تخلیه مایعات به محیط زیست طراحی شده است. در سیستمZLD، پساب‌های صنعتی تحت یک فرآیند تصفیه جامع قرار می‌گیرند که طی آن حداکثر میزان آب قابل بازیافت استخراج شده و در نهایت مقدار محدودی پسماند جامد و آب‌نمک با غلظت بسیار بالا باقی می‌ماند. اساس عملکرد این فناوری بر دستیابی به بازیافت تقریباً کامل آب استوار بوده و همین امر منجر به صرفه‌جویی چشمگیر در منابع آبی و ایجاد مزایای قابل‌توجه زیست محیطی می‌شود.



شماتیک یک سامانه تصفیه و بازیافت پساب صنعتی با رویکرد «تخلیه صفر مایع»

نکته محوری در اجرای این سیستم، ضرورت اعمال کنترل‌های دقیق درون‌کارخانه‌ای است؛ کنترل‌هایی که با هدف به حداقل رساندن آلودگی و کاهش میزان ضایعات در طول فرآیند تولید اعمال می‌شوند. این الزامات، زمینه را برای به‌کارگیری روش‌های متداول تصفیه فاضلاب (شامل فرآیندهای فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی) فراهم می‌کنند. این مراحل به‌عنوان تصفیه مقدماتی عمل کرده و پیش از ورود جریان فاضلاب به زیرساخت‌های اصلی این سیستم اجرا می‌شوند.

اتاق بازرگانی صنایع معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce
Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

ادغام این سیستم، مستلزم به‌کارگیری مجموعه‌ای از فناوری‌های پیشرفته تصفیه است؛ از جمله اسمز معکوس، تبخیرکننده‌ها، کریستالایزرها و تکنیک‌های پیشرفته فیلتراسیون که آلاینده‌ها و ناخالصی‌ها را به‌طور مؤثر از فاضلاب جدا می‌کنند.

روش‌های سنتی تصفیه و دفع فاضلاب اغلب با مصرف بالای انرژی همراه هستند و سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. اتخاذ این سیستم به صنایع امکان می‌دهد تا پروتکل‌های تصفیه آب را بهینه‌سازی کرده و مصرف انرژی را کاهش دهند. به‌ویژه، استفاده از فناوری‌های نوآورانه کم‌مصرف مانند فیلتراسیون غشایی و تبخیرکننده ها، مسیری برای کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی فراهم می‌کند. افزون بر این، بهره‌گیری هدفمند از گرمای اتلاف شده در فرآیندهای صنعتی به‌عنوان منبع انرژی برای مراحل تبخیر و تغلیظ در سیستم ZLD عمل کرده و نیاز انرژی و بار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد.

۵ نیروهای محرکه چندوجهی که موجب ادغام گسترده سیستم‌های ZLD می‌شوند، عبارتند از:

۱ چشم‌انداز نظارتی سختگیرانه

اعمال فزاینده مقررات سختگیرانه در مورد دفع فاضلاب توسط مقامات دولتی، صنایع را ملزم به اصلاح پروتکل‌های تصفیه فاضلاب می‌کند.

۲ تشدید کمبود آب

با افزایش خشکی جهانی و رقابت برای ذخایر محدود آب، نیاز به حفاظت از آب و مدیریت خردمندانه آن بیش از پیش احساس می‌شود.

۳ مسئولیت زیست‌محیطی

تغییر رویکرد به سمت شیوه‌های پایدار زیست‌محیطی در صنایع فراگیر شده است. سیستم‌های ZLD با کاهش مصرف آب و کاهش آلودگی، تجسمی از این اخلاق هستند.

۴ بازیابی منابع

سیستم‌های ZLD امکان استخراج و استفاده مجدد از اجزای ارزشمند مانند مواد معدنی، فلزات و ترکیبات آلی از فاضلاب را فراهم می‌کنند.

۵ ملاحظات اقتصادی

اگرچه سیستم‌های ZLD نیاز به تعهد مالی اولیه دارند، اثرات پایدار آن‌ها منجر به بهره‌وری عملیاتی و کاهش هزینه‌های بلندمدت می‌شود.

۶ کاهش ریسک و انطباق

تخلیه فاضلاب تصفیه‌نشده خطرات جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست دارد. سیستم های ZLD با حذف تخلیه، این خطرات و پیامدهای قانونی آن را کاهش می‌دهند.

۷ پیشرفت‌های فناوری

نوآوری‌های مداوم در تبخیرکننده‌ها، کریستالایزرها و سیستم‌های فیلتراسیون غشایی، کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن ZLD را افزایش داده اند.

اتاق بازرگانی صنایع معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

مراحل اصلی
فرایند فناوری تخلیه مایع صفر (ZLD)

همه سیستم‌های ZLD از ترکیبی از این مراحل استفاده می‌کنند:

پیش‌تصفیه

به معنای حذف ذرات معلق، چربی و روغن، مواد آلی بزرگ که با روش‌های ته‌نشینی، فلوتاسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون انجام می‌شود.

تغلیظ اولیه

مهم‌ترین بخش بازیافت آب و به مرحله‌ای حیاتی گفته می‌شود که هدف آن کاهش حجم فاضلاب یا محلول با افزایش غلظت املاح و مواد جامد محلول در آن است. در این مرحله آب از محلول جدا می‌شود و آلاینده‌ها را در حجمی بسیار کمتر متمرکز می‌سازد. با این کار، حجم آبی که باید در مراحل پرهزینه و انرژی‌بر بعدی (مانند تبخیر) پردازش شود به شدت کاهش می‌یابد و محلول برای مرحله نهایی تبلور آماده می‌شود. این مرحله با روش‌های اسمز معکوس یا نانوفیلتراسیون یا الکترودیالیز انجام می‌شود. در اینجا حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد آب به صورت آب تقریبا خالص جدا می‌شود و می‌تواند دوباره در فرآیند استفاده شود. باقی‌مانده تغلیظ، پساب غلیظ (شور و آلوده) است.

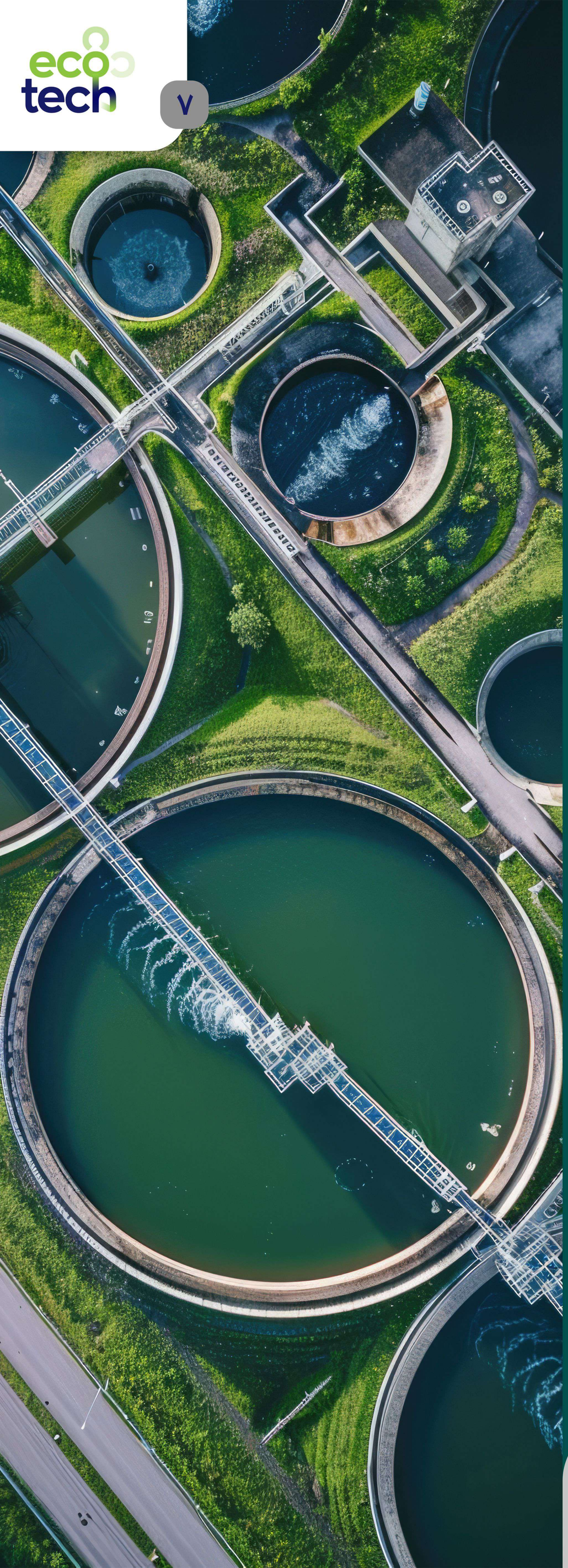
تغلیظ ثانویه/تبخیر

در این مرحله، تبخیر دقیق و کنترل‌شده آب باقیمانده از کنسانتره انجام می‌شود تا جایی که املاح محلول دیگر قابلیت ماندن در فاز مایع را از دست داده و آماده تبلور شوند؛ روش‌های این مرحله شامل بهره‌برداری از اوپراتورهای حرارتی، کریستالایزرها برای تبخیر بیشتر و میعان تا بازیافت بالای ۹۵٪ است و باقی‌مانده به لجن خیلی غلیظ یا دوغاب نمکی تبدیل می‌شود.

جامدسازی نهایی

آخرین حلقه زنجیره ZLD و اغلب پس کریستالیزاسیون نهایی (تولید کریستال نمک - تبدیل نمک‌های محلول به کریستال‌های جامد یعنی تشکیل کریستال از فاز مایع) قرار دارد. در جامدسازی نهایی، رسوبات، کیک‌های مرطوب یا کنسانتره‌های فوق‌غلیظ به شکل کیک خشک یا نمک خشک با رطوبت زیر ۵ درصد و قابل دفع تبدیل می‌شوند. این مرحله تضمین می‌کند که نه تنها مایعی تخلیه نمی‌شود، بلکه جامدات تولیدی نیز بی‌خطر و مطابق با استانداردهای زیست‌محیطی باشند. روش‌ها در این مرحله شامل استفاده از خشک‌کن‌ها مانند اتریوم، اسپری‌درایر، خشک‌کن حرارتی، فیلتر پرس یا سانتریفیوژ برای جداسازی جامد از مایع باقی‌مانده است.

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد



ملاحظات و چالش‌های سیستم ZLD

فناوری تخلیه مایع صفر (ZLD)، علی‌رغم مزایای قابل‌توجه زیست‌محیطی، با چالش‌هایی روبه‌رو است.

مواد آلی مقاوم:

وجود ترکیبات آلی سمی و پایدار موجب گرفتگی غشاها و کاهش کارایی فرآیندهای بیولوژیکی می‌شود. راهکارهای نوین شامل بهبود جوامع میکروبی و به‌کارگیری روش‌های اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) برای تجزیه مؤثر این ترکیبات است.

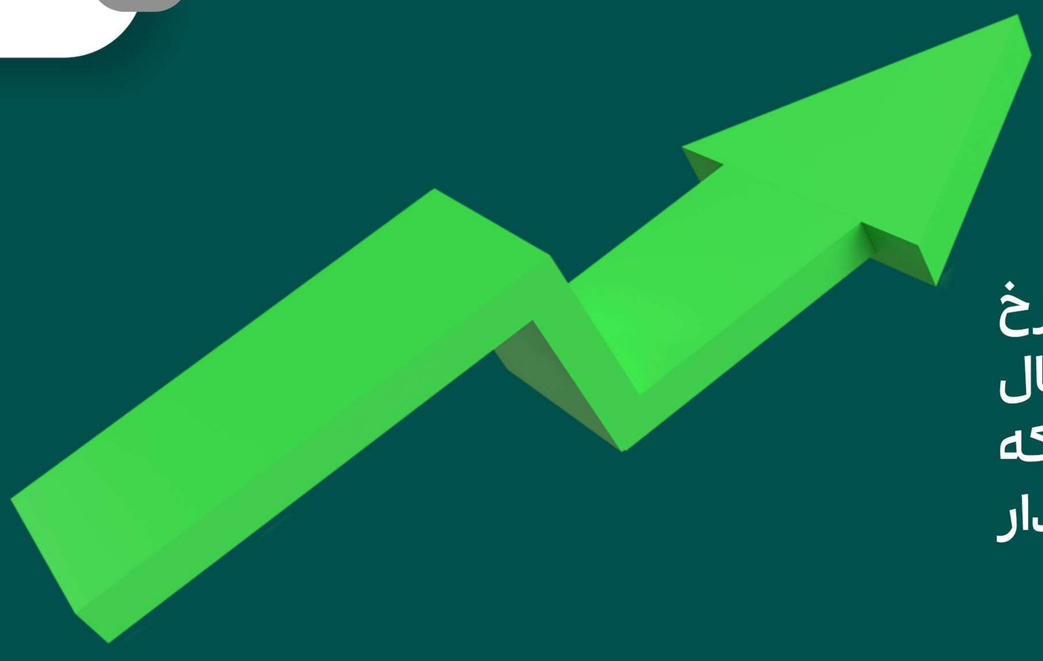
مدیریت پسماند و نمک‌ها:

روش‌های سنتی دفع، مانند حوضچه‌های تبخیر و دفن، خطر نشت، بو و آسیب به حیات‌وحش را در پی دارند. استفاده از پوشش های نفوذناپذیر و توسعه رویکردهای ارزش افزا نظیر تولید نمک‌های با خلوص بالا، جایگزینی اقتصادی محسوب می‌شود.

ابعاد اقتصادی و عملیاتی:

هزینه‌های بالا، مصرف زیاد مواد شیمیایی و تولید لجن اضافی از محدودیت‌های اصلی ZLD هستند. به‌کارگیری سیستم‌های ترکیبی (غشایی-کریستالیزاسیون) برای پیش‌تغلیظ و تولید جامدات در شرایط محیطی، می‌تواند بهره‌وری و صرفه‌جویی انرژی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد



چشم‌انداز رشد:

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد بازار جهانی ZLD با نرخ رشد سالانه حدود ۱۲٪ توسعه یافته و ارزش آن تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۲.۷ میلیارد دلار خواهد رسید، که بیانگر گسترش روزافزون تقاضا برای راهکارهای پایدار مدیریت فاضلاب است.

چندین کشور اروپایی، از جمله بریتانیا، آلمان، فرانسه و سوئد، سرمایه‌گذاری‌های قابل‌توجهی در زیرساخت‌های این سیستم انجام داده‌اند. این کشورها شاهد اجرای موفقیت‌آمیز سیستم‌های ZLD بوده‌اند که فناوری‌های متنوعی مانند تبخیر حرارتی، اسمز معکوس، اسمز مستقیم، تقطیر غشایی و الکترودیالیز را ترکیب می‌کنند. این فناوری‌ها، همراه با رویکردهای نوآورانه‌ای مانند فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، صنایع را قادر می‌سازند تا به سطوح بالایی از حذف آلاینده‌ها و تغلیظ شورابه دست یابند و بدین ترتیب اهداف ZLD را محقق سازند.

سرمایه‌گذاری‌های قابل‌توجه خاورمیانه در تحقیق، توسعه و زیرساخت‌های ZLD منجر به پروژه‌های آزمایشی موفق و اجراهایی در مقیاس کامل شده است. ابتکارات مشترک بین صنعت، دانشگاه و نهادهای دولتی، تبادل دانش، انتقال فناوری و ظرفیت‌سازی در این زمینه را تسهیل کرده است.

در نتیجه، وضعیت جهانی اینگونه از سیستم‌ها، نشان‌دهنده چشم‌اندازی پویا است که در آن اروپا و خاورمیانه به عنوان پیشگامان پذیرش و اجرای سیستم‌های ZLD ظهور کرده‌اند. رویکرد فعالانه آن‌ها، همراه با چارچوب‌های نظارتی قوی و فناوری‌های نوآورانه، بر اهمیت ZLD در دستیابی به مدیریت پایدار آب و حفاظت از محیط‌زیست تأکید دارد. همانطور که این مناطق به پیشرفت خود ادامه می‌دهند، تجربیات و موفقیت‌های آن‌ها به عنوان الگوهای ارزشمندی برای سایر نقاط جهان که با چالش‌های مشابه آبی روبرو هستند، عمل می‌کند.

وضعیت جهانی سیستم‌های ZLD برای بازیابی منابع

ساختارهای اقتصادی و سیاست‌های مدیریت منابع در کشورهای گوناگون، چشم‌انداز جهانی سیستم های تخلیه مایع صفر را به شکلی تنگاتنگ ترسیم کرده‌اند. در این حوزه، بازیگران کلیدی همچون اتحادیه اروپا، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، کانادا، خاورمیانه، مکزیک و چین، نقشی تعیین‌کننده در جهت‌دهی به توسعه و استقرار چنین سیستمی ایفا می‌کنند. ظرفیت اقتصادی هر کشور، محرک اصلی به‌شمار می‌رود و میزان سرمایه‌گذاری، نوآوری فناورانه و سرعت پذیرش این سیستم‌ها را تعیین می‌کند. از این رو، بازار این سیستم، اکنون اهداف پایداری و سرمایه‌گذاری‌های کلان را به همگرایی رسانده است.

در سوئیس، یک کارخانه تولید مولیبدن از سیستمی ترکیبی برای تخلیه مایع صفر بهره می‌برد؛ این سیستم فرآیندهای پیش‌تغلیظ با اسمز معکوس، تراکم مکانیکی بخار و تبخیرکننده فیلم ریزان را با هم تلفیق کرده است. این پیکربندی با تغلیظ مؤثر شورابه، آب باکیفیتی را برای مصارف صنعتی تولید می‌کند و نمونه‌ای پیشرفته از یکپارچه سازی فناوری‌های حرارتی و غشایی محسوب می‌شود.

اروپا این سیستم را در چارچوب سیاست‌های اقتصاد چرخشی، ابزاری کارآمد برای بازیابی هم زمان آب و فلزات می‌داند. پروژه‌های بازیابی مس از پساب‌های صنعتی، نمونه‌ای از این رویکرد به‌شمار می‌روند که در آن‌ها، تصفیه فاضلاب و استخراج پایدار فلزات در فرآیندی یکپارچه ترکیب شده است. این پروژه‌ها پس از ارزیابی‌های فنی- اقتصادی، خود را به‌عنوان راهکاری برای کاهش مصرف منابع اولیه و کاستن از بارهای زیست محیطی اثبات کرده‌اند.

در کانادا، شرکت فناورهای سالوردکز نمونه‌ای شاخص از پیاده‌سازی موفق سیستم تخلیه مایع صفر را ارائه داده است. این شرکت در یکی از معادن فلزات گران‌بها در شمال این کشور، دو سیستم تخلیه مایع صفر را در مقیاس صنعتی برای تصفیه آب شور معدن نصب کرد؛ این اقدام بازیابی آب شیرین و تولید نمک‌های جامد را به‌عنوان محصولات جانبی باارزش به‌دنبال داشت. پیش از اجرای صنعتی، متخصصان یک مطالعه پایلوت یک‌ساله را روی آب معدن انجام دادند و از این طریق، امکان‌پذیری فنی و اقتصادی پروژه را تأیید کردند.

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

کشورهای عضو اتحادیه اروپا، از جمله بریتانیا، بلژیک، قبرس، دانمارک، فرانسه، یونان، ایتالیا، لوکزامبورگ، مالت، هلند، پرتغال، اسپانیا و سوئد، به شکلی گسترده در توسعه سامانه‌های بازیافت آب و ZLD مشارکت می کنند. بر اساس قطعنامه سال ۲۰۱۵ اتحادیه اروپا، این کشورها حدود ۱۱۰۰ میلیون متر مکعب فاضلاب تصفیه‌شده را بازیافت کردند؛ پیش‌بینی می‌شود این مقدار تا سال ۲۰۲۵ به حدود ۶۰۰۰ میلیون متر مکعب افزایش یابد.

در پاکستان، صنایع نساجی و شیمیایی که از منابع اصلی تولید پساب به‌شمار می روند، به‌طور فزاینده‌ای به استفاده از سیستم‌های ZLD روی آورده‌اند. این سیستم‌ها بازیافت حدود ۸۰ درصد از آب مصرفی را امکان‌پذیر کرده‌اند. در برخی تأسیسات، ترکیب انرژی خورشیدی با منابع انرژی متداول، کارایی انرژی و پایداری کلی سیستم را بهبود بخشیده است.

در خاورمیانه، پروژه‌های پایلوت ZLD در شهرهایی مانند جده (عربستان سعودی) و دوحه (قطر) به مرحله اجرا درآمده‌اند. در عمان، شرکت توشیبا یک تأسیسات تصفیه و بازیافت فاضلاب را توسعه داده است که روزانه حدود ۷۵۰۰ متر مکعب آب فرآیندی را در شرایط اقلیمی خشک بازیابی می‌کند. این پروژه نمونه‌ای بارز از نقش ZLD در افزایش امنیت آبی مناطق کم آب به‌شمار می‌رود.

در مجموع، تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که سیستم‌های ZLD به‌عنوان راهکارهایی مؤثر برای بازیابی منابع، کاهش وابستگی به آب شیرین و ارتقای پایداری صنعتی، در حال تبدیل شدن به بخشی جدایی‌ناپذیری است، بدین‌ترتیب پیشنهاد می‌شود به‌منظور ارزیابی اثربخشی اجرای این سیستم در استان یزد، مطالعات پژوهشی و اقتصادی لازم انجام شده و نتایج آن در فرآیند بحث، بررسی و تصمیم گیری مورد استفاده قرار گیرد.

منابع:

Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. Simeone Chidalu Ozioko, Oyetunde Adeoye Adeaga, Olutosin Kolawole Ilori, Chibuzor Victor Nnaji. Journal of Water and Health2024

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد