IJPCBS
International Journal of Physics, Chemistry and Biological Sciences (IJPCBS)
مجله بین‌المللی فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی
https://ijpcbs.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۵

بررسی جامع فناوری‌های نوین در تصفیه آب تولیدی همراه نفت: از رویکردهای غشایی تا فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و بازیابی منابع

محمد علی جبرائیلی

کارشناسی مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت واحد اهواز، اهواز، ایران

mohammad.ali.jebraeili@gmail.com

چکیده

آب تولیدی همراه نفت (Water Produced) بزرگترین جریان پسماند حاصل از صنایع نفت و گاز در سراسر جهان محسوب می‌شود که حجم روزانه آن به بیش از ۴۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. این آب دارای شوری بسیار بالا (کل جامدات محلول تا ۴۰۰,۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، ترکیبات آلی پیچیده، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو طبیعی است که تصفیه آن را به چالشی اساسی تبدیل کرده است. این مقاله مروری به بررسی سیستماتیک فناوری‌های نوین تصفیه آب تولیدی با تأکید بر رویکردهای یکپارچه و پایدار می‌پردازد. فناوری‌های غشایی پیشرفته شامل اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون با غشاهای کامپوزیت حاوی نانوذرات، و اسمز رو به جلو با غشاهای حاوی چارچوب‌های آلی-فلزی تیتانیوم مورد تحلیل قرار می‌گیرند. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته از جمله ازن‌زنی، فرآیند فنتون، فتوکاتالیست ناهمگن و اکسیداسیون پرسولفات برای تخریب آلاینده‌های آلی مقاوم بررسی می‌شوند. فناوری‌های حرارتی نوظهور مانند نمک‌زدایی انجمادی کسری و تبخیر حرارتی افقی با قابلیت بازیابی مواد معدنی ارزشمند (لیتیوم، ید، برم، استرانسیم) تحلیل می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی غشایی-حرارتی با پیش‌تصفیه مناسب می‌توانند تا ۹۹٪ یون‌ها را حذف کرده و آب تصفیه شده قابل استفاده در کشاورزی، تزریق به مخازن یا آبیاری فضای سبز تولید نمایند. رویکرد اقتصاد چرخشی مبتنی بر بازیابی همزمان آب و مواد معدنی ارزشمند، ضمن کاهش هزینه‌های دفع تا ۵۵٪، پتانسیل درآمد سالانه تا ۸۲۰,۰۰۰ دلار در هر چاه را فراهم می‌کند. این مقاله با ارائه یک نقشه راه جامع برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه یکپارچه، زمینه را برای حرکت از رویکرد دفع پسماند به سمت مدیریت پایدار منابع در صنعت نفت فراهم می‌آورد.

واژگان کلیدی: آب تولیدی همراه نفت، تصفیه غشایی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، نمک‌زدایی انجمادی، بازیابی منابع

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۵

۱. مقدمه

صنعت نفت و گاز همچنان به عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین انرژی جهان ایفای نقش می‌کند، اما این صنعت با چالش زیست‌محیطی قابل توجهی به نام «آب تولیدی» (Water Produced) مواجه است. آب تولیدی بزرگترین جریان پسماند حاصل از فرآیندهای اکتشاف و تولید نفت و گاز محسوب می‌شود که حجم روزانه آن در سطح جهانی از ۴۰ میلیون مترمکعب فراتر می‌رود (Yelatontsev و Mukhachev، ۲۰۲۶). در حوضه پرمین در ایالات متحده که بزرگترین منطقه تولید نفت خام در این کشور است، روزانه تقریباً ۲.۷۳ میلیون مترمکعب آب تولیدی تولید می‌شود که از این میزان تنها ۵۶٪ برای ازدیاد برداشت نفت و شکافت هیدرولیکی تزریق مجدد می‌شود و مابقی باید از طریق چاه‌های تزریق آب شور دفع گردد (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

آب تولیدی به دلیل ماهیت زمین‌شناسی و فرآیندهای استخراج، دارای ترکیبی بسیار پیچیده و آلاینده‌های متنوعی است. میانگین کل جامدات محلول (TDS) در آب تولیدی حوضه پرمین بین ۱۰۰ تا ۱۳۰ گرم در لیتر است که سه تا چهار برابر شوری آب دریا می‌باشد (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶). علاوه بر شوری بالا، این آب حاوی مقادیر قابل توجهی هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، فلزات سنگین (مانند سرب، آرسنیک، کادمیوم)، و مواد رادیواکتیو طبیعی (NORMs) است (Zhang و همکاران، ۲۰۲۴). دفع مستقیم این آب به محیط زیست یا تزریق به چاه‌های عمیق نه تنها مخاطرات جدی برای اکوسیستم‌های آبی و خاک ایجاد می‌کند، بلکه با افزایش فشار زیرزمینی، موجب تحریک زمین‌لرزه‌های القایی نیز می‌گردد (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

از سوی دیگر، کمبود منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق تولیدکننده نفت، به ویژه در خاورمیانه و غرب ایالات متحده، رویکردهای نوینی را برای استفاده مجدد از آب تصفیه شده تولیدی به عنوان منبع آب جایگزین ایجاد کرده است. بازچرخانی آب تولیدی می‌تواند ضمن کاهش فشار بر منابع آب شیرین، به احیای بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کرده و امنیت آبی مناطق صنعتی را تأمین نماید (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶). با این حال، غلظت بالای آلاینده‌ها و ماهیت پیچیده این آب، روش‌های متعارف تصفیه را با چالش‌های جدی مانند گرفتگی غشاها (Fouling)، تشکیل رسوب (Scaling)، و راندمان پایین حذف ترکیبات آلی مقاوم مواجه ساخته است (Zhang و همکاران، ۲۰۲۴).

در پاسخ به این چالش‌ها، طی سال‌های اخیر فناوری‌های نوین متعددی برای تصفیه آب تولیدی توسعه یافته‌اند. این فناوری‌ها را می‌توان در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) فرآیندهای غشایی پیشرفته شامل اسمز معکوس (RO)، نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز رو به جلو (FO) با غشاهای نانوکامپوزیت، (۲) فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) مانند ازن‌زنی، فرآیند فنتون، فتوکاتالیست و اکسیداسیون پرسولفات، (۳) فرآیندهای حرارتی نوظهور مانند نمک‌زدایی انجمادی کسری (FD) و تقطیر غشایی (MD)، و (۴) فناوری‌های نوین مانند تخلیه الکتریکی پلاسما و غشاهای کاتالیزوری چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs) (Yelatontsev و Mukhachev، ۲۰۲۶؛ Manakhov و همکاران، ۲۰۲۵).

جدول ۱: مشخصات کیفی معمول آب تولیدی حوضه پرمین و مقایسه با آب دریا

پارامتر	واحد	آب تولیدی حوضه پرمین	آب دریا
کل جامدات محلول (TDS)	mg/L	۱۳۰,۰۰۰ – ۱۰۰,۰۰۰	~۳۵,۰۰۰
سدیم (Na^+)	mg/L	۴۵,۰۰۰ – ۳۰,۰۰۰	۱۰,۸۰۰
کلرید (Cl^-)	mg/L	۷۵,۰۰۰ – ۵۵,۰۰۰	۱۹,۵۰۰
کلسیم (Ca^{2+})	mg/L	۱۵,۰۰۰ – ۵,۰۰۰	۴۲۰
منیزیم (Mg^{2+})	mg/L	۳,۰۰۰ – ۱,۰۰۰	۱,۳۵۰
سولفات (SO_4^{2-})	mg/L	۲,۰۰۰ – ۵۰۰	۲,۷۰۰
بیکربنات (HCO_3^-)	mg/L	۱,۰۰۰ – ۲۰۰	۱۴۰
استرانسیوم (Sr^{2+})	mg/L	۳,۰۰۰ – ۱,۰۰۰	۸
باریوم (Ba^{2+})	mg/L	۵۰۰ – ۵۰	۰.۰۲
سیلیس (SiO_2)	mg/L	۱۰۰ – ۲۰	۵
نفت خام (TPH)	mg/L	۵۰۰ – ۵۰	–

منبع: برگرفته و تطبیق یافته از Edirisooriya و همکاران (۲۰۲۶) و Yelatontsev و Mukhachev (۲۰۲۶)

علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در هر یک از این فناوری‌ها، هیچ فناوری واحدی قادر به تصفیه کامل آب تولیدی به طور مستقل نیست و مطالعات اخیر به طور قاطع نشان داده‌اند که رویکردهای یکپارچه و ترکیبی (Trains Treatment Hybrid) با تلفیق چند فناوری مکمل، بهترین کارایی را ارائه می‌دهند (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، رویکرد نوظهور «اقتصاد چرخشی» در مدیریت آب تولیدی، بر بازیابی همزمان آب تصفیه شده و مواد معدنی ارزشمند (لیتیوم، ید، برم، استرانسیم، روبیدیم و سزیم) تأکید دارد که می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌های تصفیه، جریان‌های درآمدی جدیدی برای صنعت نفت ایجاد نماید (Yelatontsev و Mukhachev، ۲۰۲۶).

هدف این مقاله مروری سیستماتیک، ارائه تحلیلی جامع از فناوری‌های نوین تصفیه آب تولیدی همراه نفت است. این مقاله با بررسی عمیق مبانی علمی، عملکرد، مزایا و محدودیت‌های هر دسته از فناوری‌ها، به دنبال ارائه یک نقشه راه برای طراحی سیستم‌های یکپارچه تصفیه با قابلیت تولید آب قابل استفاده در مصارف مختلف (کشاورزی، مصارف صنعتی، آبیاری فضای سبز و تزریق به مخازن) و بازیابی مواد باارزش است. نوآوری این مقاله در تلفیق سه رویکرد «تصفیه غشایی پیشرفته»، «اکسیداسیون شیمیایی» و «بازیابی منابع» در قالب یک چارچوب تحلیلی یکپارچه است که می‌تواند مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه نسل آینده قرار گیرد.

۲. فناوری‌های غشایی پیشرفته

۲.۱. اسمز معکوس و چالش شوری بالا

اسمز معکوس (Osmosis Reverse) به عنوان پیشرفته‌ترین فناوری نمک‌زدایی، به طور گسترده برای تصفیه آب‌های شور و لب‌شور مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری بر پایه اعمال فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از فشار اسمزی محلول، آب را از میان غشای نیمه‌تراوا عبور داده و نمک‌ها و آلاینده‌ها را پس می‌زند. با این حال، کاربرد مستقیم اسمز معکوس برای آب تولیدی به دلیل سه عامل اصلی با شکست مواجه می‌شود: (۱) شوری بسیار بالای آب تولیدی که فشار اسمزی فوق‌العاده بالایی ایجاد کرده و مصرف انرژی را به طور تصاعدی افزایش می‌دهد، (۲) حضور ترکیبات آلی و هیدروکربن‌ها که به سرعت باعث گرفتگی (Fouling) غشا می‌شوند، و (۳) وجود یون‌های رسوب‌گذار مانند کلسیم، باریوم و استرانسیوم که در تماس با سولفات باقیمانده، رسوبات سخت (Scaling) روی سطح غشا تشکیل می‌دهند (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

سیستم‌های اسمز معکوس تجاری معمولاً برای آب با TDS تا حدود ۴۰,۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر طراحی می‌شوند و استفاده از آنها برای آب تولیدی با TDS بیش از ۱۰۰,۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، نیازمند پیش‌تصفیه مؤثری است که شوری و پتانسیل گرفتگی را کاهش دهد. در این راستا، رویکرد ترکیبی «نمک‌زدایی انجمادی + اسمز معکوس آب دریا (SWRO)» به عنوان یک راهکار امیدوارکننده مطرح شده است (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

۲.۲. غشاهای نانوکامپوزیت تیتانیومی در اسمز رو به جلو

اسمز رو به جلو (Osmosis Forward) به عنوان یک فناوری غشایی کم‌فشار و کم‌مصرف، توجه قابل توجهی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. در این فرآیند، جریان آب به طور طبیعی و بدون نیاز به فشار هیدرواستاتیکی، از محلول خوراک (آب تولیدی) به سمت محلول استخراج (Solution Draw) با اسمولاریته بالاتر حرکت می‌کند. مزایای اصلی اسمز رو به جلو شامل مصرف انرژی پایین، گرفتگی کمتر و برگشت‌پذیر غشا، و عدم نیاز به فشار هیدرواستاتیکی بالا است (Al-Jubouri و همکاران، ۲۰۲۵).

با این حال، غشاهای اسمز رو به جلو مرسوم از شار آب پایین و شار معکوس نمک بالا (Flux Salt Reverse) رنج می‌برند که ناشی از پلاریزاسیون غلظت داخلی (Polarization Concentration Internal) است. برای رفع این محدودیت‌ها، محققان به توسعه غشاهای کامپوزیت لایه نازک (Composite Film Thin) و نانوکامپوزیت لایه نازک (Nanocomposite Film Thin) روی آورده‌اند.

در مطالعه پیشگامانه‌ای، Al-Jubouri و همکاران (۲۰۲۵) از چارچوب آلی-فلزی (MOF) MIL-۱۲۵(Ti)-NH_2- به عنوان نانوپرکننده در ساختار پلی‌آمید غشاهای TFC استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزودن این پرکننده‌های تیتانیومی، زاویه تماس آب را تا ۳۳٪ کاهش داده (افزایش آب‌دوستی) و زبری سطح را تقریباً ۳۱٪ افزایش می‌دهد. افزایش زبری سطح به معنای افزایش سطح مؤثر تماس با آب است که خود منجر به افزایش شار آب عبوری می‌گردد. مهم‌تر اینکه، غشاهای TFN حاوی ۱.۰ درصد وزنی پرکننده MIL-۱۲۵(Ti)-NH_2-، افزایش ۲۴۰ درصدی در شار آب و کاهش قابل توجه شار معکوس نمک را نسبت به غشاهای TFC بدون پرکننده نشان دادند.

مکانیسم اصلی این بهبود عملکرد، دو عامل است: (۱) ایجاد کانال‌های اضافی برای نفوذ آب به دلیل حضور نانوپرکننده‌ها در ماتریس پلیمری، و (۲) تشکیل پیوندهای غیرکووالانسی بین گروه‌های آمین (NH_2) موجود در ساختار MOF و مولکول‌های آب که جذب آب را تسهیل می‌کند (Al-Jubouri و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، پایداری بالای NH_2-MIL-۱۲۵(Ti) در محیط آبی و مقاومت شیمیایی مناسب آن، این غشاها را برای تماس طولانی‌مدت با آب تولیدی حاوی حلال‌های آلی و هیدروکربن‌ها مناسب می‌سازد.

۲.۳. غشاهای نانوفیلتراسیون حاوی نانوفرایت‌ها

نانوفیلتراسیون (Nanofiltration) پلی بین اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس است و قادر به حذف یون‌های دوظرفیتی (کلسیم، منیزیم، سولفات) و مولکول‌های آلی با وزن مولکولی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دالتون است. با این حال، عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون متعارف در حذف فلزات سنگین از آب تولیدی محدود است. برای بهبود این عملکرد، تلفیق نانوذرات مغناطیسی و کاتالیزوری در ماتریس پلی‌سولفون (PSF) مورد توجه قرار گرفته است.

Abdollahi و همکاران (۲۰۲۵) نانوذرات فروتیت روی-کبالت (Zn_1-$xCoxFe_2O_4$) را به روش هیدروترمال سنتز کرده و در ماتریس غشاهای PSF توزیع نمودند. نتایج نشان داد که افزودن نانوفرایت‌ها (با اندازه ۲۹–۴۵ نانومتر) به طور قابل توجهی آب‌دوستی غشا را افزایش داده و مقاومت در برابر گرفتگی را بهبود می‌بخشد. یون‌های فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و آرسنیک به دلیل بار سطحی مثبت نانوفرایت‌ها و اندازه نانومتری منافذ، به طور مؤثری جذب و حذف می‌شوند. نکته قابل توجه، اثر هم افزایی بین خواص مغناطیسی نانوفرایت‌ها و خاصیت نانوفیلتراسیون غشا است؛ به طوری که میدان مغناطیسی ضعیف نانوذرات، به ترازبندی یون‌های پارامغناطیس کمک کرده و راندمان حذف را افزایش می‌دهد (Abdollahi و همکاران، ۲۰۲۵).

جدول ۲: مقایسه عملکرد فناوری‌های مختلف غشایی در تصفیه آب تولیدی

نوع غشا	مکانیسم جداسازی	TDS خوراک (mg/L)	راندمان حذف TDS	شار آب (LMH)	معایب اصلی	منبع
RO متعارف	اندازه + بار	< ۴۰,۰۰۰	۹۵–۹۹٪	۱۰–۲۰	گرفتگی، رسوب، فشار بالا	Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶
FO با غشای TFN-MIL-۱۲۵	اسمز + دفع اندازه	تا ۱۰۰,۰۰۰	~۹۰٪ (نمک)	۸–۱۲ (با DS مناسب)	شار معکوس نمک، انتخاب DS مناسب	Al-Jubouri و همکاران، ۲۰۲۵
غشاهای COF کاتالیزوری	الک مولکولی + کاتالیز نانومحصور	تا ۵۰,۰۰۰	> ۹۹٪ (رنگ‌ها) + ~۹۰٪ (Cr^{6+})	۸۵ (بر حسب $L/m^2 \cdot h \cdot bar$)	سنتز پیچیده، هزینه بالای Pd	Zhang و همکاران، ۲۰۲۵
غشاهای پلاسمایی	تخلیه الکتریکی + اکسیداسیون	تا ۲۰۰,۰۰۰	کاهش COD ~۷۵٪	–	مقیاس پایین، مصرف انرژی الکتریکی	Manakhov و همکاران، ۲۰۲۵

۲.۴. غشاهای کاتالیزوری چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs)

جدیدترین نسل از غشاهای مورد استفاده در تصفیه آب، غشاهای کاتالیزوری مبتنی بر چارچوب‌های آلی کووالانسی (Covalent Frameworks Organic) هستند. این غشاها با بهره‌گیری از نظم ساختاری در مقیاس مولکولی، تخلخل قابل تنظیم، و امکان تثبیت کاتالیزورهای فلزی درون حفره‌های نانومتری، قابلیت منحصر به فردی در «الک مولکولی همزمان با تبدیل کاتالیزوری» آلاینده‌ها ارائه می‌دهند.

Zhang و همکاران (۲۰۲۵) غشای COF بر پایه مونومرهای ۱و۳و۵-تری‌فورمیل‌فلروگلوسینول (Tp) و ۱و۴-دی‌آمینوپیرازین (Pz) را سنتز کرده و سپس نانوسخته‌های پالادیم (Pd^0) را به روش احیای درجا درون ساختار آن تثبیت نمودند. غشای Pd^0-TpPz حاصل، ضخامتی در حدود ۴۰ نانومتر داشته و مساحت سطح مؤثر BET آن ۸۷.۴ مترمربع بر گرم با اندازه حفرات اصلی ۲.۰۵ نانومتر است (Zhang و همکاران، ۲۰۲۵). عملکرد این غشا بر دو اصل استوار است: (۱) حفرات با اندازه ۲ نانومتر، اجازه عبور مولکول‌های کوچک آب را داده اما مولکول‌های آلی بزرگ (مانند رنگ‌ها و ترکیبات آلی ماکرو) را پس می‌زنند، و (۲) نانوسخته‌های پالادیم تثبیت شده درون حفرات، به عنوان سایت‌های کاتالیزوری عمل کرده و آلاینده‌های کوچک سمی (مانند Cr^{6+}، ۴-نیتروفنل و رودامین B) را به ترکیبات بی‌خطر تبدیل می‌کنند.

نتایج نشان داد که غشای Pd^0-TpPz قادر به حذف ۹۹.۸٪ رنگ T Black Eriochrome و تبدیل کاتالیزوری بیش از ۹۵٪ Cr^{6+} به Cr^{3+} (سمیت کمتر) در شرایط پیوسته است. علاوه بر این، این غشا پایداری طولانی‌مدت (بیش از ۷۲ ساعت کار مداوم) و مقاومت در محدوده pH= ۲-۱۲ را نشان داد که برای تصفیه آب تولیدی با نوسانات pH بسیار حائز اهمیت است. مکانیسم احیای Cr^{6+} توسط نانوسخته‌های پالادیم در حضور دهنده الکترون (مانند اسید فرمیک) انجام می‌شود و سینتیک واکنش به دلیل اثر نانومحصورشدگی درون حفرات COF، به طور قابل توجهی تسریع می‌گردد.

۳. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته

آب تولیدی علاوه بر شوری بالا، حاوی مقادیر قابل توجهی ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی (Organic Recalcitrant Compounds) از جمله هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، ترکیبات فنولی، اسیدهای نفتنیک و ترکیبات آلی فرار (VOCs) است. این ترکیبات نه تنها برای اکوسیستم‌های آبی سمی هستند، بلکه باعث گرفتگی غشاها و کاهش کارایی فرآیندهای فیزیکوشیمیایی می‌شوند. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (Processes Oxidation Advanced) با تولید رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر (عمدتاً رادیکال هیدروکسیل •OH با پتانسیل اکسیداسیون ۲.۸۰ ولت)، قادر به تخمین کامل (Mineralization) این ترکیبات آلی به دی‌اکسید کربن و آب هستند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۴).

۳.۱. ازن‌زنی و فرآیند ازن/پراکسید هیدروژن

ازن (O_3) به عنوان یک اکسیدان قوی (پتانسیل اکسیداسیون ۲.۰۷ ولت) می‌تواند مستقیماً با ترکیبات آلی واکنش دهد یا در محیط قلیایی تجزیه شده و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید کند. با این حال، ازن‌زنی به تنهایی اغلب منجر به معدنی‌سازی کامل نمی‌شود و

محصولات حدواسط با سمیت احتمالی باقی می‌مانند. برای بهبود کارایی، فرآیند O_3/H_2O_2 (پراکسون) توسعه یافته است که در آن پراکسید هیدروژن، تجزیه ازن به رادیکال‌های هیدروکسیل را تسریع کرده و کارایی حذف آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد.

Zhang و همکاران (۲۰۲۴) در مرور جامع خود بر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، نشان دادند که فرآیند O_3/H_2O_2 می‌تواند تا ۹۰٪ اسیدهای نفتنیک (از مهم‌ترین آلاینده‌های آب تولیدی در کانادا) را در شرایط بهینه حذف کند. همچنین، این فرآیند در کاهش سمیت حاد آب تولیدی برای سیستم ایمنی پستانداران مؤثر بوده است. با این حال، مصرف بالای انرژی تولید ازن و نیاز به دوز دقیق H_2O_2 برای جلوگیری از واکنش‌های جانبی ناخواسته از چالش‌های این فناوری است.

۳.۲. فرآیند فنتون و فنتون الکتروشیمیایی

فرآیند فنتون کلاسیک بر پایه واکنش بین یون فرو (Fe^{2+}) و پراکسید هیدروژن در محیط اسیدی ($pH\approx3$) استوار است که منجر به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود. اگرچه این فرآیند در تخریب طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی بسیار مؤثر است، اما محدودیت‌های مهمی دارد: تولید لجن آهن حجیم در پایان فرآیند (به دلیل اکسید شدن Fe^{2+} به Fe^{3+} و تشکیل هیدروکسید آهن)، محدوده pH عملیاتی باریک، و نیاز به خنثی‌سازی پساب.

برای رفع این محدودیت‌ها، فرآیند فنتون الکتروشیمیایی (Electro-Fenton) توسعه یافته است. در این فرآیند، یون‌های Fe^{2+} به صورت الکتروشیمیایی از کاتد تولید و بلافاصله با H_2O_2 (که نیز از طریق احیای اکسیژن بر روی الکترودهای خاص تولید می‌شود) واکنش می‌دهد. مزیت اصلی این روش، تولید مداوم و درجای واکنشگرها و کاهش لجن تولیدی است. Zhang و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که راکتورهای جریان-از-طریق فنتون الکتروشیمیایی با کاتدهای فیبر کربن فعال اصلاح شده، قادر به حذف بیش از ۹۵٪ COD از آب تولیدی با مصرف انرژی پایین هستند.

۳.۳. فتوکاتالیست ناهمگن

فتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانا مانند TiO_2 و ZnO با جذب فوتون‌های فرابنفش یا مرئی، جفت الکترون-حفره تولید کرده و حفره‌های تولیدی قادر به اکسیداسیون مستقیم آلاینده‌های آلی یا تولید رادیکال‌های هیدروکسیل از آب هستند. در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های ZnO/TiO_2 تثبیت شده بر روی گرافن اکسید احیا شده (rGO) عملکرد بهبود یافته‌ای در حذف فنول و سایر آلاینده‌های آب تولیدی نشان داده‌اند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۴). این بهبود به دلیل سطح بالای گرافن، کاهش نوترکیبی جفت الکترون-حفره، و افزایش جذب نور مرئی است.

با این حال، چالش اصلی فتوکاتالیست‌ها در تصفیه آب تولیدی، کدورت بالای آب و حضور مواد جاذب نور است که نفوذ فوتون‌ها به عمق محلول را محدود می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، راکتورهای نازک-لایه (reactors Thin-film) و تثبیت فتوکاتالیست بر روی بسترهای شناور پیشنهاد شده است.

۳.۴. اکسیداسیون پرسولفات

در سال‌های اخیر، اکسیداسیون پرسولفات (Oxidation Persulfate) به عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای تصفیه آب تولیدی مطرح شده است. پرسولفات ($S_2O_8^{2-}$) خود اکسیدانی نسبتاً ضعیف است (پتانسیل اکسیداسیون ۲.۰۱ ولت)، اما با فعال‌سازی حرارتی، قلیایی، فرابنفش یا کاتالیزوری با فلزات واسطه، به رادیکال سولفات ($SO_4^{\bullet-}$) با پتانسیل اکسیداسیون بسیار بالا (۲.۶۰ ولت) تبدیل می‌شود. رادیکال سولفات نسبت به رادیکال هیدروکسیل نیمه‌عمر بیشتری دارد (۳۰-۴۰ میکروثانیه در مقابل چند میکروثانیه) و انتخاب‌پذیری بیشتری در واکنش با ترکیبات آلی خاص نشان می‌دهد.

Zhang و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی خود نشان دادند که فعال‌سازی حرارتی پرسولفات در دمای ۴۰-۶۰ درجه سلسیوس، قادر به تخریب مؤثر هیدروکربن‌های کلردار (HCHs) و ترکیبات معطر در آب تولیدی است. همچنین، فعال‌سازی الکتروشیمیایی پرسولفات با استفاده از میدان الکتریکی (EC/PS) راندمان بالایی در حذف ترکیبات آلی و کاهش COD در نمونه‌های واقعی آب تولیدی داشته است.

۴. فناوری‌های حرارتی نوین و بازیابی منابع

۴.۱. نمک‌زدایی انجمادی کسری (Desalination Freeze Fractional)

نمک‌زدایی انجمادی (Desalination Freeze) یک فناوری حرارتی با دمای پایین است که بر اساس تفاوت ضریب انحلال پذیری ناخالصی‌ها در فاز جامد (یخ) و مایع (آب شور) عمل می‌کند. هنگامی که آب تولیدی تا زیر نقطه انجماد سرد می‌شود، بلورهای یخ تقریباً خالص (فاقد نمک و آلاینده‌ها) تشکیل می‌شوند. این بلورها پس از جداسازی از آب شور تغلیظ شده (Brine) و شستشوی سطحی، ذوب شده و آب شیرین تولید می‌کنند. با تکرار این فرآیند در چند مرحله (Fractionation)، خلوص آب تولیدی افزایش می‌یابد.

Edirisooriya و همکاران (۲۰۲۶) اولین مطالعه میدانی در مقیاس پایلوت را برای کاربرد فناوری FD در تصفیه آب تولیدی حوضه پرمین انجام دادند. سیستم تصفیه یکپارچه شامل پیش‌تصفیه، نمک‌زدایی انجمادی چندمرحله‌ای، فیلتراسیون گرین‌سند (حذف آهن و منگنز)، فیلتر کربن فعال دانه‌ای (GAC) و سپس اسمز معکوس آب دریا (SWRO) بود. نتایج این مطالعه نشان داد که تلفیق سیستم FD به عنوان پیش‌تصفیه، شوری آب تولیدی را از حدود ۱۲۰ گرم در لیتر TDS به سطحی قابل تحمل برای SWRO کاهش می‌دهد و در نهایت سیستم ترکیبی به راندمان حذف یون کل ~۹۹٪ دست می‌یابد (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

مزایای کلیدی فناوری FD عبارتند از: (۱) کارکرد در دمای پایین (زیر صفر درجه سلسیوس) که مشکلات خوردگی و رسوب را در مقایسه با فرآیندهای حرارتی با دمای بالا (مانند تقطیر چندمرحله‌ای) کاهش می‌دهد، (۲) تحمل شوری بسیار بالا (تا حد اشباع نمک) بدون افت راندمان، (۳) عدم حساسیت به گرفتگی و رسوب به دلیل عدم تبخیر و تغییر فاز مایع به جامد کنترل شده، و (۴) قابلیت بازیافت حرارتی با استفاده از پمپ‌های حرارتی که مصرف ویژه انرژی را کاهش می‌دهد.

۴.۲. تبخیر حرارتی افقی و سیستم Scepter

شرکت Espiku فناوری نوآورانه‌ای به نام «Scepter» را توسعه داده است که بر پایه تبخیر حرارتی افقی با فشرده‌سازی مکانیکی بخار (Compression Vapor Mechanical) عمل می‌کند. در این سیستم، آب تولیدی با شوری تا ۴۰۰,۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر وارد سینی‌های تبخیر افقی شده و با استفاده از گرمای حاصل از فشرده‌سازی بخار، آب خالص تبخیر و سپس میعان می‌گردد. املاح و مواد معدنی باقیمانده به صورت کنسانتره جامد یا دوغاب خارج می‌شوند.

سیستم Scepter طراحی مقاوم در برابر گرفتگی (Fouling-resistant) دارد و قادر است با استفاده از یک کمپرسور بخار منفرد و سینی‌های تبخیر طبقه‌بندی شده، روزانه ۲,۰۰۰ بشکه آب تولیدی را پردازش کرده و حجم آن را بیش از ۶۰٪ کاهش دهد (NGIF Accelerator, ۲۰۲۶). علاوه بر تولید آب با کیفیت قابل استفاده برای آبیاری، این سیستم قادر به بازیابی مواد معدنی با ارزش (نمک‌ها و مواد معدنی) است که می‌توانند به عنوان محصول جانبی به فروش برسند. تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که این رویکرد نه تنها هزینه‌های دفع (شامل حمل و نقل و تزریق به چاه‌های عمیق) را حذف می‌کند، بلکه جریان درآمدی جدیدی نیز ایجاد می‌نماید.

جدول ۳: بازیابی مواد معدنی ارزشمند از آب تولیدی: فناوری‌ها و پتانسیل اقتصادی

عنصر	غلظت معمول در آب تولیدی (mg/L)	فناوری استخراج	راندمان استخراج	خلوص محصول	پتانسیل درآمد سالانه (USD/well)
لیتیوم (Li)	۵۰–۵۰۰	جذب با MOFها، تبادل یونی انتخابی، تبخیر خورشیدی	تا ۹۰٪	~۹۹.۹٪	۲۵۰,۰۰۰–۴۰۰,۰۰۰
ید (I)	۱۰–۲۰۰	تبادل یونی با رزین‌های قلیایی، استخراج با حلال	تا ۸۵٪	~۹۸٪	۱۰۰,۰۰۰–۲۰۰,۰۰۰
برم (Br)	۵۰–۵۰۰	اکسیداسیون با کلر، دمش با هوا، استخراج با حلال	تا ۹۰٪	~۹۹٪	۱۵۰,۰۰۰–۳۰۰,۰۰۰
استرانسیم (Sr)	۵۰۰–۳,۰۰۰	رسوب‌دهی انتخابی با کربنات، تبادل یونی	تا ۸۰٪	~۹۷٪	۵۰,۰۰۰–۱۰۰,۰۰۰
روبیدیم (Rb)	۵۰–۲۰۰	فرآیندهای غشایی ترکیبی، استخراج حلال	تا ۷۵٪	~۹۵٪	۳۰,۰۰۰–۸۰,۰۰۰
سزیم (Cs)	۱۰–۱۰۰	جذب با هگزاسیانوفرات، تبادل یونی انتخابی	تا ۸۰٪	~۹۶٪	۲۰,۰۰۰–۶۰,۰۰۰
منیزیم (Mg)	۱,۰۰۰–۵,۰۰۰	رسوب‌دهی با هیدروکسید، الکترولیز	تا ۹۵٪	~۹۹٪	۵۰,۰۰۰–۱۵۰,۰۰۰
بور (B)	۱۰۰–۵۰۰	اسمز معکوس تخصصی، استخراج با حلال	تا ۸۰٪	~۹۵٪	۴۰,۰۰۰–۱۰۰,۰۰۰

۴.۳. رویکرد یکپارچه بازیابی منابع

یکی از مهم‌ترین تحولات پارادایمی در مدیریت آب تولیدی، حرکت از رویکرد «دفع پسماند» به رویکرد «اقتصاد چرخشی و بازیابی منابع» است. Yelatontsev و Mukhachev (۲۰۲۶) در مقاله مروری جامع خود، پتانسیل آب تولیدی را به عنوان یک منبع هیدرومینرالی ارزشمند برای استخراج عناصر حیاتی مانند لیتیوم (Li)، ید (I)، برم (Br)، بور (B)، منیزیم (Mg)، استرانسیم (Sr)، روبیدیم (Rb) و سزیم (Cs) تحلیل کرده‌اند.

آب تولیدی حوضه‌های مختلف دارای ترکیبات شیمیایی متنوعی است که بازتابی از زمین‌شناسی مخازن است. برای مثال، آب تولیدی میادین نفت و گاز در اوکراین و روسیه حاوی غلظت‌های بالایی از ید و برم است، در حالی که آب تولیدی حوضه پرمین و آرژانتین منابع غنی از لیتیوم هستند (Yelatontsev و Mukhachev، ۲۰۲۶). استخراج همزمان چند عنصر با ارزش از طریق طرح‌های ترکیبی (Schemes Hybrid) مانند «نمک‌زدایی انجمادی – جذب سطحی» یا «استخراج غشایی لیتیوم (DLE)» امکان‌پذیر است.

تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که بازیابی جامع مواد معدنی از آب تولیدی می‌تواند درآمد سالانه تا حدود ۸۲۰,۰۰۰ دلار آمریکا به ازای هر چاه ایجاد کند، ضمن اینکه هزینه‌های دفع آب تولیدی را تا ۵۵٪ کاهش می‌دهد (Yelatontsev و Mukhachev، ۲۰۲۶). این درآمد نه تنها هزینه‌های تصفیه آب را پوشش می‌دهد، بلکه به سودآوری عملیات نفت و گاز در چاه‌های با نرخ تولید پایین نیز کمک می‌کند. از منظر زیست‌محیطی، استخراج این عناصر باعث کاهش بار آلاینده‌های سمی (مانند استرانسیم و بور) در جریان آب تصفیه شده می‌گردد.

۵. فناوری‌های نوظهور: پلاسما و غشاهای COF

۵.۱. تصفیه آب تولیدی با تخلیه الکتریکی پلاسما

فناوری پلاسما در آب (Water in Discharge Plasma) به عنوان یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته نسل جدید، قادر به تولید همزمان گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (مانند •OH، O_3، H_2O_2، NO_2•، NO_3•)، اشعه فرابنفش، امواج شوک و میدان الکتریکی است. این اثرات سینرژیک منجر به تخریب بسیار مؤثر آلاینده‌های آلی، غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و حتی کاهش شوری (از طریق تشکیل نانوذرات اکسید آهن و جذب سطحی یون‌های نمک) می‌شود (Manakhov و همکاران، ۲۰۲۵).

Manakhov و همکاران (۲۰۲۵) یک راکتور تخلیه الکتریکی دیافراگمی (Discharge Diaphragm) برای تصفیه آب تولیدی طراحی و بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که تخلیه الکتریکی در آب، نانوذرات اکسید آهن با اندازه ۱۰۰±۲۰ تا ۶۵۷±۱۲۰ نانومتر تولید می‌کند. این نانوذرات که به دلیل فرسایش الکترشیمیایی الکترودهای آهنی تشکیل می‌شوند، سطح فعال بالایی داشته و قادر به جذب یون‌های نمک روی سطح خود هستند. همچنین، فعال‌سازی پلاسمایی آب، کشش سطحی (در مرز با هگزان) را کاهش می‌دهد که جداسازی قطرات روغن باقیمانده را تسهیل می‌کند (Manakhov و همکاران، ۲۰۲۵).

با بهینه‌سازی معماری سلول جریان، راندمان انرژی سنتز نانوذرات به ۱۸.۷۵ گرم بر کیلووات‌ساعت افزایش یافت. این سیستم توانست ضمن حذف آلودگی‌های روغنی (کاهش COD تا ۷۵٪)، شوری آب تولیدی را نیز به طور قابل توجهی کاهش دهد. با این حال، فناوری

پلاسما در مقیاس پایلوت و صنعتی نیازمند تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی (که در حال حاضر نسبت به روش‌های غشایی بالاتر است) و افزایش طول عمر الکترودها است.

۶. سیستم‌های تصفیه یکپارچه و ارزیابی عملکرد

۶.۱. طراحی و بهینه‌سازی زنجیره‌های تصفیه ترکیبی

تأکید تمام مطالعات اخیر بر این نکته است که هیچ فناوری واحدی قادر به تصفیه کامل آب تولیدی نیست و موفقیت در گرو طراحی یک زنجیره تصفیه ترکیبی (Train Treatment) است که در آن هر واحد عملیاتی وظیفه حذف دسته خاصی از آلاینده‌ها را بر عهده دارد. یک زنجیره تصفیه بهینه معمولاً شامل مراحل زیر است:

۱. **پیش‌تصفیه اولیه:** حذف جامدات معلق بزرگ، هیدروکربن‌های آزاد (امولسیون‌شکنی با مواد شیمیایی یا سیکلون‌های هیدرولیکی)، و گازهای محلول (مانند H_2S که سمی و خورنده است).

۲. **تصفیه میانی (مرحله اول کاهش شوری):** استفاده از فرآیندهایی مانند نمک‌زدایی انجمادی (FD) یا تقطیر غشایی (MD) که قادر به تحمل شوری بالا بوده و شوری آب را از سطح ۱۰۰-۱۵۰ گرم بر لیتر TDS به حدود ۲۰-۴۰ گرم بر لیتر کاهش می‌دهند (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

۳. **حذف آلاینده‌های آلی مقاوم:** استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) مانند O_3/H_2O_2 یا فنتون برای تخریب ترکیبات آروماتیک و اسیدهای نفتنیک که با روش‌های فیزیکی حذف نمی‌شوند.

۴. **تصفیه نهایی (مرحله دوم کاهش شوری):** اسمز معکوس آب دریا (SWRO) یا نانوفیلتراسیون برای کاهش شوری به سطح قابل قبول برای کاربرد نهایی (مانند ۵۰۰-۱,۰۰۰ mg/L برای آبیاری یا < ۵۰۰ mg/L برای تخلیه به آبهای سطحی).

۵. **پس‌تصفیه و پایدارسازی:** عبور از بستر کربن فعال دانه‌ای (GAC) برای حذف بو، طعم و ترکیبات آلی باقیمانده، و در صورت نیاز، گندزدایی با اشعه فرابنفش یا کلرزنی.

۶.۲. ارزیابی کیفی و سمیت‌شناختی آب تصفیه شده

یکی از نقاط قوت مطالعه میدانی Edirisooriya و همکاران (۲۰۲۶)، ارزیابی جامع کیفیت آب تصفیه شده از نظر بیش از ۴۴۰ آنالیت شامل فلزات، آنیون‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، ترکیبات آلی نیمه‌فرار (SVOCs) و رادیونوکلئیدها بود. علاوه بر سنجش‌های فیزیکوشیمیایی، از یک بسته ارزیابی سمیت چندسطحی (Assessment Toxicity Multi-tiered) شامل تست‌های Whole Effluent Toxicity (WET)، سنجش‌های رده‌های سلولی انسانی، آنالیزهای غیرهدفمند شیمیایی، و آزمایش‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای برای ارزیابی خطرات اکولوژیکی و بهداشتی بالقوه استفاده شد.

نتایج نشان داد که آب تصفیه شده توسط زنجیره ترکیبی GAC + SWRO + FD، تمام استانداردهای کیفی برای کاربرد در مصارف کشاورزی (آبیاری) و تخلیه به آبهای سطحی (با رعایت حدود مجاز برای جریان-افزایی) را满足 می‌کند. سمیت حاد و مزمن آب تصفیه شده بر روی ارگانیسم‌های شاخص (مانند دافنی و ماهی‌های کوچک) در محدوده مجاز قرار داشت و آزمایش‌های گلخانه‌ای روی گیاهان خوراکی (مانند کاهو و گوجه‌فرنگی) تفاوت معنی‌داری با گروه شاهد آبیاری شده با آب لوله‌کشی شهری نشان نداد (Edirisooriya و همکاران، ۲۰۲۶).

۷. نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

۷.۱. جمع‌بندی یافته‌ها

آب تولیدی همراه نفت، با تولید روزانه بیش از ۴۰ میلیون مترمکعب، چالشی جدی برای صنعت نفت و محیط زیست ایجاد کرده است، اما در عین حال فرصتی بی‌نظیر برای تأمین آب شیرین و بازیابی مواد معدنی ارزشمند فراهم می‌آورد. فناوری‌های نوین تصفیه در سه دهه گذشته پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند و از روش‌های ساده فیزیکی-شیمیایی به سیستم‌های پیشرفته غشایی، الکتروشیمیایی و حرارتی تکامل یافته‌اند.

غشاهای نانوکامپوزیت حاوی چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFs) و چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs) با قابلیت الک مولکولی دقیق و کاتالیز نانومحصور، نویدبخش نسل جدیدی از فرآیندهای غشایی با کارایی بالا و مصرف انرژی کم هستند. این غشاها می‌توانند همزمان چندین آلاینده (نمک‌ها، فلزات سنگین، ترکیبات آلی سمی) را در یک واحد حذف کنند. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به ویژه ازن‌زنی کاتالیزوری و اکسیداسیون پرسولفات فعال‌شده، راهکارهای مؤثری برای تخریب ترکیبات آلی مقاوم و کاهش سمیت آب تولیدی ارائه می‌دهند. با این حال، مصرف انرژی و مواد شیمیایی در این فرآیندها همچنان یک چالش است.

رویکردهای حرارتی با دمای پایین مانند نمک‌زدایی انجمادی کسری (FD) و تبخیر حرارتی افقی، توانایی تحمل شوری‌های بسیار بالا (تا ۴۰۰,۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و بازیابی همزمان آب و مواد معدنی را دارند. مطالعات میدانی در مقیاس پایلوت نشان داده‌اند که زنجیره‌های ترکیبی SWRO + FD می‌توانند به راندمان حذف یون کل ~۹۹٪ دست یابند و آب تصفیه شده قابل استفاده در کشاورزی و آبیاری فضای سبز تولید کنند.

جدول ۴: مزایا و معایب فناوری‌های نوین تصفیه آب تولیدی

فناوری	مزایا	معایب و چالش‌ها	بلوغ فناوری (TRL)	مصرف انرژی (kWh/m^3)
MIL-) TFN-FO (۱۲۵	مصرف انرژی کم، گرفتگی برگشت‌پذیر، افزایش ۲۴۰٪ شار آب	شار معکوس نمک، نیاز به محلول استخراج مناسب، سنتز MOF هزینه‌بر	TRL ۴-۵ (مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت کوچک)	۵ > (فقط پمپاژ)
غشاهای COF کاتالیزوری	حذف همزمان چند آلاینده، پایداری بالا در pH=۲-۱۲	هزینه بالای Pd، سنتز چندمرحله‌ای، مقیاس‌پذیری محدود	TRL ۳-۴	۱-۲ (فشار پایین)
نمک‌زدایی انجمادی (FD)	تحمل شوری بالا، خوردگی کم، عدم رسوب	مصرف انرژی برای سرمایش، نیاز به شستشوی بلورهای یخ، تبلور ثانویه	TRL ۶-۷ (پایلوت میدانی)	۷-۱۵ (شامل پمپ حرارتی)
اکسیداسیون پرسولفات (حرارتی)	تخریب ترکیبات مقاوم، نیمه‌عمر طولانی رادیکال	مصرف انرژی حرارتی، مدیریت pH، باقیمانده پرسولفات	TRL ۵-۶	۵-۱۰ (به علاوه حرارت)
فناوری پلاسما	تخریب سریع، تولید نانوذرات درجا، کاهش همزمان شوری	مصرف انرژی بالا، فرسایش الکترودها، مقیاس پایین	TRL ۴-۵	۲۰-۵۰
تبخیر حرارتی افقی (Scepter)	بازیابی آب با کیفیت بالا، بازیابی مواد معدنی، عدم گرفتگی	سرمایه‌گذاری اولیه بالا، نیاز به منابع حرارتی با کیفیت	TRL ۵-۶ (پایلوت صنعتی)	۱۵-۲۵ (با MVC)

منبع: تلفیق یافته‌های Edirisooriya و همکاران (۲۰۲۶)؛ Al-Jubouri و همکاران (۲۰۲۵)؛ Yelatontsev و Mukhachev (۲۰۲۶)؛ Manakhov و همکاران (۲۰۲۵)

۷.۲. نقشه راه برای تحقیقات آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، هنوز شکاف‌های دانشی متعددی وجود دارد که باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد:

۱. بهینه‌سازی یکپارچه و مدلسازی فرآیند: توسعه مدل‌های ترمودینامیکی و سینتیکی برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های ترکیبی (مثلاً تلفیق FD با AOPs و RO) و بهینه‌سازی همزمان متغیرهای عملیاتی (دما، فشار، pH، دوز مواد شیمیایی) با هدف حداقل‌سازی مصرف انرژی و حداکثرسازی بازیابی منابع ضروری است.

۲. مقیاس‌پذیری فناوری‌های نوظهور: غشاهای COF و MOF با وجود عملکرد عالی در مقیاس آزمایشگاهی، هنوز با چالش‌های سنتز در مقیاس بزرگ (کاهش هزینه، تکرارپذیری، و ساخت غشاهای با سطح بالا) مواجه هستند. تحقیقات بر روی روش‌های سنتز سبز و پیوسته (Manufacturing Continuous) باید در اولویت قرار گیرد.

۳. مدیریت کنسانتره و زباله نهایی: هر فرآیند تصفیه (به جز تبخیر کامل) یک جریان کنسانتره (Brine) با شوری بسیار بالا (اغلب mg/L ۲۰۰,۰۰۰ <) تولید می‌کند. توسعه فناوری‌های «تخلیه صفر مایع (ZLD)» که قادر به استخراج تمام آب و تبدیل املاح به محصولات جامد قابل استفاده یا دفع ایمن باشند، یک نیاز فوری است. ترکیب روش‌های تبخیر خورشیدی، تبلور و الکترودیالیز معکوس می‌تواند راهگشا باشد.

۴. تحلیل چرخه حیات (LCA) و اقتصادی جامع: مطالعات آینده باید شامل تحلیل چرخه حیات کامل (از گهواره تا گور) برای ارزیابی ردپای کربن، مصرف آب مجازی و تأثیرات زیست‌محیطی کل زنجیره تصفیه باشند. همچنین، تحلیل اقتصادی با در نظر گرفتن نوسانات قیمت نفت و مواد معدنی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واقعی، و ارزش آب تولیدی در مناطق کم‌آب باید انجام شود.

۵. تصفیه آنلاین و هوشمندسازی: توسعه سنسورهای پیشرفته برای پایش آنلاین کیفیت آب تولیدی (شوری، COD، فلزات) و یکپارچه‌سازی آنها با سیستم‌های کنترلی مبتنی بر هوش مصنوعی برای تنظیم خودکار پارامترهای فرآیند و پیش‌بینی زمان نیاز به تمیزکاری غشاها، گام بعدی در هوشمندسازی تصفیه آب تولیدی است.

۷.۳. چشم‌انداز: اقتصاد چرخشی و بی‌آب صنعت نفت

حرکت به سمت «بی‌آب (Water-Neutral)» یا حتی «آب-مثبت (Water-Positive)» شدن صنعت نفت، مستلزم پذیرش رویکرد اقتصاد چرخشی است که در آن آب تولیدی نه به عنوان یک پسماند، بلکه به عنوان یک منبع ارزشمند دیده می‌شود. در این چشمانداز، آب تصفیه شده برای آبیاری زمین‌های کشاورزی، احیای تالاب‌ها، یا تأمین آب فرآیندهای صنعتی به کار می‌رود و مواد معدنی استخراج شده (لیتیوم برای باتری‌ها، ید و برم برای صنایع دارویی و شیمیایی) به اقتصاد محلی و جهانی تزریق می‌شوند.

تحقق این چشمانداز نیازمند همکاری نزدیک بین دانشگاه‌ها، صنعت نفت، دولت‌ها و سرمایه‌گذاران خطرپذیر است. سیاست‌گذاری مناسب (مانند مالیات بر دفع آب، یارانه برای تصفیه و بازیابی، و الزامات قانونی برای کیفیت تخلیه)، همراه با سرمایه‌گذاری در تحقیقات پایه و کاربردی، می‌تواند این گذار را تسریع کند. فناوری‌هایی مانند سیستم Scepter از Espiku که در آستانه ورود به بازار هستند، نشان می‌دهند که این گذار نه تنها زیست‌محیطی، بلکه از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است (Accelerator, NGIF ۲۰۲۶).

در نهایت، آب تولیدی یک چالش جهانی است که با راهکارهای محلی و متناسب با شرایط هر حوضه (آب‌شناسی، زمین‌شناسی، اقلیم و زیرساخت) قابل حل است. انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم‌های تصفیه (Design Modular) و توانایی تطبیق با ترکیب متغیر آب تولیدی در طول عمر یک میدان، کلید موفقیت بلندمدت است. این مقاله نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و رویکردهای یکپارچه، می‌توان «نفرین آب تولیدی» را به «فرصت آب تولیدی» تبدیل کرد.

منابع

- Abdollahi, S., Ahmadi, A., & Zarei, M) .۲۰۲۵ .(Zn-Co nanoferrites incorporated polysulfone nanofiltration membranes for wastewater treatment .Journal of Water Process Engineering, ۱۵۲, ۱۰۸۹۹۳ .
- Al-Jubouri, S .M., Al-Jubouri, A .A., & Holmes, S .M) .۲۰۲۵ .(Probing the potential of surface-engineered titanium filler membranes for produced water treatment .Journal of Water Process Engineering, ٦۰, ۱۰٤۷۸۰ .
- Edirisooriya, E .M .N .T., Lopez, A., Smith, D., & Senanayake, P .S) .۲۰۲٦ .(Separation performance in pilot-scale fractional freeze desalination and reverse osmosis for produced water reuse .Desalination, ٦۲۲, ۱۱۹۷٤۳ .
- Manakhov, A., Ayirala, S., & Cha, D) .۲۰۲۵ .(A novel plasma based technology for efficient produced water treatment, recycle, and reuse .Paper presented at the Middle East Oil, Gas and Geosciences Show) MEOS GEO(, Manama, Bahrain .SPE-۲۲٦۹۲۱-MS .
- NGIF Accelerator) .۲۰۲٦, March ۲٦ .(NGIF Accelerator announces funding for Espiku's produced water treatment technology .https://www.ngif.ca
- Yelatontsev, D., & Mukhachev, A) .۲۰۲٦ .(Comprehensive utilization of mineral resources in produced water from oil and gas industry – A critical review .Desalination, ٦۱۹, ۱۱۹٥٥۸ .
- Zhang, H., Gao, C., Zhang, H., Song, N., & Cao, Q) .۲۰۲٤ .(Recent advances on the treatment of oilfield-produced water by advanced oxidation processes :A review .Water Reuse, ۱٤)۲(, ۱۹۰-۲۰۷ .
- Zhang, L., Wang, Y., & Liu, X) .۲۰۲٥ .(Covalent organic framework catalytic membranes for durable multitasking water purification .Chemical Science, ۱٦)۳۹(, ۱۸۱٤۱-۱۸۱٥۱ .