**هیأت داوران نشریهٔ این دوره**

دکتر ابوالقاسمی، امین (دانشگاه تهران)
دکتر احمدی، امید (دانشگاه کردستان)
دکتر اعتمادی، احمد (دانشگاه صنعتی ارومیه)
دکتر باباپور، عزیز (دانشگاه محقق اردبیلی)
دکتر جعفری‌زاده، هدا (دانشگاه صنعتی تبریز)
دکتر خداپناه، الناز (دانشگاه صنعتی تبریز)
دکتر خضرآقا، همایون (دانشگاه صنعتی تبریز)
دکتر ذاکری، مژگان (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر رحمانی، محمد (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
دکتر سبحانی متین، محمدباقر (دانشگاه صنعتی همدان)
دکتر سبزواری، علیرضا (دانشگاه میبد)
دکتر سردشتی بیرجندی، محمدرضا (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر سهل‌الدین، علی محمد (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
دکتر عبدلی، سید مجید (دانشگاه صنعتی تبریز)
دکتر عزیزپور، هدایت (دانشگاه تهران)
دکتر علمداری، امین (دانشگاه ارومیه)
دکتر فخرالاسلام، محمد (دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر فصیحی دستجردی، محمد (دانشگاه علم و صنعت ایران)
دکتر قاسمیان، ناصر (دانشگاه بناب)
دکتر قائمی، احد (دانشگاه علم و صنعت ایران)
دکتر گل‌محمدی، مرتضی (دانشگاه صنعتی بیرجند)
دکتر ملکی کاکلر، مهدی (دانشگاه زنجان)
دکتر مهین روستا، مصطفی (پژوهشگاه مواد و انرژی)
دکتر هوپناه، محسن (دانشگاه هریوت وات)

سخن سردبیر

# اقتصاد چرخشی آب و پساب:
# نقش بازچرخانی آب‌های نامتعارف در گذار به مدیریت پایدار منابع آب

**عبدالرضا صمیمی**
استاد مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

افزایش جمعیت، توسعهٔ صنعتی، تغییرات اقلیمی و تشدید تنش‌های آبی، مدیریت منابع آب را به یکی از چالش‌های راهبردی قرن بیست‌ویکم تبدیل‌کرده‌است. در بسیاری از نقاط دنیا، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، اتکای صرف بر منابع آب متعارف دیگر پاسخگوی نیازهای رو به رشد شهری، صنعتی و کشاورزی نیست. در این میان، تغییر پارادایم از مدیریت خطی به اقتصاد چرخشی آب به‌عنوان رویکردی نوین و پایدار توجه پژوهشگران، سیاست‌گذاران و صنایع را جلب‌کرده‌است. اقتصاد چرخشی آب بر کاهش برداشت از منابع اولیه، افزایش بهره‌وری مصرف، بازیافت و بازچرخانی جریان‌های آبی نامتعارف (شامل پساب‌های شهری و صنعتی، آب‌های شور و لب‌شور، زه‌آب‌های کشاورزی و حتی آب‌های باران جمع‌آوری‌شده)، به‌عنوان منابع جای‌گزین کلیدی تأکیددارد.

مدیریت متعارف آب عمدتاً مبتنی بر الگوی خطی «برداشت- مصرف- دفع» بوده‌است؛ الگویی که در آن پساب‌ها به‌عنوان جریان‌های زائد تلقی و اغلب بدون بازیابی، دفع‌می‌شوند. این روی‌کرد نه‌تنها منجر به هدررفت منابع آب و انرژی می‌شود، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی نیز به‌همراه دارد و در مقابل، اقتصاد چرخشی آب و پساب را به‌عنوان منابعی در گردش در نظر می‌گیرد. در این چارچوب، پساب‌ها می‌توانند به آب با کیفیت‌های مختلف برای مصارف متناسب (صنعتی، کشاورزی، تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی و حتی شرب غیرمستقیم) تبدیل‌شوند. افزون بر این، بازیابی مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و ترکیبات شیمیایی باارزش از پساب‌ها، مرزهای جدیدی را برای یکپارچه‌سازی مدیریت آب، انرژی و مواد ترسیم‌می‌کند. آب‌های نامتعارف نقش محوری در تحقق اقتصاد چرخشی ایفا می‌کنند. پساب‌های شهری و صنعتی از نظر کمی منابعی پایدار و قابل پیش‌بینی هستند؛ با این حال، پیچیدگی ترکیب شیمیایی این جریان‌ها، شامل آلاینده‌های آلی، معدنی، ریزآلاینده‌ها و نمک‌ها، چالش‌های فناورانهٔ چشم‌گیری ایجادمی‌کند. پیشرفت‌های اخیر در فرایندهای غشایی، اکسایش پیشرفته، فرایندهای زیستی پیشرفته و سامانه‌های هیبریدی، امکان تصفیه و بازچرخانی این آب‌ها را با کیفیت‌های متناسب فراهم‌کرده‌است. از منظر مهندسی شیمی، طراحی فرایند، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت جریان‌های جانبی (شورابه و لجن) از موضوعات کلیدی پژوهشی محسوب‌می‌شوند.

صنایع بزرگ مصرف‌کنندهٔ آب، مانند صنایع شیمیایی، پتروشیمی، فولاد و نیروگاه‌ها، می‌توانند بستر مناسبی برای پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی آب فراهم‌کنند. استفادهٔ مجدد از پساب‌های تصفیه‌شده در مدارهای خنک‌کننده، دیگ‌های بخار و فرایندهای شست‌وشو، می‌تواند وابستگی به منابع آب تازه را به‌طور چشم‌گیری کاهش‌دهد. با این حال، ملاحظات کیفی آب، ریسک تجمع نمک‌ها و آلاینده‌ها و

نیاز به پایش مستمر، پیاده‌سازی صنعتی بازچرخانی را پیچیده‌می‌کند. در این زمینه، رویکردهای مبتنی بر ارزیابی چرخهٔ عمر و تحلیل‌های فنی-اقتصادی ابزارهای ضروری برای تصمیم‌گیری آگاهانه در انتخاب فناوری‌های مناسب هستند. یکی از جنبه‌های متمایز اقتصاد چرخشی آب، فراتر رفتن از تصفیهٔ صرف و حرکت به‌سوی بازیابی منابع است. فرایندهای بی‌هوازی، امکان تولید بیوگاز را از پساب‌های غنی از مواد آلی فراهم‌می‌کنند، در حالی‌که فناوری‌های نوین جذب و رسوب‌دهی می‌توانند مواد مغذی را برای استفادهٔ مجدد در کشاورزی بازیابی‌کنند. از دیدگاه مهندسی شیمی، یکپارچه‌سازی این فرایندها در قالب سامانه‌های چندمنظوره، فرصت‌های نوینی برای افزایش بهره‌وری کلی و کاهش رد پای زیست‌محیطی ایجادمی‌کند. با این حال، دست‌یابی به توازن میان پیچیدگی فرایند، هزینهٔ سرمایه‌گذاری و منافع زیست‌محیطی، هم‌چنان یک چالش باز پژوهشی است.

موفقیت اقتصاد چرخشی آب صرفاً به بلوغ فناوری وابسته نیست. پذیرش اجتماعی استفادهٔ مجدد از پساب، چارچوب‌های قانونی و استانداردهای کیفی و سازوکارهای اقتصادی تشویقی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پیاده‌سازی این رویکرد دارند. در بسیاری از کشورها، نبود سیاست‌های یکپارچهٔ آب و انرژی و یارانه‌های نادرست، مانعی جدی برای توسعهٔ بازچرخانی آب‌های نامتعارف محسوب‌می‌شود. در این راستا، تعامل میان دانشگاه، صنعت و نهادهای حاکمیتی برای توسعهٔ راه‌کارهای بومی و مبتنی بر شواهد علمی ضروری است. در حوزهٔ اقتصاد چرخشی آب چند نمونهٔ جهانی وجود دارد که نه‌تنها موفق بوده‌اند، بلکه از نظر اقلیم، ساختار حکمرانی و محدودیت منابع شباهت زیادی به ایران دارند و می‌توانند الگوهای کاملاً قابل اقتباس (با بومی‌سازی) باشند. به‌عنوان مثال در اسپانیا بازچرخانی گستردهٔ پساب در کشاورزی با استفادهٔ بیش از ۷۰٪ پساب تصفیه‌شده برای آبیاری کشاورزی الگوی موفقی در تطبیق کیفیت آب با نوع محصول، قوانین مشخص و قیمت‌گذاری منطقی، کاهش فشار بر آب‌های زیرزمینی داشته‌است. در استرالیا با نگاه سیستمی به شهر در چرخهٔ آب، با مشارکت شهرداری‌ها و بخش خصوصی و مدیریت یکپارچهٔ آب شهری بر تاب‌آوری اقلیمی تمرکز کرده و با ترکیب بازچرخانی پساب، تغذیهٔ مصنوعی آبخوان، جمع‌آوری آب باران و کاهش مصرف بحران تنش آبی را مدیریت کرده‌اند. تجربیات موفق جهانی در حوزهٔ اقتصاد چرخشی آب نشان‌می‌دهد که موفقیت بازچرخانی آب‌های نامتعارف بیش از آن‌که صرفاً به سطح فناوری وابسته باشد، حاصل هم‌افزایی میان رویکردهای مهندسی، سیاست‌گذاری و پذیرش اجتماعی است. بررسی نمونه‌های فوق حاکی از آن است که اصل تطابق کیفیت آب با نوع مصرف نقش محوری در کاهش هزینه‌ها و افزایش مقبولیت بازچرخانی ایفامی‌کند. از منظر حکمرانی، وجود چارچوب‌های قانونی شفاف، استانداردهای کیفی مشخص و ساختارهای نهادی هماهنگ، پیش‌شرط توسعهٔ پایدار بازچرخانی آب محسوب‌می‌شود. در بسیاری از کشورها، تمرکز اولیه بر مصارف غیر شرب و صنعتی، بستری برای اعتمادسازی و توسعهٔ تدریجی کاربردهای پیشرفته‌تر را فراهم‌کرده‌است. تجربهٔ کشورهای پیشرو نشان‌می‌دهد که نگاه به پساب به‌عنوان «منبع» به‌جای «پسماند»، امکان هم‌زمان کاهش فشار بر منابع آب متعارف و بازیابی انرژی و مواد ارزشمند را فراهم‌می‌کند.

کشور ایران به‌سبب توالی دوران خشک‌سالی در سال‌های اخیر و روی‌کردهای غلط از جمله استفادهٔ بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی، تصفیهٔ پساب به طرق غیر اقتصادی، افزایش جمعیت و مصرف بی‌رویهٔ آب، با ناترازی‌های حاد آب مواجه شده‌است که بیش از پیش لزوم مدیریت آب‌های متعارف و نامتعارف را- در امتداد یک زنجیرهٔ ارزش چرخشی از تأمین منابع آب تا جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تصفیهٔ پساب و بازچرخانی آن- برجسته‌می‌کند. ذی‌نفعان باید با لحاظ‌کردن نیازهای زیست‌محیطی، سیاست‌های دولتی و هم‌چنین محرک‌های فناوری به همکاری با یکدیگر در استفادهٔ مجدد آب تشویق و هدایت شوند و با توسعهٔ فناوری‌های مرتبط، بازیابی محصولات جانبی- مانند لجن از آب برای استفاده به‌عنوان کود و ذخیرهٔ انرژی- به‌عمل‌آید. در این راستا، دولت با حفظ مالکیت عمومی، منابع آبی را تثبیت‌کند و زیرساخت‌های مورد نیاز را توسعه‌دهد. نیز، نسبت به حمایت از توسعهٔ فناوری‌های پایدار عمل‌آوری آب، از جمله نمک‌زدایی آب‌های دریا و لب‌شور، سیستم‌های کنترل و اندازه‌گیری، نظارت و مدیریت شفاف آب متعهد شود. در عین حال، دولت باید با ایجاد یک زیست‌بوم سالم موانع و اثرات مخرب زیست‌محیطی و اقتصادی را با نوآوری‌ها و بهبودهای مداوم در مدیریت خدمات و کاهش مصرف آب (و هزینه) برطرف‌کند. دولت در راهبردهای خود در مورد نوآوری مداوم، باید از راه سرمایه‌گذاری‌های مستقیم در تحقیق و توسعهٔ شرکت‌های دولتی و خصوصی، به‌طور فعال از نوآوری‌های مرتبط حمایت‌کند. هم‌زمان، دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی نیز بر پژوهش‌های مرتبط با انرژی، آب و کشاورزی تمرکزکنند تا راه‌حل‌هایی کارآمدتر، مؤثرتر، مقیاس‌پذیرتر و پایدارتر به‌دست‌آورند. آن‌ها هم‌چنین، مسئول آموزش نیروی کار ماهر و کارآفرینان هستند که در جایگاه رهبری و توسعهٔ فناوری‌ها و نوآوری‌های پایدار آب نقش دارند تا مسیری رو به جلو را در کشور با ارائهٔ شیوه‌های هوشمندانه بازنمایند.