



تصفیه پساب‌های صنایع پتروشیمی با استفاده از سیستم تخلیه مایع صفر (ZLD): مزایا، چالش‌ها و راهکارها

رضا فاطمی نیا[✉]

۱- مسئول واحد پژوهش و فناوری، مدیریت مهندسی، شرکت مدیریت توسعه صنایع پتروشیمی

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مروری	با توجه به بحران جهانی آب، تصفیه و باز استفاده از پساب‌های صنعتی به‌ویژه در صنایع آب‌بر مانند پتروشیمی، راهبردی کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب به‌شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، افزایش آگاهی نسبت به بحران کم‌آبی و آلودگی منابع آبی، همراه با الزامات قانونی محیط‌زیستی و هزینه‌های بالای دفع پساب، توجه گسترده‌ای را به فناوری تخلیه مایع صفر (Zero Liquid Discharge - ZLD) جلب کرده است. در این مقاله، ضمن معرفی سیستم ZLD و قابلیت‌های استفاده آن در طی فرآیندها و عملیات‌های مختلف صنایع پتروشیمی، مزایا، چالش‌ها و راهکارهای برای مدیریت چالش‌های موجود و نیز چشم‌انداز توسعه فرایندی و فناوریانه و تقاضای بازار برای سیستم‌های ZLD و رشد مورد انتظار آنها مورد بررسی قرار گرفته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶	
کلید واژه‌ها: صنعت پتروشیمی، تصفیه پساب، فناوری، سیستم ZLD	



Wastewater Treatment of Petrochemical Industry Using Zero Liquid Discharge (ZLD) Systems: Advantages, Challenges, and Solutions

Reza Fatemina^{1✉}

1- Head of Research and Technology Unit, Engineering Management, Petrochemical Industries Development Management Company

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:

Received:
2025/05/20

Accepted:
2025/12/17

Available online:
2026/03/17

Keywords:

Petrochemical industry,
Wastewater treatment,
Technology,
Zero Liquid Discharge (ZLD) system

Abstract

Due to the global water crisis, the treatment and reuse of industrial wastewater, particularly in water-intensive industries such as petrochemicals, has become a key strategy for sustainable water resource management. In recent years, growing awareness of water scarcity and water pollution, together with environmental regulatory requirements and the high costs associated with wastewater disposal, has led to increased attention toward Zero Liquid Discharge (ZLD) technology. This article introduces ZLD systems and examines their applications across various processes and operations in the petrochemical industry. Furthermore, the advantages, challenges, and proposed solutions for managing existing challenges are discussed. The study also reviews process and technological development trends, market demand for ZLD systems, and their anticipated growth prospects.

✉ Corresponding author E-mail address: rf_shahkaram@yahoo.com

مقدمه

در صنایع پتروشیمی، پساب‌ها از منابع مختلفی مانند بخار سرد شده^۱، آب فرآیند^۲ و کاستیک مصرفی^۳ در کراکرها و واحدهای آروماتیک و نیز از جریان تخلیه برج خنک‌کننده^۴، خنک‌کننده کمپرسور و پمپ، روان‌آب‌های سطحی جمع‌آوری شده از زهکش‌های نصب شده در محیط مجتمع‌های پتروشیمی که ممکن است حاوی حلال‌های شیمیایی و فرآورده‌های نفتی ریخته شده باشد، تولید می‌شوند (Jafarinejad & Jiang, 2019). روند ایجاد سیستم‌های تخلیه مایع صفر^۵ کارخانه‌های صنعتی به وضوح در اکثر کشورهای پیشرفته جهان طی ۱۵ تا ۲۰ سال گذشته پدیدار شده است. دلایل آغاز توسعه گسترده سیستم‌های ZLD، از یک طرف آلودگی فاجعه‌بار آب‌های طبیعی با پساب‌های صنعتی، خانگی و کشاورزی و از طرف دیگر، ظهور و استفاده از تجهیزات تکنولوژیکی مختلف (دستگاه‌های تبخیر چند مرحله‌ای، تأسیسات اسمز معکوس و غیره) است که کاربرد آن شاخص‌های اقتصادی قابل قبولی از سیستم‌های ZLD را ارائه می‌دهد. پیاده‌سازی سیستم‌های ZLD تصفیه پساب صنعتی از جمله مهم‌ترین راه‌حل‌های منطقی مسئله احیا و استفاده مجدد آب صنعتی است (Aksenov et al., 2020). امروزه تصفیه پساب‌های صنعتی با رویکرد "باز مصرف"^۶ آن و عدم استفاده از منابع "آب تازه"^۷، یک راهبرد اساسی در دنیا برای مدیریت منابع آب و مصرف آن است.

در سال‌های اخیر، شناخت بیشتر چالش‌های دوگانه کمبود آب و آلودگی آب محیط‌های آبی، علاقه جهانی به ZLD را سبب شده است. مقررات سخت‌گیرانه‌تر، افزایش هزینه‌ها برای دفع پساب و افزایش ارزش آب شیرین باعث شده است ZLD به یک گزینه مفید یا حتی ضروری برای مدیریت پساب تبدیل شود. تخمین زده می‌شود که بازار جهانی ZLD به سرمایه‌گذاری سالانه حداقل ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار برسد (Weimer, 2015; Tong & Elimelech, 2016; Yaqub & Lee, 2019). سیستم‌های تصفیه ZLD کاربردهای بالقوه و بالفعل مناسبی به‌منظور مدیریت پساب‌های تولیدی در صنایع مختلف مانند صنایع نفت (Salih, 2021)، نیروگاه‌های مولد برق (Liao, 2025)، صنعت نساجی (Pundir, 2024)، صنایع معدنی (Santoro, 2021)، صنایع رنگ (Saiyad, 2025)، صنعت چرم (Ricky, 2022) و صنایع دارویی (Patel, 2017) و غیره دارد.

دستیابی به تخلیه مایع صفر که در بسیاری از ایالت‌های هند و سایر کشورها مانند اسپانیا، چین و غیره اجباری شده است، منجر به توسعه فناوری‌های تصفیه‌های جدید متناسب با شرایط محلی شده است. انواع مختلف واحدها مانند میکرو فیلتر، بیوراکتور غشایی، اولترا فیلتراسیون و اسمز معکوس و غیره برای بازیابی آب از آب دریا و پساب خانگی / صنعتی با مقدار کل مواد جامد محلول^۸ بالا توسعه یافته‌اند (Rajamani, 2016). از دلایل فنی پیدایش سیستم ZLD، می‌توان به نواقص سیستم‌های قدیمی تصفیه پساب از جمله سیستم اسمز معکوس که پساب زیاد با شوری و TDS بالا ایجاد می‌کرد، اشاره کرد.

مطالعات و بررسی‌های مختلفی در خصوص ارزیابی و بهبود عملکرد سیستم‌های تصفیه ZLD در بخش‌های مختلف صنعتی در داخل و خارج کشور انجام گرفته است. شکرالله‌زاده و فولادوند، مروری بر رویکردهای نوین در بازیابی آب از منابع آبی نامتعارف را مورد بررسی قرار دادند (شکرالله‌زاده و فولادوند، ۱۴۰۳)، در حالی که عزیزی و همکاران، نقش روش تراکم بخار مکانیکی در سامانه ZLD را به‌عنوان یک راهکار کارآمد و پایدار برای مدیریت پساب‌های صنعتی است که می‌تواند به کاهش مصرف آب و پیشگیری از آلودگی منابع آبی کمک کند، مورد بررسی قرار دادند (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۳). در کار مطالعاتی دیگر، بررسی فرآیندهای مختلف ZLD و تعیین فرآیند بهینه برای تصفیه دوباره پساب سیستم اسمز معکوس در شهرستان لار انجام شد (نوشادی و افسری، ۱۳۹۹).

¹ Vapor Condensation

² Process Water

³ Spent caustic

⁴ Cooling tower blow down

⁵ Zero liquid discharge (ZLD)

⁶ Reuse

⁷ Fresh water

⁸ Total Dissolved Solids (TDS)

در مطالعه رادها شارما^۱ و همکاران، معرفی فناوری‌های ترکیبی غشایی-حرارتی؛ بررسی مزایا و چالش‌های اقتصادی و محیط‌زیستی در سیستم‌های MLD و ZLD مورد بررسی قرار گرفت (Radha et al., 2025). شرکت صاحب فناوری وئولیا^۲ بررسی اجرای ZLD برای بازیابی کامل آب از پساب صنعتی؛ تولید چند نوع آب برای مصارف داخلی مجتمع در یکی از بزرگ‌ترین مجتمع تبدیل گاز به مایع را انجام داد. ساهیتیا و لاکشمی^۳، مقایسه عملکرد دو واحد ZLD در هند با فناوری‌های متفاوت در خصوص مصرف بخار، برق، هزینه عملیاتی و پیشنهاد استفاده از MEE و ATFD برای بهینه‌سازی فرآیند ZLD را ارائه کردند (Sahithya & Lakshmi, 2023). دیاز^۴ و همکاران، در تحلیل روند پژوهشی جهانی در زمینه ZLD با تمرکز بر مدیریت شورا، در مطالعه خود با بررسی ۲۳۸ مقاله، رشد چشمگیر مطالعات از ۲۰۱۷ و اهمیت موضوع نیاز به کاهش مصرف انرژی و بهبود غشاهای در سیستم ZLD را گزارش کردند (Díaz et al., 2022). در کار مطالعاتی لیانگ^۵ و همکاران، بررسی فرآیندهای ZLD و چالش‌های اجرایی در صنایع مبتنی بر شناسایی محدودیت‌های انرژی، هزینه بالا و پیشنهاد فناوری‌های نوین مانند AOP و غشاهای پیشرفته مورد مطالعه قرار گرفت (Liang et al., 2021). چن^۶ و همکاران نیز در کار مطالعاتی خود طراحی سیستم ZLD در ترکیب با MED، کریستال‌سازی و فشرده‌سازی بخار به‌منظور کاهش هزینه با استفاده از منابع حرارتی ارزان را ارائه کردند (Chen et al., 2021). در این مطالعات، عمدتاً بهبود عملکرد سیستم‌های تصفیه ZLD در فرایندهای تبخیر، بلور سازی و غشایی به‌منظور بهبود جداسازی و کاهش مصرف انرژی، ارزیابی هزینه‌های عملیاتی و دیگر موارد مورد توجه قرار گرفته است.

از طرف دیگر، طی سال‌های گذشته سیستم‌های ZLD در تعدادی از شرکت‌های پتروشیمی ایران با اهداف خاصی به کار گرفته شده‌اند. برای مثال، در مجتمع پتروشیمی فجر، با هدف بازیافت پساب دور ریز بلوک‌های اسمز معکوس به‌منظور کاهش برداشت آب رودخانه کارون؛ در مجتمع پتروشیمی ایلام، برای بازیافت پساب تصفیه‌شده و بلودان برج خنک‌کننده به‌عنوان بخشی از آب جیرانی برج‌ها؛ در مجتمع پتروشیمی رازی به‌منظور بازیافت بلودان برج خنک‌کننده آمونیاک یک؛ در مجتمع پتروشیمی اروند، برای بازیافت بلودان برج خنک‌کننده اول به‌عنوان آب جیرانی برج خنک‌کننده دوم و در مجتمع پتروشیمی مارون، با هدف بازیافت بلودان برج خنک‌کننده برای تأمین بخشی از آب جیرانی برج این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اهمیت و قابلیت‌های این سیستم‌ها در تصفیه پساب‌های هدف گذاری شده است.

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی موردنظر در این مطالعه مبتنی بر روش تحقیق کیفی و با استفاده از منابع علمی داخلی و بین‌المللی، اطلاعات فنی شرکت صاحب فناوری هندی اسکیل بان^۷ و گزارش فنی پروژه مطالعاتی در امارات متحده عربی است. به‌منظور گردآوری منابع مرتبط، جستجوی‌های لازم در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر از جمله ساینس دایرکت^۸ و گوگل اسکولار^۹ صورت گرفت. واژه‌های کلیدی مورد استفاده شامل عبارات صنعت پتروشیمی، تصفیه پساب، سیستم ZLD، فرایندهای حرارتی و غشایی در نمک‌زدایی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی سیستم ZLD بودند. مطالعات انتخاب‌شده مربوط به بازه‌ی زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ میلادی، و شامل مقالات پژوهشی، مرورهای پیشین، گزارش‌های صنعتی - فنی بوده‌اند. معیارهای انتخاب شامل اعتبار مجله، تعداد استنادات، تازگی رویکردها و کاربردپذیری صنعتی فناوری‌ها بود. اطلاعات استخراج شده شامل پارامترهایی چون نوع فناوری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، میزان مصرف انرژی، محدوده TDS خوراک و نرخ بازیابی آب صورت گرفته است. همچنین،

¹ Radha, Sharma

² Veolia

³ Sahithya & Lakshmi

⁴ Diaz

⁵ Liang

⁶ Chen

⁷ Scaleban

⁸ ScienceDirect

⁹ Google Scholar

تلاش شده ضمن معرفی سیستم‌های ZLD، روش‌ها و فناوری‌های مورد استفاده، توسعه این سیستم از نقطه‌نظر فرایندی، هزینه‌های مربوطه به سیستم‌های ZLD، تجزیه و تحلیل مزایا و چالش‌ها، به ارائه برخی راهکارهای فنی عبور از این چالش‌ها به‌همراه زمینه‌های مطالعاتی و فرصت‌های پژوهشی برای اساتید و علاقمندان به سیستم‌های تصفیه ZLD اشاره شود.

بررسی فناوری‌ها، روش‌ها و فرآیندهای مورد استفاده در سیستم ZLD

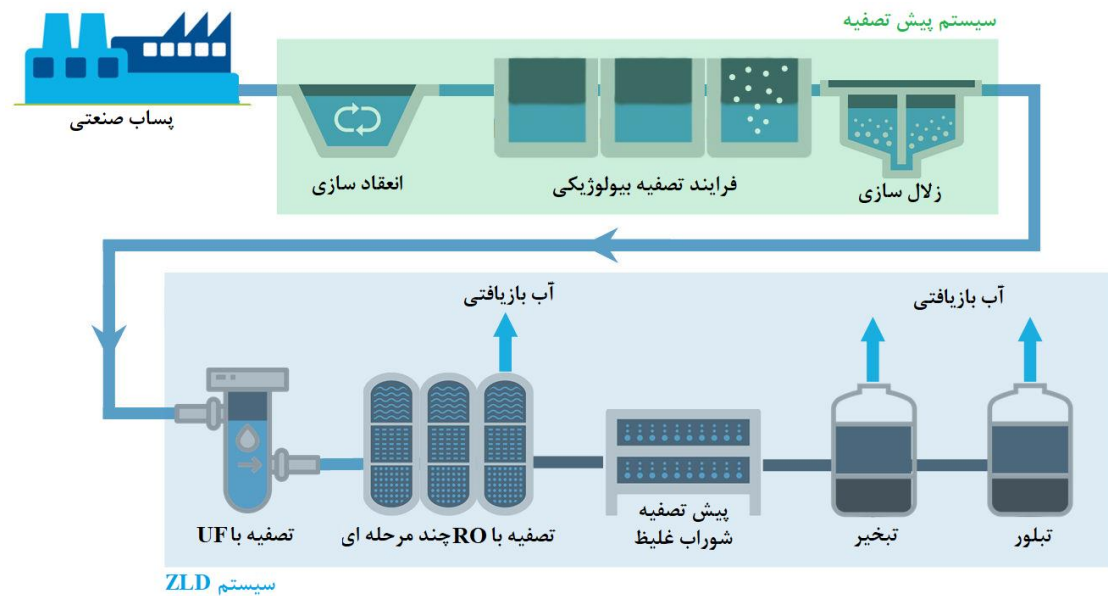
سیستم‌های ZLD که از فناوری‌های پیشرفته نمک‌زدایی / تصفیه پساب است، برای تصفیه و بازیافت پساب تولید شده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. برخی از جریان‌های پساب حاوی مواد با ارزشی مانند: سولفات پتاسیم، سولفات سدیم، گچ، سود سوزآور و لیتیوم هستند که تصفیه و بازیابی آنها با سیستم ZLD امکان‌پذیر بوده و مقرون به صرفه است. در یک چرخه صنعتی، نمودار جریان مواد در سیستم ZLD مطابق شکل (۱) است.



شکل (۱) نمودار جریان مواد در سیستم ZLD (hoaphat-eco, 2023)

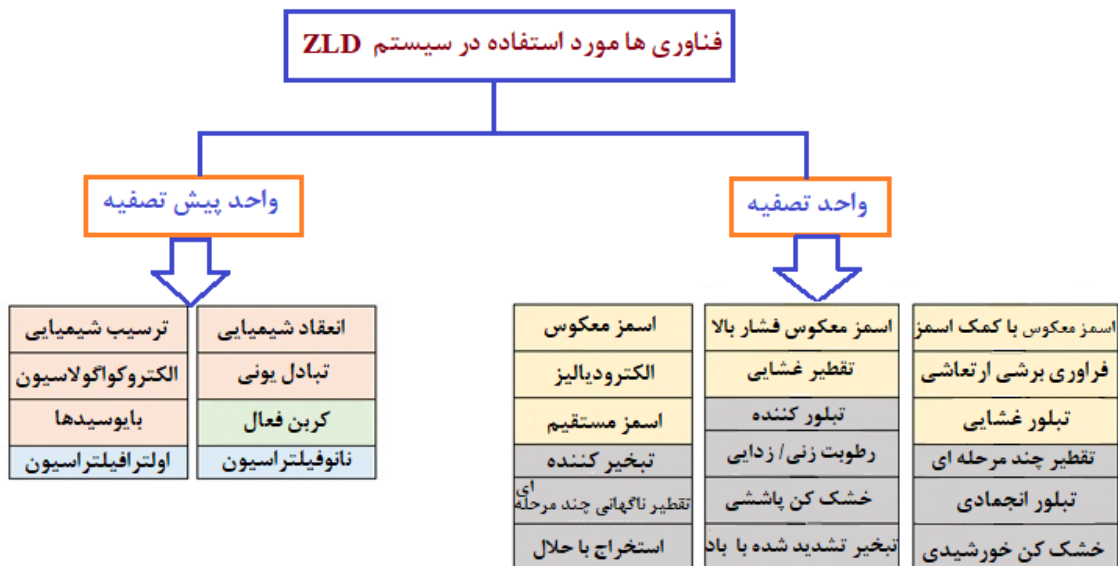
اساساً مشابه فناوری‌های نمک‌زدایی، فناوری‌های تخلیه صفر مایع بر پایه فرآیندهای حرارتی یا تبخیری مستقل، فرآیندهای غشایی، یا ترکیبی از هر دو نوع با عنوان سیستم‌های هیبریدی بنا شده‌اند. سیستم‌های ZLD رایج اساساً از تبخیرکننده‌ها و کریستالایزرهای آب‌شور تشکیل شده‌اند تا نمک‌های محلول را به‌طور کامل از آب جدا کنند. این فرآیندها از نظر فناوری پیچیده و از نظر انرژی پرمصرف هستند. برای کاهش حجم آب‌شور^۱ ورودی به تبخیرکننده‌ها (و به تبع آن کاهش مصرف انرژی) یا برای جایگزینی کامل فرآیندهای تبخیری ZLD، طراحی‌های مختلفی از سیستم‌های ZLD مبتنی بر اسمز معکوس پیشنهاد شده‌اند. ایده افزودن فرآیندهای غشایی مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز/ الکترودیالیز معکوس، به‌منظور کاهش هزینه انرژی کلی سیستم و افزایش حد آستانه شوری آب ورودی قابل تصفیه است (Shafi et al., 2018). از طرفی، فرآیند ZLD شامل مراحل و فناوری‌های مختلفی برای رسیدن به هدف خود مانند پیش‌تصفیه، تغلیظ کردن، تبخیر تبلور، فرآیندهای غشایی، تصفیه شیمیایی، بازیافت و استفاده مجدد و مدیریت پسماندها است (Namdeti, 2023). در شکل (۲) جریان فرآیندهای محتمل در یک سیستم معمولی ZLD حتی اگر مشخصات غشاهای و مواد شیمیایی مختلف مورد استفاده بستگی به فرآیند تولید متفاوت باشد، مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، فناوری‌های پیش‌تصفیه بر پایه روش‌های فیزیکی، شیمیایی و یا زیستی انجام می‌شوند و این مرحله می‌تواند شامل یک سامانه تک‌مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای باشد (Kress, 2019).

^۱ Brine



شکل (۲) فرایندهای سیستم تصفیه ZLD (Liang et al., 2021).

واحد پیش تصفیه می‌تواند شامل فرآیندهایی مانند انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون باشد که برای کاهش مقدار کل جامدات معلق^۱، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی^۲ و کدورت^۳ استفاده می‌شود. پس از حذف یا کاهش قابل توجه TSS، COD و کدورت پساب تصفیه‌شده، می‌توان از سایر فرآیندهای تصفیه پساب استفاده کرد. در طول پیش تصفیه، مواد جامد معلق، مواد آلی و ذرات بزرگ‌تر، اغلب از طریق فرآیندهایی مانند فیلتراسیون غشایی یا ته‌نشینی ثقلی، حذف می‌شوند (Namdeti, 2023). فناوری‌های پیش تصفیه و تصفیه مورد استفاده در یک سیستم ZLD در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) فناوری‌های مورد استفاده در سیستم تصفیه ZLD (Hövel, 2021)

¹ Total suspended solids (TSS)

² Chemical Oxygen Demand (COD)

³ Turbidity

انتخاب فناوری‌ها و فرآیندهای مناسب برای پیش‌تصفیه به‌شدت به ماهیت آلاینده‌های موجود در شورابه بستگی دارد. بنابراین، تحلیل ترکیبات موجود در شورابه یک الزام اساسی است (Panagopoulos & Haralambous, 2020) و نیاز به آنالیز پساب از چند نقطه‌ی مختلف است. عموماً برای غلظت ترکیبات آلی پارامترهایی مانند COD، BOD، TOC و برای ترکیبات غیر آلی پارامترهایی مانند TDS، ORP مورد سنجش قرار می‌گیرند. با داشتن اطلاعات مذکور می‌توان یک طراحی بهینه برای سیستم ZLD انجام داد (نوشادی و همکاران، ۲۰۱۹). پیش‌تصفیه‌ی شدید در روش‌های مبتنی بر غشاء ضروری است، زیرا نفوذپذیری غشاء در اثر برخی از اجزای آب کاهش یافته و این مسئله منجر به افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری می‌شود و حتی ممکن است باعث بروز اختلال در سیستم شود (Muhammad & Lee, 2019). به‌طور کلی، شورابه‌های با شوری پایین که از منابع آب تغذیه‌ای نظیر آب لب‌شور و فاضلاب تولید می‌شوند، غالباً با سیستم ZLD مبتنی بر غشاء و با پیش‌تصفیه‌ی شدید مورد تصفیه قرار می‌گیرند. در مقابل، شورابه‌های با شوری بالا معمولاً تنها با روش‌های حرارتی ZLD تصفیه می‌شوند و پیش‌تصفیه‌ای معمولی یا بدون پیش‌تصفیه در آن‌ها به کار می‌رود (Giwa et al., 2017).

واحد کاهش غلظت جامدات محلول در سیستم ZLD معمولاً توسط فناوری‌های غشایی، مانند اسمز معکوس^۱، الکترودیالیز^۲ یا با ترکیب این دو انجام می‌شود. با استفاده از فناوری ED یا ترکیب RO + ED می‌توان بیش از ۹۸٪ آب تصفیه‌شده را بازیابی کرد (Saiyad et al., 2025). یک سیستم معمولی دو غشایی شامل اولترافیلتراسیون (UF) و اسمز معکوس (RO) قادر است بین ۶۰ تا ۷۵ درصد از جریان خروجی حاصل از مرحله پیش‌تصفیه را بازیابی کند اما با استفاده از فناوری اختصاصی اسمز معکوس با راندمان بالا^۳، میزان کلی بازیابی آب می‌تواند به بیش از ۹۰ تا ۹۵ درصد برسد. برای کاهش رسوب‌گذاری و گرفتگی در سیستم غشایی، فرآیند HERO در pH بالا با استفاده از پیش‌تصفیه‌هایی مانند نرم‌سازی، تبادل یونی و حذف CO₂ عمل می‌کند (Liang et al., 2025). قابل‌ذکر است، رویکردهای ترکیبی به‌دلیل ظرفیت آنها برای تسهیل بازیابی همزمان منابع متعدد و در عین حال کاهش مصرف کلی انرژی و کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن، اهمیت پیدا کرده‌اند (Panagopoulos & Michailidis, 2025). در جدول (۱) مقایسه بین عملکرد سیستم‌های مختلف تصفیه ZLD با روش سنتی در تصفیه پساب‌های یک نمونه صنعت نساجی ارائه شده‌است (Pundir et al., 2024). در این گزارش هر چند مصرف انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری روش تصفیه سنتی نسبت به سیستم‌های ZLD کمتر است لیکن سیستم‌های ZLD بابت نرخ بازیابی آب و عدم تخلیه پساب به محیط‌زیست (رعایت الزامات محیط‌زیستی و جریمه‌ها) از ارجحیت بیشتر برخوردارند. لازم به ذکر است، الزامات و مقررات محیط‌زیستی دولت‌ها در مورد تخلیه پساب‌ها در محیط‌زیست و اثرات محیط‌زیستی ناشی از آنها، روش ZLD را یک ضرورت برای صاحبان صنایع کرده است.

جدول (۱) مقایسه بین سیستم‌های مختلف تصفیه ZLD با روش سنتی در تصفیه پساب‌های صنعت نساجی

نوع فناوری	مزایا	نرخ بازیابی آب (درصد)	مصرف انرژی	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
تصفیه سنتی ^۴ (رسوب‌گذاری شیمیایی)	هزینه کمتر، اما تخلیه پساب به محیط	۵۰-۶۰	کم	متوسط
ZLD با اسمز معکوس + تبخیر	بازیابی کامل آب، حذف نمک‌ها	۹۰-۹۵	زیاد	بالا
ZLD با پیش‌تغلیظ (ED/FO)	کاهش حجم شورابه، صرفه‌جویی در انرژی	۷۰-۸۵	متوسط	متوسط تا بالا

^۱ Reverse Osmosis (RO)

^۲ Electrodialysis (ED)

^۳ High efficiency reverse osmosis (HERO)

^۴ Conventional effluent treatment plant (ETP)

فرآیند تبلور، یک مرحله حیاتی برای حذف جامدات محلول است که شامل خنک کردن پساب غلیظ برای تشویق به تشکیل بلور نمک‌ها است که می‌تواند از فاز مایع جدا شود. تبخیر شامل حرارت دادن پساب غلیظ شده برای تبخیر آب و باقی‌ماندن نمک‌های جامد و سایر آلاینده‌ها است که می‌توانند به‌درستی جمع‌آوری و دفع شوند. در عملیات حرارتی معمولاً از تبخیرکننده (تقطیر چند مرحله‌ای^۱، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای^۲ و فشرده‌سازی بخار به‌روش مکانیکی^۳، تبخیرکننده چنداثره^۴ و تجهیز تبلور^۵ استفاده می‌شود. خروجی این فرآیند، نمک‌های کریستالی NaCl، Na₂SO₄، سایر نمک‌ها، لجن و انواع مواد جامد است. این نمک‌ها می‌توانند برای فرآوری بیشتر فروخته شوند. هرگونه پسماند جامد غیرقابل استفاده در محل مخصوص دفن پسماندها به‌صورت کنترل شده دفن می‌شود. آب تبخیر شده را می‌توان مجدداً در فرآیندهای کارخانه استفاده کرد (Saiyad et al., 2025; Rathoure, 2020; Barrington & HO, 2014). انتخاب فرآیند تبلور در سیستم ZLD به عوامل مختلفی از جمله حجم و ترکیب شورآب غلیظ، مصرف انرژی، آب و هوای محلی (استوایی یا غیر گرمسیری) و هزینه‌های زمین بستگی دارد. تبلور، یک سیستم مکانیکی پیچیده‌است که به گرما و برق با درجه بالا نیاز دارد و در نتیجه مصرف انرژی و هزینه‌های سرمایه‌ای زیادی را به‌همراه دارد (Menon et al., 2020). با ترکیب دقیق فرایندهای پیش تصفیه، اسمز معکوس، تبخیر و تبلور و تراکم و خشک کردن، سیستم‌های ZLD می‌توانند به نرخ بازیابی آب ۹۵ تا ۹۹ درصد دست یابند که به‌طور مؤثر مصرف آب و تولید پساب را کاهش می‌دهد (Rathoure, 2020). بررسی انجام شده نشان می‌دهد که دو عامل غلظت شوری و ترکیب درصد پساب، تأثیر قابل توجهی بر انتخاب نوع فرآیندهای تصفیه در سیستم ZLD، هزینه‌های سرمایه‌ای^۶، عملیاتی^۷ و هزینه‌های سالانه واحد تصفیه مورد نظر دارد (Visvanathan, 2013). در جدول (۲) مقایسه بین فناوری‌های مورد استفاده در یک سیستم تصفیه ZLD با توجه به مزایا، معایب و کاربرد آنها ارائه شده‌است. جدول‌های ارائه شده در این بخش و سایر بخش‌های، راهنمای مقدماتی به‌منظور انتخاب سیستم ZLD با توجه به نوع خوراک و حجم آن و فناوری‌های مورد نظر برای هدف جداسازی است.

جدول (۲) مقایسه بین فناوری‌های مورد استفاده در یک سیستم تصفیه ZLD

فناوری	مزایا	معایب	کاربرد	مرجع
RO	مصرف انرژی کمتر، هزینه اولیه پایین	محدودیت در TDS بالا، نیاز به پیش‌تصفیه	صنایع با پساب کم‌نمک	Nativ et al., 2025.
EDR	مناسب برای تغلیظ اولیه، کاهش حجم پساب	راندمان پایین در TDS بالا	صنایع غذایی، دارویی	Modiet al., 2022.
Evaporators	بازیابی تا ۹۵٪ آب، مناسب برای TDS بالا	مصرف انرژی بالا، هزینه عملیاتی زیاد	نیروگاه‌ها، پتروشیمی	Shafi et al., 2018.
Crystallizers	تولید نمک خشک، بازیابی کامل آب	پیچیدگی فنی، نیاز به آلیاژهای مقاوم	معادن، صنایع شیمیایی	Chen et al., 2021.
Spray Dryer	مناسب برای دبی پایین، تولید پودر	محدودیت ظرفیت، هزینه بالا	صنایع کوچک با پساب خاص	Koech et al., 2021.

برای استخراج چندین منبع ارزشمند، از جمله آب، نمک‌ها / مواد معدنی، انرژی و فلزات، طیف وسیعی از فناوری‌ها را می‌توان به‌صورت مجزا یا به‌عنوان اجزای سیستم‌های یکپارچه ZLD به کار برد. قابل‌ذکر است، رویکردهای ترکیبی به‌دلیل ظرفیت آنها برای تسهیل بازیابی همزمان منابع متعدد و در عین حال کاهش مصرف کلی انرژی و کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن، اهمیت پیدا کرده‌اند (Panagopoulos & Michailidis, 2025). آب تحت تصفیه ZLD می‌تواند به‌عنوان یک منبع با کیفیت آب با اطمینان

¹ Multiple-effect distillation (MED)

² Multi-stage flash distillation (MSF)

³ Mechanical Vapour Recompression (MVR)

⁴ Multiple Effect Evaporator (MEE)

⁵ Crystallizer

⁶ CapEx (capital expenditures)

⁷ OpEx (operational expenditures)

در تأسیسات صنعتی برای موارد مختلف مانند خنک کردن، آب فرآیند یا تمیز کردن تجهیزات مورد استفاده مجدد قرار گیرد. این امر نه تنها سبب کاهش تقاضا برای مصرف آب شیرین می‌شود بلکه تخلیه پساب‌های بالقوه مضر را به حداقل نیز می‌رساند (Namdeti, 2023).

یافته‌های پژوهش

بررسی و ارزیابی هزینه‌های سیستم تصفیه ZLD

هزینه‌های مرتبط با فناوری‌های ZLD شامل هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های عملیاتی غیرمرتبط با انرژی (به‌عنوان مثال: هزینه نیروی کار، نگهداری، و تعویض قطعات) هستند (Weaver & Birch, 2020). هزینه‌های سیستم ZLD به عوامل زیر بستگی دارد (Alspach & Juby, 2018; Mohammadi et al., 2024):

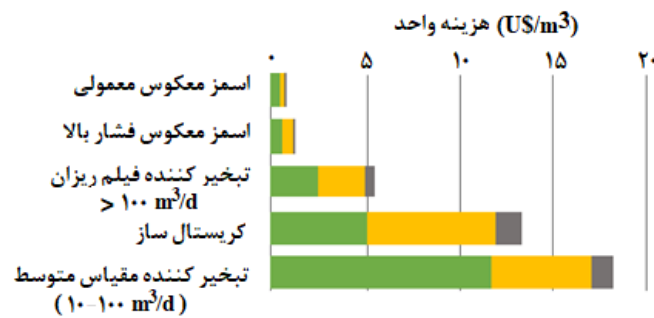
- دبی پساب ورودی: هر چه حجم پساب بیشتر باشد، تجهیزات بزرگ‌تر و پرهزینه‌تری نیاز است.
- ترکیب شیمیایی پساب: وجود ترکیباتی مانند سولفات، کلسیم، سیلیس و فلزات سنگین باعث افزایش هزینه‌های پیش‌تصفیه و نگهداری می‌شود.
- نوع فناوری مورد استفاده: سیستم‌هایی که از ترکیب غشاء، تبخیرکننده و کریستالایزر استفاده می‌کنند، هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتری دارند اما راندمان بالاتری نیز ارائه می‌دهند.
- مصرف انرژی: فرآیندهای حرارتی مانند تبخیر و کریستال‌سازی انرژی‌بر هستند و هزینه عملیاتی را افزایش می‌دهند.
- امکان بازیابی منابع ارزشمند: در برخی صنایع، بازیابی نمک‌ها یا فلزات از پساب می‌تواند بخشی از هزینه‌ها را جبران کند. از نظر هزینه‌های سرمایه‌گذاری، به‌طور کلی مرحله پیش‌تصفیه هزینه زیادی ندارد و کاملاً مشابه تصفیه اولیه پساب است. غشاءها کمی گران‌تر هستند زیرا نرخ بازیابی بالاتری را ارائه می‌دهند، اما شبیه غشاءهایی هستند که در تصفیه آب استفاده می‌شوند. بیشترین هزینه مربوط به بخش تبخیر و تبلور است. با توجه به هزینه کلی تجهیزات، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد هزینه در بخش تبخیر/ تبلور خواهد بود و ۳۰ تا ۴۰ درصد باقیمانده، هزینه پیش‌تصفیه و اسمز معکوس است. به هر اندازه که سیستم ZLD بزرگ‌تر باشد، این پارامترها نوسان بیشتری خواهند داشت (Liang et al., 2021).
- بستگی به ترکیب پساب، استفاده از سیستم غشایی برای پیش‌تغلیظ می‌تواند به‌طور چشمگیری ظرفیت و نوع سیستم تبخیر پایین‌دستی را کاهش دهد و در نتیجه هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سیستم به‌تبع آن کاهش پیدا کند. به‌عنوان مثال، اگر پسابی با غلظت TDS ورودی ۵۰۰۰ ppm با استفاده از یک سیستم غشایی بازیافت بالا تغلیظ شود، نیاز به ظرفیت سیستم تبخیر ممکن است ۹۰ تا ۹۵ درصد کاهش یابد. توجه داشته‌باشید که برای رسیدن به بازیافت بالای پساب در سیستم غشایی، اغلب نیاز به پیش‌تصفیه مناسب مانند: سختی گیر و تنظیم pH است (Bjorklund, 2017). اطلاعات مربوط به هزینه‌های یک واحد خاص به‌ازای هر متر مکعب برای برخی از فناوری‌های ZLD توسط ویور^۱ و بریج^۲، پاناگوپولوس^۳ و همکاران ارائه شده‌است (Weaver & Birch, 2020; Panagopoulos et al., 2019; Panagopoulos, 2020). ویور و بریج هزینه‌های یک واحد معمولی برای فناوری‌های اصلی ZLD که شامل سه بخش اصلی زیر هستند را مورد ارزیابی قرار دادند و اطلاعات مربوطه در شکل (۴) ارائه شده است:

- هزینه سرمایه‌ای مستهلک‌شده در مدت ۱۰ سال
- هزینه انرژی
- هزینه‌های عملیاتی غیرمرتبط با انرژی

¹ Weaver

² Birch

³ Panagopoulos



شکل (۴) هزینه‌های خاص فناوری‌های کلیدی در سیستم ZLD: هزینه سرمایه‌ای مستهلک شده طی ۱۰ سال با رنگ سبز، هزینه انرژی مصرفی با رنگ زرد و هزینه‌های عملیاتی غیرمرتبط با انرژی با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند.

با توجه به اطلاعات مذکور، می‌توان نتیجه گرفت که هزینه‌های عملیاتی غیر انرژی محور نسبت به هزینه‌های سرمایه‌ای و انرژی، قابل چشم‌پوشی هستند و نقش کمتری در مجموع هزینه‌ها ایفا می‌کنند. فناوری‌های اسمز معکوس معمولی و اسمز معکوس با فشار بالا^۱ دارای کمترین هزینه سرمایه‌ای و انرژی هستند. در مقابل، تبخیرکننده‌های مقیاس متوسط دارای بالاترین هزینه سرمایه‌ای هستند و این هزینه، بیش از ۱۰ دلار به‌ازای هر مترمکعب است و سهم اصلی را در هزینه کلی ایفا می‌کند. همچنین، از مجموع هزینه‌های واحد کریستالایزرها، حدود ۵۰ درصد مربوط به هزینه انرژی است (Weaver & Birch, 2020). در بررسی دیگر، شرکت هندی اسکیل بین^۲ مقایسه‌ای از توانمندی‌های فناوری خود با سایر فناوری‌های ZLD انجام داده (جدول ۳ مشاهده شود) و مدعی است که فناوری آنها در بسیاری از موارد به‌ویژه در زمینه صرفه‌جویی انرژی، هزینه، و سادگی بهره‌برداری عملکرد بهتری دارد، این شرکت مزایای زیر را برای فناوری خود ذکر کرده است (Scaleban, 2024):

- استفاده مستقیم از پساب در برج‌های خنک‌کننده
- بدون نیاز به انرژی یا فضای اضافی
- نصب سریع (۶-۸ هفته)
- بازگشت سرمایه در ۱۸-۱۲ ماه
- بدون نیاز به اپراتور متخصص
- مناسب برای صنایع پتروشیمی، نیروگاهی، نساجی، داروسازی و شیمیایی

جدول (۳) مقایسه‌ای بین فناوری Scaleban و فناوری‌های رایج مانند اسمز معکوس و تبخیر چندمرحله‌ای (Scaleban, 2024)

معیار	Scaleban (غیرحرارتی / غیر غشایی)	RO+MEE	FO	ED	MD
نوع فناوری	شیمیایی مکانیکی	غشایی و حرارتی	غشایی	الکتریکی	حرارتی غشایی
حداکثر TDS قابل تحمل	تا ۳۰۰,۰۰۰ ppm	تا ۲۵۰,۰۰۰ ppm	تا ۲۰۰,۰۰۰ ppm	تا ۱۵۰,۰۰۰ ppm	تا ۲۵۰,۰۰۰ ppm
مصرف انرژی الکتریکی (kWh/m ³)	بسیار پایین	RO: ۵-۳ MEE: ۸۰-۶۰	۰/۵ - ۱	۶/۷	۲-۳
مصرف انرژی حرارتی (kWh/m ³)	صفر	بالا	بالا	صفر	بسیار بالا
نیاز به پیش‌تصفیه	بسیار کم	پیش‌تصفیه شدید برای RO	متوسط	متوسط	زیاد
مقاومت در برابر خوردگی و رسوب	بسیار بالا	حساس	متوسط	متوسط	متوسط
هزینه سرمایه‌گذاری (CapEx)	کم (تا ۸۰٪ صرفه‌جویی)	بسیار بالا	متوسط	متوسط	بالا

¹ High pressure RO (HPRO)

² Scaleban

معیار	Scaleban (غیر حرارتی / غیر غشایی)	RO+MEE	FO	ED	MD
هزینه عملیاتی (OpEx)	پایین	بالا	متوسط	متوسط	بالا
نگهداری و بهره‌برداری	آسان / بدون نیاز به اپراتور متخصص	پیچیده / نیاز به تیم تخصصی	متوسط	متوسط	بالا
مقیاس‌پذیری	بسیار بالا (مدولار)	محدود	متوسط	متوسط	محدود
زمان بازگشت سرمایه	۱۸-۱۲ ماه	۴-۶ سال	۲-۳ سال	۳-۴ سال	۳-۵ سال
پایداری محیط‌زیستی	بسیار خوب (کاهش CO ₂)	تولید گازهای گلخانه‌ای بیشتر	نسبتاً پایدار	خوب	پایدار

در مطالعه دیگری، هاو^۱ یک مدل واقعی از اجرای سیستم ZLD در پروژه "دسولنیاتور"^۲ در شهر دبئی، امارات متحده عربی ارائه شده است. این مدل در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در دانشگاه فناوری چالمرز^۳ کشور سوئد در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است که جزئیات این ارزیابی در جدول (۴) ارائه شده است (Hövel, 2021). همان‌طور که مشاهده می‌شود برای ظرفیت سیستم تصفیه ۱۰ متر مکعب در روز، هزینه CapEx ۱/۱-۲/۵ میلیون یورو و شامل طراحی، تجهیزات، نصب و راه‌اندازی است. هزینه OpEx نیز با سال مالی پایه ۲۰۲۱، حدود ۸۰,۰۰۰-۱۲۰,۰۰۰ یورو برآورد شده است. در این گزارش، برای جبران بخشی از هزینه‌ها، درآمد جانبی ناشی از فروش نمک و کاهش هزینه دفع پیش‌بینی شده است. به‌منظور بهره‌مندی بیشتر از داده‌های فنی-اقتصادی حاصل از پیمایش بازار سیستم‌های ZLD به جدول صفحه ۸۰ از مرجع (Hövel, 2021) مراجعه شود.

جدول (۴) جزئیات مدل مالی پروژه ZLD در دبئی-امارات متحده عربی (Hövel, 2021)

توضیح	مقدار	شاخص
بر اساس داده‌های واقعی پروژه	۲۰۲۱	سال پایه مالی
برای تصفیه آب‌شور حاصل از نمک‌زدایی	۱۰ m ³ /d	ظرفیت سیستم
سه سناریوی طراحی مختلف	تبخیرکننده + کریستالایزر / اسمز معکوس / الکترودیالیز	فناوری‌ها
شامل طراحی، تجهیزات، نصب و راه‌اندازی	حدود ۱.۵-۱.۲ میلیون یورو	هزینه سرمایه‌گذاری (CapEx)
بستگی به فناوری انتخابی	حدود ۸۰,۰۰۰-۱۲۰,۰۰۰ یورو	هزینه عملیاتی سالانه (OpEx)
در صورت فروش نمک‌های بازیافتی و کاهش هزینه آب	۱۰-۱۴٪	نرخ بازگشت سرمایه (IRR)
با فرض قیمت آب ۱.۵ یورو / مترمکعب	۸-۶ سال	دوره بازگشت سرمایه
با استفاده از فناوری ترکیبی	۹۵-۹۸٪	بازیابی آب
در سناریوی حرارتی	۸۰-۱۰۰ Kw.h/m ³	مصرف انرژی
در سناریوی دوم و سوم مدل	از فروش نمک و کاهش هزینه دفع	درآمد جانبی

مزایا، چالش‌ها و راه‌کارها

هر فناوری تجاری‌سازی شده به‌دنبال مزایا و ارزش افزوده خاص خود، پس از عملیاتی شدن و به بهره‌برداری رسیدن، چالش‌ها و مشکلاتش نیز بیشتر مشخص می‌شود. اگرچه فناوری ZLD برای استفاده در تصفیه پساب‌های صنعتی از جمله در صنایع پتروشیمی دارای مزایایی در کاهش اثرات محیط‌زیستی کارخانه‌های صنعتی و حفظ منابع آب است، اما دارای معایبی نیز است که مصرف‌کنندگان و نیز تأمین‌کنندگان چنین سیستم‌هایی را به‌سمت حل این چالش‌ها و توسعه این فناوری هدایت کرده

¹ Hövel

² Desolenator

³ Chalmers University of Technology

است. چالش‌های موجود در عملیات پایدار موجود هر تصفیه‌خانه پساب به‌طور قابل توجهی با راندمان تخریب، انتشار کربن، تولید لجن بیولوژیکی و مصرف انرژی مرتبط است (Shah et al., 2020). در ادامه این بخش به مزایا، چالش‌ها و راه‌کارهای مربوطه به سیستم‌های ZLD پرداخته می‌شود:

• مزایا

به‌طور کلی می‌توان در خصوص مزایای سیستم‌های ZLD به موارد زیر اشاره داشت (Yaqub & Lee, 2019; Chimeng, 2014; Tong & Elimelech, 2016; حسینی ثابت، ۱۳۹۶):

- ۱- نصب فناوری ZLD، نظارت دقیق بر مصرف آب را تشویق می‌کند، از هدر رفتن آب جلوگیری می‌کند. بنابراین برای سیستم مدیریت آب یک واحد مفید است.
- ۲- بازیابی ۹۰ تا ۹۵ درصد آب و املاح با ارزش از پساب، هزینه عملیاتی بالای آن را توجیه می‌کند.
- ۳- رعایت سخت‌گیرانه‌ترین هنجارهای نظارتی، صنعت را به سمت رشد پایدارتر سوق می‌دهد.
- ۴- با توجه به تشدید کمبود آب در سطح جهان، بازیابی آب به میزان بیشتری از طریق ZLD در حال افزایش است.
- ۵- با استفاده از تکنیک‌های تخلیه مایع صفر، امکان بازیابی آب از پساب برای مصارف شهری و صنعتی وجود دارد.
- ۶- تقاضای آب از سوی صنعت، آزادسازی آب برای پاسخ‌گویی به نیازهای مصرف خانگی و کشاورزی را کاهش می‌دهد. لذا تصفیه پساب‌های صنعتی و باز مصرف آنها، می‌تواند تقاضای آب مورد نیاز صنعت را تأمین نماید.
- ۷- اکولوژی بدنه‌های آبی، شوری خاک و آب‌های زیرزمینی مجاور واحدهای تخلیه تحت‌تأثیر قرار نمی‌گیرند.
- ۸- بازیافت و استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده منجر به مدیریت منابع آب و حفظ آن می‌شود. در ارتباط با قابلیت مصارف پساب‌ها و آب‌های برگشتی نتیجه‌گیری می‌شود که مهم‌ترین کاربری مصارف این منابع در کشاورزی و همچنین آبیاری فضای سبز و جنگل کاری اطراف شهرها است که امکان استفاده از این منابع را با حداقل اثرات سوء محیط‌زیستی مقدور می‌سازد. در کنار مصارف زراعی، تغذیه مصنوعی به‌ویژه در فصول غیر زراعی به‌عنوان دومین اولویت مصارف اصلی این منابع مطرح است.

• چالش‌ها

قابل توجه‌ترین چالش‌ها یا معایب سیستم‌های ZLD عبارتند از:

- ۱- محدودیت اصلی برای پیاده‌سازی و توسعه سیستم‌های ZLD، سیستم‌های ZLD می‌توانند پیچیده باشند و برای کار و نگهداری به منابع انسانی تخصصی نیاز دارند. این امر می‌تواند یافتن و حفظ کارکنان بسیار ماهر را برای سرمایه‌گذاران دشوار کند. فناوری ZLD برای همه انواع جریان‌های پساب صنعتی مناسب نیست. ممکن است برای جریان‌های پساب با غلظت بالا یا سمی مؤثر نباشد و ممکن است قبل از تصفیه پساب به مراحل پیش تصفیه اضافی نیاز داشته باشد (Liang et al., 2021; Radha et al., 2025).
- ۲- افزایش سرمایه و هزینه‌های عملیاتی، بهره برداری و نگهداری. با وجود پیشرفت‌ها، هزینه‌های بالای سرمایه و عملیاتی سیستم‌های ZLD همچنان یک چالش است. بهره برداری و نگهداری سیستم‌های پیشرفته ZLD به پرسنل ماهر نیاز دارد. از طرفی، قیاس‌بندی این فناوری‌ها برای مقرون به صرفه کردن آنها برای صنایع کوچک و متوسط^۱ بسیار مهم است (Shafi et al., 2018).
- ۳- برای واحدهای صنعتی مختلف، طراحی‌های سفارشی و متفاوتی از سیستم ZLD مورد نیاز است (Shende et al., 2021).
- ۴- مشکلات فنی در مواجهه با جریان‌های پیچیده پساب. رسوب فیلتر غشاء‌های اسمز معکوس بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند ZLD است. زمانی که سیستم پیش تصفیه، مواد جامد مضر را به‌درستی قبل از ورود به دستگاه اسمز معکوس حذف نمی‌کند به احتمال بسیار زیاد، سطحی از رسوب در فیلترهای غشایی مشاهده خواهد شد. انباشته شدن رسوبات در غشاهای فیلتراسیون

^۱ Small and medium-sized enterprises (SMEs)

می‌تواند در نتیجه آلاینده‌هایی مانند: کلسیم، منیزیم، سیلیس، اکسیدهای فلزی، باکتری‌ها و سایر مواد جامد کلوئیدی و معلق باشد. این رسوب‌ها می‌توانند باعث افزایش مصرف انرژی و آسیب رساندن به غشاء‌ها یا باعث رسوب در اتصالات و لوله‌ها شوند که می‌تولند کارایی فرآیند ZLD را کاهش دهند. این مشکلات می‌تولند در عرض چند ساعت رخ دهند، و تمیز کردن این غشاء‌ها پس از رسوب دار شدن آنها دشوار است. یکی از مشکلات رایج در سیستم ZLD، تعادل مشکل ساز نسبت کل جامدات معلق به کل جامدات محلول^۱ است. حذف مواد معدنی به غلظت مناسب، به‌ویژه هنگام استفاده از تبخیر یا سایر روش‌های مربوط به حرارت، مهم هستند. افزودن گرما به محلول‌هایی با نسبت ناصحیح TSS به TDS می‌تواند به سرعت و به آسانی منجر به خوردگی لوله‌ها و رسوب و یا پوسته شدن غشاء‌ها شود. با تبخیر آب، مواد جامد باقی می‌ماند که غلیظ هستند. اگر در هنگام ورود به درستی حذف نشوند یا در زمان اول با پیش تصفیه مناسب پساب از آنها جلوگیری نشود، این جامدات و سختی‌ها می‌توانند جمع شده و در انتقال حرارت و سایر لوله‌های داخلی اختلال ایجاد کرده و منجر به خرابی تجهیزات شود (Liang et al., 2021; Havelka et al., 2019; Yaqub & Lee, 2019).

۵- استفاده از مقادیر زیاد مواد شیمیایی در تصفیه پساب. به‌طور کلی توصیه می‌شود تا حد امکان استفاده از مواد شیمیایی با فناوری ZLD به حداقل برسد. مواد شیمیایی در یک سیستم ZLD می‌تواند سطح دیگری از پیچیدگی را به فرآیند اضافه کند. برای مثال، بسیاری از تصفیه‌های شیمیایی برای آب شامل پخش‌کننده‌های خاصی برای جلوگیری از رسوب‌گذاری و پوسته پوسته شدن هستند، اما این مسئله می‌تواند منعقد کننده‌ها را در زمانی که نیاز به حذف از طریق شفاف‌سازی یا فیلتراسیون است دچار اختلال کند.

۶- مصرف شدید انرژی. در حالی که راه‌های کارآمد انرژی در حال ظهور هستند، بسیاری از فرآیندهای ZLD هنوز انرژی قابل توجهی مصرف می‌کنند. بنابراین، تداوم نوآوری در یکپارچه سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و بازیابی انرژی ضروری است (Pundir et al., 2024; Panagopoulos, 2021).

۷- مقدار زیادی لجن (هم خطرناک و هم سایر زباله‌های جامد) تولید می‌شود. فرآیند ZLD اغلب منجر به تولید زباله جامد می‌شود که به لجن معروف است و باید به درستی دفع شود. این ممکن است منجر به هزینه‌های اضافی برای جابجایی یا جمع‌آوری شود (Liang et al., 2021). برای مثال در پتروشیمی ایلام تولید پسماند جامدی با ظرفیت ۱۵۰۰-۱۰۰۰ kg/h از واحد تصفیه ZLD به یک چالش جدی محیط‌زیستی تبدیل شده‌است. دفع بقایای جامد تولید شده توسط سیستم‌های ZLD نیاز به رسیدگی دقیق برای جلوگیری از اثرات محیط‌زیستی ثانویه دارد. توسعه روش‌های بازیافت یا دفع مؤثر یک اولویت است. از طرفی، به‌خاطر استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی در فرایندهای تبخیر و تبلور، مقدار قابل توجهی گاز گلخانه‌ای^۲ تولید می‌کند.

• راه‌کارها

راه‌کارهای اساسی برای غلبه بر مشکلات سیستم‌های ZLD علاوه بر روش‌های فنی و نوآورانه، شامل توجه به سیاست‌گذاری‌های مناسب نیز هست که در ادامه به آنها اشاره می‌شود:

روش‌های فنی

- با توجه به اینکه پساب دارای تنوع و سطح آلودگی بسیار پیچیده است، استفاده از مواد شیمیایی در فرآیند ZLD باید بسیار دقیق و مناسب باشد. حتی در این فرآیند، مواد شیمیایی می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر سیستم داشته باشند. از این رو، هنگام مشورت با متخصص تصفیه آب، حتماً این موضوعات را مورد بررسی قرار دهید (Nibe et al., 2022; Liang et al., 2021).
- تغییر شرایط عملیاتی RO می‌تواند گرفتگی/رسوب‌گذاری غشا را بیشتر کاهش دهد. به‌عنوان مثال، فناوری اختصاصی اسمز معکوس با راندمان بالا، با ترکیبی از پیش تصفیه گسترده و شرایط pH بالا، به تمایل کم به گرفتگی/رسوب‌گذاری و بازیابی

¹ TDS

² Green house gases(GHG)

بالای آب، هم اکنون در جهان استفاده می‌شود، از جمله یک پروژه اخیر برای یک کارخانه تبدیل زغال سنگ در چین با ظرفیت تصفیه بالای ۲۳۰۰ مترمکعب در ساعت، آن را به کارگرفته است (Tong & Elimelech, 2016).

- استفاده از سیستم‌های ترکیبی. برای مثال سیستم ED-EDR همراه با RO در یک سیستم ZLD منجر به عملکرد دوگانه افزایش حد شوری RO و کاهش مصرف انرژی نسبت به تغلیظ‌کننده‌های آب شور شد. به‌عنوان مثال، اورن^۱ و همکارانش یک سیستم آزمایشی RO-EDR را برای نمک‌زدایی از آب شور با بازیابی آب ۹۷ تا ۹۸ درصد نشان دادند. در آن سیستم، EDR شوراب RO را قبل از تبلور و تبخیر، تا شوری ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر غلیظ کرد (Oren et al., 2010).

- همچنین استفاده از سیستم FO-MD منجر به بازیابی آب تا ۸۹٪، حذف ۹۹/۷٪ یون‌ها و تولید آب مقطر با رسانایی پایین شد که آن را برای استفاده در مزرعه یا تخلیه مناسب می‌کند. با بهره‌برداری از گرمای خروجی در محل، سیستم FO-MD می‌تواند جایگزینی مقرون‌به‌صرفه و پایدار برای تصفیه فاضلاب صنعتی باشد (Liao et al., 2025).

- استفاده از فرآیند جداسازی چند بلوری^۲ با استفاده از یک سیستم بازیابی حرارت نوآورانه شامل یک سیال انتقال حرارت و یک کمپرسور برای ZLD. در این سیستم استفاده از سیال بازیابی کننده حرارت، مصرف انرژی را از ۶۹۰ کیلووات بر تن خوراک آب شور به حدود ۱۲۵ کیلووات بر تن کاهش داد. این سیستم توانست بازیابی آب ۹۹/۲٪ را داشته باشد (Poirier et al., 2022).

- بهبود کیفیت مواد، ساخت و نوع غشاء‌ها. غشاءهای ساخته‌شده از پلیمرهای پیشرفته مانند پلی‌سولفون، پلی‌اتیلن ایمین و پلی‌آمید، توانایی بالایی در حذف نمک‌ها و آلاینده‌ها دارند. به‌طور سنتی، فرآیند نمک‌زدایی به‌شدت به غشاءهای پلیمری، به‌ویژه غشاءهای کامپوزیتی لایه نازک پلی‌آمید متکی بوده‌اند که به‌دلیل تعادل مناسب بین نفوذپذیری و گزینش‌پذیری، جایگاه محکمی را در بازار RO حفظ کرده‌اند. از طرفی، ساختار متخلخل و انتخاب‌پذیر این مواد باعث افزایش کیفیت آب خروجی می‌شود. استفاده از نانوذرات آبدوست مانند ZnO، TiO₂ و گرافن اکساید در ساخت غشاء، چسبندگی ذرات را کاهش داده و عمر غشاء را افزایش می‌دهد. این مواد سطح غشاء را صاف‌تر و مقاوم‌تر در برابر آلودگی می‌کنند (Liao et al., 2025; Panagopoulos, 2025; Hosseinipour, 2024; Rabiei, 2025).

- استفاده از پیش‌تصفیه قوی شامل انعقاد، لخته‌سازی، اولترافیلتراسیون یا جایگزین‌های غیر فیلتر مانند Scaleban، کنترل رسوب‌گذاری با شناسایی نقاط اشباع نمک، افزودن مواد ضد رسوب و پیروی از پروتکل‌های شست‌وشو، استفاده از مواد ضد خوردگی مانند تیتانیوم یا فولاد دوبلکس و سیستم بر خط برای کنترل pH و ترکیب‌های شیمیایی و طراحی بر اساس داده‌های واقعی، استفاده از پایلوت و سامانه‌های مدولار برای افزایش انعطاف‌پذیری (Scaleban, 2024).

همکاری و نوآوری

همکاری بین دولت‌ها، صنایع و مؤسسات تحقیقاتی منجر به نوآوری در فناوری‌های ZLD، رفع محدودیت‌های فعلی و باز کردن احتمالات جدید خواهد شد. سیستم‌های مبتنی بر غشاء اکنون جایگزین سیستم‌های ZLD حرارتی می‌شوند (زیرا سیستم ZLD حرارتی مستلزم هزینه‌های بالای انرژی است). سیستم‌های هیبریدی نیز در حال حاضر با فیلتراسیون غشایی اولیه، بازار را به‌دست می‌آورند و لجن حاصل پس از فرآیند غشایی در تبخیرکننده‌ها به‌منظور کاهش حجم و تثبیت، تصفیه می‌شود. از طرفی، اسمز معکوس، یک فناوری مبتنی بر غشاء است که به‌طور گسترده در نمک‌زدایی استفاده می‌شود و در سیستم‌های ZLD برای بهبود کارایی انرژی و هزینه گنجانده شده است، با این حال، اغلب برای تغذیه آب با دامنه شوری محدود استفاده می‌شود. بر این اساس، سایر فناوری‌هایی که می‌توانند آب تغذیه با شوری بالاتر را تصفیه کنند، مانند الکترولیز، اسمز پیشرو^۳ و تقطیر غشایی^۴، اخیراً به‌عنوان فناوری‌های جایگزین RO در سیستم ZLD ظهور پیدا کرده‌اند.

¹ Oren

² Multi-crystallization separation process (MCSP)

³ Forward osmosis (FO)

⁴ Membrane distillation (MD)

سیاست‌ها و مشوق‌ها

سیاست‌های حمایتی، یارانه‌ها و مزایای مالیاتی نقش مهمی در تشویق صنایع به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته ZLD خواهند داشت.

برنامه‌های آموزشی

با توجه به نیازمندی به پرسنل ماهر در بهره‌برداری و نگهداری سیستم‌های پیشرفته ZLD، برنامه‌های آموزشی و فناوری‌های کاربر پسند می‌توانند به رفع این چالش کمک کنند.

تقاضای بازار برای سیستم‌های ZLD و رشد مورد انتظار آن‌ها

از آنجایی که کمبود آب همراه با افزایش جمعیت و شهرنشینی به چالشی واقعی و نزدیک برای آینده زندگی بشری تبدیل شده است، انتظار می‌رود که سیستم‌های ZLD، به‌عنوان ابزاری برای مطابقت سازی با الزامات و استانداردهای رهاسازی پساب‌های در محیط، طراحی و ساخته شوند. در سال ۲۰۲۰، میزان درآمد حاصل از بازار سیستم‌های ZLD حدود ۶/۳۷ میلیارد دلار بود و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۸ این رقم به ۱۱/۷۷ میلیارد دلار برسد (Research and Markets, 2021). بنابراین، افزایش تقاضا برای مدیریت پساب در صنایع باعث رشد بازار سیستم‌های تخلیه مایع صفر می‌شود. عواملی که سبب رشد بازار سیستم‌های تصفیه ZLD می‌شود، شامل موارد زیر است (Modi & Modi, 2020):

- کمبود منابع آب شیرین: در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، هند و بخش‌هایی از چین، کمبود آب باعث شده صنایع به بازیافت آب از پساب روی بیاورند.
 - افزایش آلودگی محیط‌زیست: افزایش آلودگی‌های محیط‌زیست سبب تلاش دولت‌ها و شرکت‌های فعال صنعتی (طبق مقررات سخت‌گیرانه، الزامات محیط‌زیستی و جریمه‌های سنگین) برای کاهش آلودگی صنعتی و حفظ محیط‌زیست و به‌تبع حرکت به سمت گسترش بازار سیستم‌های تخلیه مایع صفر شود.
 - افزایش صنعتی‌شدن: افزایش صنعتی‌شدن در سراسر جهان، مانند توسعه نفت و گاز، انرژی و نیرو، خودروسازی، صنایع الکترونیک، شیمیایی، دارویی و غیره، تقاضا برای سیستم‌های تخلیه مایع صفر را برای مدیریت کارآمد پساب، محرک رشد بازار می‌کند.
 - پیشرفت فناوری‌های تصفیه: توسعه فناوری‌هایی مانند اسمز معکوس، تبخیرکننده‌های چندمرحله‌ای و کریستالایزرهای جریان اجباری باعث شده ZLD از نظر اقتصادی و عملیاتی قابلیت اجرا پیدا کرده و مورد استقبال ذی‌نفعان باشد.
 - افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه صنعتی: سرمایه‌گذاری مستمر در توسعه صنعتی توسط دولت و بازیگران خصوصی و ادغام فناوری‌های هوشمند برای افزایش کارایی کاربردهای صنعتی، عامل افزایش سرمایه‌گذاری است.
 - بازیابی منابع ارزشمند از پساب: برخی صنایع با استفاده از ZLD می‌توانند نمک‌ها، فلزات سنگین یا ترکیبات شیمیایی را از پساب استخراج کرده و دوباره وارد چرخه تولید کنند.
 - افزایش آگاهی عمومی و مسئولیت اجتماعی شرکت‌های تولیدی: شرکت‌های تولیدی برای کاهش تبعات آثار محیط‌زیستی و ارتقا برند خود، به سمت استفاده از فناوری‌های پایدار مانند ZLD حرکت کرده‌اند.
- میدان داران اصلی در بازار سیستم‌های ZLD عبارتند از: شرکت بین‌المللی اکواتک^۱ و جی ایی^۲ (ایالات متحده)، وئولیا^۳ (فرانسه)،

¹ Aquatech International

² GE

³ Veolia

گروه جی ایی ای^۱ (آلمان)، آلفا لوال ای بی^۲ (سوئد)، صنایع پراج^۳ و اس اس تکنو^۴ (هند)، آندریتز ای جی^۵ (اتریش)، اچ دو او^۶ (آلمان)، گروه آکواریون^۷ (سوئیس)، شرکت‌های سلوشن بی واتروپا^۸ و سلوشن بی واتروی اکس چنج^۹ (هند)، شرکت توشیبا زیرساخت سیستم‌ها و راه‌حل‌ها^{۱۰} (ژاپن)، سالت ورک^{۱۱} و پتروکاسپین^{۱۲} (کانادا) و کندورکم^{۱۳} از اسپانیا (Liang et al., 2021; Precedence research, 2024). در جدول (۵)، مقایسه بین سیستم‌های تجاری شده ZLD توسط شرکت‌های سازنده صاحب نام ارائه می‌شود که به مزایا و نقاط ضعف این سیستم‌ها اشاره شده‌است (Liang et al., 2021; Chaturvedi, 2025). این جدول و مراجع آن می‌تواند به‌عنوان راهنمای اولیه برای علاقمندان به انتخاب مورد خاص سیستم ZLD استفاده شود.

جدول (۵) مقایسه‌ی سیستم‌های ZLD تجاری‌شده در جهان (Liang et al., 2021; Chaturvedi, 2025)

نام شرکت - کشور	نقاط ضعف	مزایا	نوع فناوری
Aquatech آمریکا-International	مصرف انرژی بالا، هزینه سرمایه‌گذاری زیاد	بازیابی آب تا ۹۵٪، مناسب برای صنایع نفت و گاز	ترکیبی (RO + MEE + rystallizer)
Veolia Water Technologies-فرانس	پیچیدگی عملیاتی، نیاز به نیروی متخصص	طراحی سفارشی، پشتیبانی جهانی، مناسب برای صنایع شیمیایی	حرارتی - غشایی (MVR, ATFD)
GEA Group-آلمان	هزینه عملیاتی بالا، نیاز به فضای زیاد	مناسب برای فاضلاب‌های با TDS بالا، بازیابی نمک	تبخیر چندمرحله‌ای (MEE)، خشک‌کن‌های فیلم نازک
Thermax Global-هند	محدودیت در مقیاس‌پذیری، حساس به تغییرات کیفیت فاضلاب	راهکارهای مقرون‌به‌صرفه برای صنایع نساجی و دارویی	MEE + MVC + ATFD
Saltworks Technologies-کانادا	فناوری نوظهور، نیاز به مطالعات پایلوت بیشتر	مصرف انرژی پایین، طراحی مدولار، مناسب برای شورابه‌های پیچیده	غشایی پیشرفته + MVC
Praj Industries-هند	هزینه نگهداری بالا، نیاز به پیش‌تصفیه دقیق	تجربه در صنایع شیمیایی و دارویی، طراحی انعطاف‌پذیر	ترکیبی (RO + MEE + rystallizer)
Oasys Water-آمریکا	فناوری در حال توسعه، محدودیت در مقیاس صنعتی	مصرف انرژی پایین، مناسب برای فاضلاب‌های پیچیده	Forward Osmosis + Crystallization
Arvind Envisol-هند	محدودیت در بازیابی نمک، نیاز به نگهداری مکرر	مناسب برای صنایع نساجی، هزینه پایین	ZLD مدولار با RO و MEE
ENCON Evaporators آمریکا-	محدودیت در بازیابی آب، مصرف انرژی بالا	مناسب برای حجم‌های کم، نصب آسان	تبخیر حرارتی مستقل
Aquarion AG-سوئیس	هزینه سرمایه‌گذاری بالا، پیچیدگی طراحی	طراحی سفارشی، مناسب برای صنایع دارویی و پتروشیمی	ترکیبی غشایی و حرارتی
Agitated Thin Film Dryer (ATFD): خشک‌کننده فیلم نازک با همزن Multiple Effect Evaporation (MEE): تبخیر چند مرحله‌ای			

1 GEA Group

2 Alfa Laval AB

3 Praj Industries

4 SSTechno

5 ANDRITZ AG

6 H2O GmbH

7 Aquarion Group AG

8 SolutionsBWateropa

9 Solutions BWatervie Exchange (India) Ltd

10 Toshiba Infrastructure Systems and Solutions Corporation

11 Salt Work

12 Petro Caspian

13 Condorchem

قابل توجه اینکه شرکت‌هایی مانند Veolia و Aquatech در پروژه‌های بزرگ و پیچیده عملکرد خوبی دارند ولی هزینه‌های بالایی دارند. برندهایی مانند Saltworks و Oasys Water فناوری‌های نوآورانه با مصرف انرژی پایین ارائه می‌دهند ولی هنوز در مرحله توسعه صنعتی هستند.

محدودیت اصلی برای پیاده‌سازی و رشد سیستم‌های ZLD، هزینه‌های بالا و نیاز به طراحی سفارشی (برای لجن‌های خاص مانند لجن پتروشیمی) است. سیستم‌های مبتنی بر غشاء اکنون جایگزین سیستم‌های ZLD حرارتی می‌شوند (به‌علت هزینه‌های بالای انرژی). سیستم‌های ترکیبی نیز در حال حاضر با فیلتراسیون غشایی اولیه، تسخیر بازار را دنبال می‌کنند و لجن حاصله بعداً در تبخیرکننده‌ها تصفیه می‌شود. دستورالعمل‌های دقیق سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا^۱، آمریکای شمالی را به‌عنوان بازار پیشرو برای سیستم‌های ZLD تبدیل کرده است و در آینده با توجه به استانداردهای جدید محیط‌زیست، کشورهایی مانند هند و چین پیش‌تاز بازار خواهند بود. بر اساس گزارش‌های مختلف تحقیقات بازار، انتظار می‌رود نرخ رشد سالانه سیستم‌های ترکیبی ZLD طی سال‌های ۲۰۲۸-۲۰۱۸ به ترتیب از ۵/۸ تا ۱۲/۱ درصد برسد (Precedence research, 2024).

چشم‌انداز فرایندی و فناورانه

هر چند روش‌های مرسوم تصفیه پساب در از بین بردن برخی آلاینده‌ها مؤثر هستند، اما آنها اغلب با چالش‌های مربوط به مصرف انرژی، تولید لجن و تصفیه آلاینده‌های جدید مواجه هستند (Saravanan et al., 2021). در نتیجه، انگیزه زیادی برای کشف و استفاده از فناوری‌های پیشرفته وجود دارد که بتواند بر این موانع غلبه کند و سبب ارتقا پایداری محیط‌زیست شود (Agrawal et al., 2024). پیشرفت‌های فناورانه در سیستم ZLD، مانند تبخیرکننده‌ها و اسمز معکوس، به‌طور قابل توجهی انرژی مورد نیاز برای تصفیه پساب را در بازار سیستم‌های ZLD به حداقل می‌رساند. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در این زمینه باعث افزایش بهره‌وری انرژی در این سیستم می‌شود. بخش تبخیر / تبلور سهم قابل توجهی در بازار سیستم‌های ZLD در سال ۲۰۲۳ داشته است، چرا که فرآیند تبخیر و تبلور عمدتاً توسط تعدادی از صنایع به‌دلیل قابلیت‌های جداسازی و مدیریت پساب مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایندهای تبخیر و تبلور به‌طور مؤثری انواع مختلف پساب‌ها مانند آب نمک با محتوای بالا و آب با آلاینده‌های مختلف را جهت جداسازی آلاینده‌ها، مدیریت می‌کند. بخش مبتنی بر غشا نیز شاهد سریع‌ترین رشد در بازار سیستم‌های ZLD در طول دوره پیش‌بینی شده خواهد بود. افزایش تقاضا برای راه حل مقرون به صرفه و کارآمد تصفیه پساب صنعتی، تقاضا برای فناوری مبتنی بر غشاء را افزایش می‌دهد (Tong & Elimelech, 2016). برای مثال، فرایندهای نوظهور مبتنی بر غشاء مانند MD، FO و ED اکنون به‌عنوان جایگزین در سیستم‌های ZLD برای دستیابی به تغلیظ بیشتر بعد از فرآیند RO در حال ظهور هستند. در این حالت، آب نمک RO با استفاده از این فناوری‌ها قبل از وارد شدن به تبلور آب نمک یا حوضچه تبخیر بیشتر متمرکز می‌شود (Yaquab & Lee, 2019).

همچنین، شرکت Scaleban مدعی ارائه راهکاری نوآورانه و غیرحرارتی برای دستیابی به سیستم ZLD است که نیازی به اسمز معکوس یا تبخیرکننده ندارد. این فناوری بدون ایجاد رسوب، خوردگی یا گرفتگی زیستی، می‌تواند آب برج‌های خنک‌کننده را در چرخه‌های غلظت بالا^۲ تا ۲۰ با TDS تا ۳۰۰,۰۰۰ ppm مدیریت کند. Scaleban تأکید دارد که با کاهش سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی تا ۸۰٪، اجرای سریع، عملکرد ساده، و بازگشت سرمایه در بازه‌ی ۱۲ تا ۱۸ ماه را ممکن می‌سازد (Scalebanindia, 2023). چرخه‌های غلظت بالا در برج‌های خنک‌کننده به این معنی است که آب برج خنک‌کننده چند بار می‌تواند تبخیر شود و غلظت املاح در آن افزایش یابد، قبل از اینکه نیاز به تخلیه آب و جایگزینی با آب تازه باشد. به‌عبارت دیگر، COC نشان‌دهنده نسبت غلظت مواد معدنی در آب در گردش برج به غلظت آن‌ها در آب تازه ورودی است. بنابراین، با افزایش COC، مقدار آب تازه موردنیاز برای جبران تبخیر کاهش می‌یابد، که منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود (جویزی و

¹ U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

² Cycle of Concentration (COC)

پور سعادت، ۱۳۸۷). فناوری‌های غشایی مانند اسمز معکوس، اسمز پیشرو و نانوفیلتراسیون^۱ به دلیل توانایی آنها در بازیابی آب با انرژی کمتر در مقایسه با روش‌های حرارتی سنتی مورد استفاده در سیستم‌های معمول ZLD محبوبیت پیدا کرده‌اند (Chimeng, 2014). به دلیل محدودیت‌های موجود در فناوری‌های غشایی متعارف، روش‌های غشایی جایگزین توسعه داده شد تا مصرف انرژی کمتری نسبت به فناوری‌های حرارتی داشته باشند و تحمل بیشتری در برابر غلظت‌های بالای شوری نسبت به غشاهای متعارف از خود نشان دهند. این رویکردها شامل توسعه‌ی بیشتر غشاهای متعارف از طریق اصلاح مواد یا فرآیندها بود و اصلاح فناوری اسمز معکوس (RO) موارد زیر را در بر داشت:

- اسمز معکوس با فشار بالا: غشاهای HPRO قادر هستند فشاری بالاتر از ۸۲ بار را تحمل کنند و بنابراین می‌توانند شورابهایی با غلظت بیش از ۷۰،۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر را تصفیه کنند (Panagopoulos & Haralambous, 2019).
- اسمز معکوس با کمک اسمزی^۲: فناوری OARO، یک فناوری غشایی نوظهور است که از محلول جریان‌دهنده‌ای با فشار پایین در سمت نفوذپذیر غشاء استفاده می‌کند. این موضوع باعث کاهش اختلاف فشار اسمزی مورد نیاز می‌شود، در نتیجه امکان تصفیه آب با TDS بالا فراهم می‌شود، ضمن آنکه موجب افزایش شار آب و نرخ بازیابی تا حدود ۹۲٪ می‌شود (Panagopoulos & Haralambous, 2019).
- فرآیند تقویت‌شده با برش ارتعاشی^۳: فناوری VSEP با ایجاد نیروهای برشی ارتعاشی از طریق نوسان پیچشی در سطح غشاء، باعث افزایش بازده فیلتراسیون می‌شود. این مکانیسم منجر به عملکرد مستقل از میزان انحلال نمک‌ها یا وجود ذرات معلق و کلوئیدی در شورابه می‌شود (Subramani et al., 2012). مزایای اصلی VSEP عبارت‌اند از (Giwa et al., 2012):

- نرخ‌های بالای بازیابی آب در بازه ۸۰ تا ۹۳ درصد از شورابه‌های آب‌شور
- مقاومت در برابر رسوب‌گذاری روی غشاء
- کاهش فضای مورد نیاز نصب نسبت به فناوری‌های حرارتی

انتظار می‌رود بخش سیستم ZLD هوشمند، شاهد سریع‌ترین رشد در بازار سیستم‌های ZLD در طول دوره پیش‌بینی شده باشد. فناوری‌های هوشمند به بهبود مدیریت پساب در صنایع کمک می‌کند. سیستم ZLD هوشمند توسط صنایع مختلف از جمله صنایع الکترونیک، صنایع شیمیایی، صنایع داروسازی و غیره اجرا می‌شود (Precedence research, 2024). یکپارچگی بهره‌مندی از انرژی خورشیدی، گرمای هدر رفته و سایر منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های ZLD، اتکا به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد. در واقع، ادغام سیستم‌های ZLD با منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی، ابزاری قدرتمند برای کاهش اثرات محیط‌زیستی و هزینه‌های عملیاتی ارائه می‌دهد (Garvit & Jain, 2025). به‌عنوان مثال، تبخیر به‌کمک خورشید به‌عنوان یک راه حل مقرون به صرفه برای مناطق خشک در حال ظهور است. سیستم‌های پیشرفته ZLD، پسماندهای جامد را از طریق فرآیندهایی مانند تبدیل به گاز^۴ و هضم بی‌هوازی^۵ به انرژی تبدیل می‌کنند و به چرخه اقتصاد کمک می‌کنند. از طرفی، سیستم‌های ZLD برای بازیابی نمک‌ها و مواد معدنی با خلوص بالا از پساب در حال تکامل هستند. این محصولات جانبی را می‌توان مجدداً در فرآیندهای صنعتی استفاده کرد یا به فروش رساند و هزینه‌های عملیاتی را جبران کرد. امروزه، صنایعی مانند مواد غذایی و آشامیدنی بر استخراج ترکیبات آلی ارزشمند از پساب خود متمرکز هستند. این ترکیبات را می‌توان برای تولید انرژی یا کاربردهای کشاورزی استفاده کرد (Biznustek Global, 2025).

مدل‌های هوش مصنوعی ابزاری ارزشمند و قدرتمند برای پیش‌بینی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب هستند. آنها به‌طور گسترده برای حذف رنگ‌ها، فلزات سنگین، مواد آلی، جامدات، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌ها از آب طی فرآیند

¹ Nanofiltration (NF)

² Osmotically Assisted Reverse Osmosis (OARO)

³ Vibratory Shear Enhanced Processing (VSEP)

⁴ Gasification

⁵ Anaerobic digestion

تصفیه پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های هوش مصنوعی در زمینه‌های مرتبط با تصفیه پساب به‌ویژه در سال‌های اخیر محبوب‌تر شده‌اند و می‌توانند در سراسر فرآیند تصفیه پساب برای ساده سازی وظایف مختلف و دستیابی به نتایج دقیق‌تر مورد استفاده قرار گیرند (فاطمی‌نیا، ۱۴۰۳).

ادغام اینترنت اشیا^۱ و هوش مصنوعی^۲ در سیستم‌های ZLD تحولی در مدیریت پساب صنعتی ایجاد کرده است و مسیرهای آینده برای سیستم‌های ZLD مبتنی بر اینترنت اشیا و هوش مصنوعی و پتانسیل آن‌ها را برای افزایش کارایی، پایداری و انطباق با مقررات در کاربردهای صنعتی برجسته می‌کند. ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار سیستم، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و تشخیص ناهنجاری در سیستم‌های ZLD به‌منظور کاهش زمان خرابی استفاده می‌شوند. هوش مصنوعی توضیح می‌دهد که چگونه الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند داده‌های دستگاه‌های اینترنت اشیا را برای پیش‌بینی نیازهای تعمیر و نگهداری، بهینه‌سازی مصرف انرژی و اطمینان از انطباق سازگار با استانداردهای محیطی تجزیه و تحلیل کنند. بنابراین، دستگاه‌ها و حسگرهای اینترنت اشیا، نظارت بر زمان واقعی سیستم‌های ZLD را امکان‌پذیر می‌کنند و این کار عملکرد بهینه، تشخیص زودهنگام خطاها و مدیریت بهتر منابع را تضمین می‌کند. از طرفی، فناوری دوقلوی دیجیتال یک کپی مجازی از یک سیستم ZLD ایجاد می‌کند و به اپراتورها امکان می‌دهد که فرآیندها را شبیه‌سازی کنند، ناکارآمدی‌ها را شناسایی کرده و بدون ایجاد اختلال در عملیات، پیشرفت‌ها را پیاده‌سازی کنند. در واقع، ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال کارایی کلی و مقرون به صرفه بودن سیستم‌های ZLD را افزایش می‌دهند (Precedence research, 2024; Devadhas, 2025).

از جمله مواردی که در تحول دیجیتال و هوش مصنوعی برای سیستم‌های ZLD می‌توان به آن اشاره کرد، اینکه در سپتامبر ۲۰۲۲، "وئولیا واتر تکنولوژی"^۳ همکاری خود را با "اورنج بیزینس سروایس"^۴ اعلام کرد. این مشارکت به تقویت زیرساخت‌های جمع‌آوری داده‌های تجاری و پلتفرم راه‌حل‌های دیجیتال "هاب گرید"^۵ شرکت "وئولیا واتر تکنولوژی" کمک می‌کند. پلتفرم دیجیتال "هاب گرید" به مشتریان خود اجازه می‌دهد تا از راه دور کارخانه‌ها و تجهیزات تصفیه آب را مشاهده، پیش‌بینی و بهینه کنند. در ژوئن ۲۰۲۱، "آکواتک اینترنشنال"^۶ یک سرمایه‌گذاری مشترک با "پول و اتر"^۷ (یک شرکت پیشرو دارای فناوری آب) را اعلام کرد. این سرمایه‌گذاری مشترک، پلتفرم "اکیوس"^۸ را ارائه می‌دهد که آکواتک را قادر می‌سازد تا تصفیه و خدمات یکپارچه آب را به مشتریان ارائه دهد و بهترین فناوری و عملیات آکواتک را بدون هیچ هزینه اولیه یکپارچه می‌کند (Liang et al., 2021).

زمینه‌های مطالعاتی و فرصت‌های پژوهشی سیستم‌های ZLD

با توجه به چالش‌هایی که به آن‌ها اشاره شد و تلاش‌هایی که توسط صاحبان فناوری‌ها، سازندگان تجهیزات و بهره‌بردارها انجام شده و نیز خلاءهای تحقیقاتی موجود و اقدامات مطالعاتی اندک در خصوص سیستم‌های ZLD در کشور، زمینه‌های مطالعاتی و فرصت‌های پژوهشی پیشنهادی زیر معرفی می‌شود:

۱- زمینه‌های مطالعاتی

- توسعه غشاهای مقاوم در برابر رسوب و خوردگی با هدف طراحی غشاهای با تحمل TDS بالا و کاهش گرفتگی.
- ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر با فرآیندهای ZLD به منظور استفاده از انرژی خورشیدی یا گرمای اتلافی برای کاهش مصرف انرژی.

¹ Internet of Things (IoT)

² Artificial intelligence (AI)

³ Veolia Water Technologies

⁴ Orange Business Services

⁵ Hubgrade

⁶ Aquatech International

⁷ Upwell Water

⁸ AQUIOS

- بازیابی منابع از پسماند جامد (نمک‌ها، فلزات، مواد آلی) با هدف تبدیل پسماند به محصولات قابل فروش یا استفاده مجدد جهت جبران بخشی از هزینه و حفظ الزامات محیط‌زیستی.
- استفاده از فرآیندهای اکسایش پیشرفته برای حذف آلاینده‌های آلی با به‌کارگیری فرآیندهایی مانند فنتون، ازون و اکسایش کاتالیستی برای تجزیه مواد آلی مقاوم.
- طراحی سیستم‌های هوشمند کنترل خودکار با استفاده از سنسورها و هوش مصنوعی و اینترنت اشیا برای بهینه‌سازی عملکرد و کاهش خطاء در سیستم‌های ZLD.

۲- فرصت‌های پژوهشی

- مطالعه تطبیقی بین فناوری‌های ZLD تجاری‌شده در ایران و جهان با شاخص‌های اقتصادی و محیط‌زیستی.
- طراحی سیستم‌های ZLD بومی با بهره‌برداری آسان‌تر، مصرف انرژی کمتر و قیمت رقابت پذیرتر با نمونه‌های خارجی.
- بررسی امکان محصول قابل استفاده در بخش‌های کشاورزی، ساختمانی یا استخراج منابع با بازیافت شورابه‌های تغلیظ‌شده در سیستم‌های ZLD.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش مشکلات محیط‌زیستی ناشی از تولید پساب‌های صنعتی، کمبود منابع آب و تشدید مقررات مربوط به دفع پساب‌ها، استفاده از سیستم ZLD به‌عنوان یک راه‌کار پایدار در مدیریت پساب صنعتی اهمیت زیادی پیدا کرده است. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که ZLD نه تنها در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، بلکه در صنایع شیمیایی، دارویی، نیروگاهی و معدنی و غذایی نیز کاربرد دارد. با وجود مزایای قابل توجهی مانند کاهش مصرف آب تازه، رعایت الزامات قانونی و مدیریت پساب و بازیابی مواد ارزشمند، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، مصرف انرژی زیاد، و پیچیدگی عملیاتی مانع از گسترش سریع این فناوری در همه صنایع شده‌اند. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری‌های غشایی، تبخیرکننده‌های کم‌مصرف، و سیستم‌های پایش هوشمند بابت همکاری شرکت‌های تولیدی با شرکت‌های دانش بنیان فعال در این خصوص، نویدبخش کاهش این محدودیت‌ها هستند. برای بهینه‌سازی در سیستم‌های فعلی ZLD و بهره‌برداری مؤثر از این فناوری، لازم است که صنایع با توجه به نوع پساب، اهداف محیط‌زیستی، و ظرفیت‌های فنی خود، طراحی و انتخاب فناوری مناسب را انجام دهند. در نهایت، گسترش استفاده از ZLD نیازمند حمایت‌های دولتی، مشوق‌های مالی و آموزش نیروی انسانی متخصص حرفه‌ای است تا بتواند به‌عنوان یک استاندارد جدید در مدیریت پساب صنعتی جایگاه خود را تثبیت کرده و ذی‌نفعان را افزایش دهد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری سرکار خانم پریسا کرمی‌مهر در نگارش این مقاله، صمیمانه تشکر می‌کنم.

منابع

- حسینی ثابت، سید مسعود (۱۳۹۶). معرفی فناوری‌های نوین در بازچرخانی آب در کشاورزی، صنایع و سایر مصارف آب. وزارت جهاد کشاورزی، مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی.
- حویزی، جمال‌الدین؛ پور سعادت، مجید (۱۳۸۷). افزایش راندمان و سیکل تغلیظ برج‌های خنک‌کننده و کاهش ریسک رسوب‌گذاری در مبدل‌های حرارتی. مجموعه مقالات اولین کنفرانس پتروشیمی ایران، تهران.
<https://civilica.com/doc/42591>
- شکرالله زاده سهیلا؛ فولادوند، محمدتقی (۱۴۰۲). سامانه تخلیه مایع صفر (ZLD): مروری بر رویکردهای نوین در بازیابی آب از منابع آبی نامتعارف. دو ماهنامه مهندسی شیمی ایران، شماره ۱۳۰، دوره ۲۲، صفحات ۲۶-۷.

- عزیزی، مجتبی؛ اصغرزاده، مهدی؛ عبدالملکی، عباس؛ رشیدی، فریبرز (۱۴۰۳). شبیه‌سازی، بهینه‌سازی بررسی فنی و اقتصادی تصفیه پساب فلزات سنگین سمی به‌روش تخلیه صفر مایع (ZLD). *فصلنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز*، ۵(۳)، ۲۰-۱.
- فاطمی‌نیا، رضا (۱۴۰۳). هوش مصنوعی، ابزاری قدرتمند در توسعه و ارتقا رقابت پذیری صنایع پتروشیمی. مجموعه- مقالات هشتمین کنفرانس بین‌المللی توسعه فناوری در مهندسی شیمی، تهران. <https://civilica.com/doc/2242800>
- نوشادی، مسعود و افسری، محمد (۱۳۹۹). تعیین فرآیند بهینه ZLD برای استفاده دوباره از پساب سیستم‌های اسمز معکوس (مطالعه موردی: سیستم اسمز معکوس شهرستان لار). *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۴(۲)، صفحات ۱۴۳-۱۳۱.
- Agrawal, R., Agrawal, S., Samadhiya, A., Kumar, A., Luthra, S., & Jain, V. (2024). Adoption of green finance and green innovation for achieving circularity: An exploratory review and future directions. *Geoscience frontiers*, 15(4), 101669.
- Aksenov, V., Tsarev, N., Nichkova, I., & Tatyannikova, E. (2020). Zero liquid discharge (ZLD) industrial wastewater treatment systems as sustainable development basic ecological components. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering (Vol. 972, No. 1, p. 012037)*. IOP Publishing.
- Alspach, B., & Juby, G. (2018). Cost-effective ZLD technology for desalination concentrate management. *Journal AWWA*, 110(1), 37-47.
- Barrington, D. J., & Ho, G. (2014). Towards zero liquid discharge: the use of water auditing to identify water conservation measures. *Journal of Cleaner Production*, 66, 571-576.
- Biznustek Global, USA, Future Trends in Zero Liquid Discharge Technologies <https://www.linkedin.com/company/biznustekglobal> (accessed on 10 February, 2025).
- Bjorklund, D. (2017). ZLD Success Factors. <https://www.power-eng.com. operations-maintenance/ ZLD Success Factors>.
- Chaturvedi, R. (2025). Introduction to Zero Liquid Discharge (ZLD): A Growing Global Concern. In *Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System: From Introduction to Application* (pp. 1-9). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Chen, Q., Burhan, M., Shahzad, M. W., Ybyraiykul, D., Akhtar, F. H., Li, Y., & Ng, K. C. (2021). A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment. *Desalination*, 502, 114928.
- D. D.. Sahithya and M. V. V. C.. Lakshmi. (2023). Comparative Study of Two ZLD Treatment Plants. *ijmst*, vol. 10, no. 2, pp. 2743-2751.
- Díaz, O., Segredo-Morales, E., Figueira, A., & González, E. (2022). Research trends on desalination: zero-liquid discharge of brine (ZLD). *Desalination and Water Treatment*, 273, 1-12.
- [Garvit K. Jain](https://scalebanindia.co.in/2025/04/what-is-zero-liquid-discharge-why-is-it-important) (2025). what is zero liquid discharge and why is it important. <https://scalebanindia.co.in/2025/04/what-is-zero-liquid-discharge-why-is-it-important>.
- Giwa, A [A.], Dufour, V., Al Marzooqi, F., Al Kaabi, M., & Hasan, S. W. (2017). Brine management methods: Recent innovations and current status. *Desalination*, 407, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.12.008>
- Glan Devadhas, G., Muthalakshmi, S., Jameer Basha, S.K., Selvi, V., Sathik Basha, J. (2025). Future Directions for IoT and AI-Based Zero Liquid Discharge (ZLD) Systems in Industrial Applications. In: Parray, J.A., Li, WJ., Haghi, A.K. (eds) *Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System*. Springer Water. Springer, Cham.
- Hosseinipour, E., & Davies, P. A. (2024). Effect of membrane properties on the performance of batch reverse osmosis (RO): the potential to minimize energy consumption. *Desalination*, 577, 117378.
- Hövel, T. (2021). Discussion of Zero Liquid Discharge as a solution for desalination brine management- A case study at Desolenator's project in Dubai.
- [Hpe Marketting Team](https://hoaphat-eco.com/en/zero-liquid-discharge-zld) (2023). Zero liquid discharge (zld). <https://hoaphat-eco.com/en/zero-liquid-discharge-zld>.
- Jafarnejad, S., & Jiang, S. C. (2019). Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103326.

- Koech, L., Rutto, H., Lerotholi, L., Everson, R. C., Neomagus, H., Branken, D., & Moganelwa, A. (2021). Spray drying absorption for desulphurization: a review of recent developments. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(6), 1665-1686.
- Kress, N. (2019). Desalination Technologies. In N. Kress (Ed.), *Marine Impacts of Seawater Desalination* (pp. 11–34). Elsevier.
- Liang, Y., Lin, X., Kong, X., Duan, Q., Wang, P., Mei, X., & Ma, J. (2021). Making waves: zero liquid discharge for sustainable industrial effluent management. *Water*, 13(20), 2852.
- Liao, B., Zeng, X., Ling, Z., Zhao, S., Li, B., & Han, X. (2025). Recent Advances in Zero Discharge Treatment Technologies for Desulfurization Wastewater in Coal-Fired Power Plants: A Mini-Review. *Processes*, 13(4), 982.
- Menon, A. K., Haechler, I., Kaur, S., Lubner, S., & Prasher, R. S. (2020). Enhanced solar evaporation using a photo-thermal umbrella for wastewater management. *Nature Sustainability*, 3(2), 144-151.
- Modi, D. & Modi, Shivam.(2020). <https://www.linkedin.com/pulse/zero-liquid-discharge-green-technology-ict-green-technology>.
- Modi, R., Kavaia, A. R., Vanzara, P. B., & Raval, H. D. (2022). Membranes in zero-liquid-discharge systems for efficient processes toward sustainable environment: A review. *Journal of Environmental Engineering*, 148(11), 03122004.
- Mohammadi, S., Ahmadi, M. H., & Ehsani, R. (2024). Investigating the effect of effective parameters on the optimization of zero liquid discharge system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 1380-1390.
- Mov Chimeng, 2014, Development of a Zero Liquid Discharge Approach for Cooling Tower Blowdown in Petrochemical Industry, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Environmental Engineering and Management, *Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development Thailand*.
- Muhammad, Y., & Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. *The Science of the Total Environment*, 681, 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>
- Namdeti, R. (2023). Revolutionizing water sustainability: a comprehensive exploration of zero liquid discharge strategies. *Power Syst. Technol.* 47 (2)(2023).
- Nibe, R. L., Hinge, R. V., Divate, S. B. (2022). Wastewater Treatment By Zero Liquid Discharge Process (ZLD) Journal: JETIR, Volume 9, Issue 4.
- Oren, Y., Korngold, E., Daltrophe, N., Messalem, R., Volkman, Y., Aronov, L. & Gilron, J. (2010). Pilot studies on high recovery BWRO-EDR for near zero liquid discharge approach. *Desalination*, 261(3), 321-330.
- Panagopoulos, A. (2020a). A comparative study on minimum and actual energy consumption for the treatment of desalination brine. *Energy*, 118733.
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery – Analysis, challenges and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104418.
- Panagopoulos, A., & Michailidis, P. (2025). Membrane technologies for sustainable wastewater treatment: Advances, challenges, and applications in zero liquid discharge (zld) and minimal liquid discharge (mld) systems. *Membranes*, 15(2), 64.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review. *Science of the Total Environment*, 693, 133545.
- Patel, K., Aghera, R., Mistry, D., & Jasrotia, E. (2017). A zero liquid discharge in pharmaceutical industry. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 4(5), 1110-1114.
- Poirier, K., Al Mhanna, N., & Patchigolla, K. (2022). Techno-economic analysis of brine treatment by multi-crystallization separation process for zero liquid discharge. *Separations*, 9(10), 295.
- Precedence research (2025). Zero liquid discharge systems market. <https://www.precedenceresearch.com/zero-liquid-discharge-systems-market>
- Pundir, A., Thakur, M. S., Radha, Goel, B., Prakash, S., Kumari, N.,... & Kumar, M. (2024). Innovations in textile wastewater management: a review of zero liquid discharge technology. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12597-12616.

- Rabiei, S., & Paterson, A. H. (2025). The Effect of Membrane Surface Hydrophobicity on the Performance and Water Production Cost of a Desalination Unit. *Membranes*, 15(2), 63.
- Radha, Sharma, N., Prakash, S., Kumari, N., Sharma, D., Laller, R.,... & Puri, S. (2025). From challenges to opportunities: exploring minimum liquid discharge and zero liquid discharge strategies for wastewater management and resource recovery. In *Role of science and technology for sustainable future: Volume 2-applied sciences and technologies* (pp. 371-394). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Rajamani, S. (2016). Novel industrial wastewater treatment integrated with recovery of water and salt under a zero liquid discharge concept. *Reviews on Environmental Health*, 31(1), 63-66.
- Rathoure, A. K. (2020). Zero liquid discharge treatment systems: prerequisite to industries. *MOJ Ecol. Environ. Sci*, 5, 1-10.
- Research and Markets (2021). Zero Liquid Discharge Systems Market Size, Share & Analysis, by System, by Technology, and by End-Use, and by Region, Forecast 2018–2028. Available online: [Research and Markets.com](https://www.researchandmarkets.com) (accessed on 4 September 2021).
- Ricky, R., Shanthakumar, S., Ganapathy, G. P., & Chiampo, F. (2022). Zero liquid discharge system for the tannery industry—an overview of sustainable approaches. *Recycling*, 7(3), 31.
- Saiyad, M., Shah, N., Shettyan, U., Modi, H., Joshipura, M., Dwivedi, A., & Pillai, S. (2025). Zero Liquid Discharge in the Dye Intermediate Industry with the Primary Treatment Method. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 29(1), 04024034.
- Salih, M. H., Al-Alawy, A. F., & Ahmed, T. A. (2021, November). Oil skimming followed by coagulation/flocculation processes for oilfield produced water treatment and zero liquid discharge system application. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2372, No. 1, p. 060006). AIP Publishing LLC.
- Santoro, S., Avci, A. H., Aquino, M., Pugliese, L., Straface, S., & Curcio, E. (2021). Towards the global rise of zero liquid discharge for wastewater management: the mining industry case in Chile. In *Cost-efficient Wastewater Treatment Technologies: Engineered Systems* (pp. 505-518). Cham: Springer International Publishing.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595.
- Scaleban. (2024). Advantages of scaleban technology over MEE-evaporator. <https://scalebanindia.co.in/2024/03/5-advantages-of-scaleban-technology-over-mee-evaporator>
- Scaleban.(2023). Scaleban case study – project at Indorama Petrochem Ltd (IRPL), Thailand. <https://scalebanindia.co.in/2023/10/indorama>
- Scaleban.(2023). Scaling up zero liquid discharge for large facilities. <https://scalebanindia.co.in/2023/10/scaling-up-zero-liquid-discharge-for-large-facilities>
- Shafi, H. Z., Zubair, S. M., Matin, A., Alnoor, O., Kafiah, F., & Mahmood, A. (2018). Concentrate management technologies for desalination processes leading to zero liquid discharge: technologies, recent trends and future outlook. *Desalination and Water Treatment*, 105, 92-118.
- Shah, A. V., Varjani, S., Srivastava, V. K., & Bhatnagar, A. (2020). Zero liquid discharge (ZLD) as sustainable technology—challenges and perspectives. *NISCAIR-CSIR, India*.
- Shende, A. D., Chelani, A. B., Rao, N. N., & Pophali, G. R. (2021). Optimal selection of “zero liquid discharge” (ZLD) system using “analytical hierarchy process” (AHP) and “grey relational analysis” (GRA). *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), 8506-8523.
- Subramani, A., DeCarolis, J., Pearce, W., & Jacangelo, J. G. (2012). Vibratory shear enhanced process (VSEP) for treating brackish water reverse osmosis concentrate with high silica content. *Desalination*, 291, 15–22
- Tong, T., & Elimelech, M. (2016). The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental science & technology*, 50(13), 6846-6855.
- Veolia (2023). ZLD at the World’s Largest GTL Plant – Shell Pearl Qatar. <https://www.veoliawatertech.com/en/case-studies/zld-worlds-largest-gas-liquid-plant>

- Visvanathan, C. (2013). Needs and Opportunities for Zero Liquid Discharge in Industries. Zero Liquid Discharge in Industries Training Program. *Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development Thailand*.
- Weaver, R., & Birch, H. (August 2020). *Desalination Market Update: GWI DesalData Market Assessment Webinar*. Gwi Desaldata.
- Weimer, L. (2015). The global push for zero. <http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-30/issue-1/technology-case-studies/the-global-push-for-zero.html>.
- Yaquub, M., & Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. *Science of the total environment*, 681, 551-563.