

نظام مدار بسته آب؛ راهکاری پایدار برای تامین آب بخش صنعت و سیاستی گریزناپذیر در مدیریت منابع آب صنایع

هاشم اصغر نژاد، محمدحسین صرافزاده*

کرسی یونسکو در بازیافت آب، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[*sarrafzdh@ut.ac.ir](mailto:sarrafzdh@ut.ac.ir)

چکیده

طبق آمارهای منتشره، حدود ۲/۸ درصد از کل آب‌های مصرفی در کشور، توسط صنایع به مصرف می‌رسد. با اینکه در مقایسه با سایر حوزه‌های مصرف این مقدار چندان چشمگیر نیست، ولی با در نظر گرفتن اهمیت بخش تولید و صنایع در تحقق اهداف توسعه پایدار، تأمین منابع پایدار آب برای این حوزه حائز اهمیت فراوان خواهد بود. راهکاری که در بسته پیشنهادی حاضر معرفی می‌شود، نظام مدار بسته آب بوده که با ادغام سه مفهوم مهندسی تصفیه فاضلاب، منطق فازی و مفهوم پینچ آب و انتگراسیون فرآیند، راهکاری پایدار برای مدیریت یکپارچه منابع آب و پساب در سطح یک واحد صنعتی ارائه می‌کند. پیاده‌سازی این نظام نه تنها باعث مدیریت بهینه منابع آب و هزینه‌های واحدهای صنعتی می‌شود، بلکه آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از تخلیه پسماندهای صنعتی را به حداقل کاهش می‌دهد.

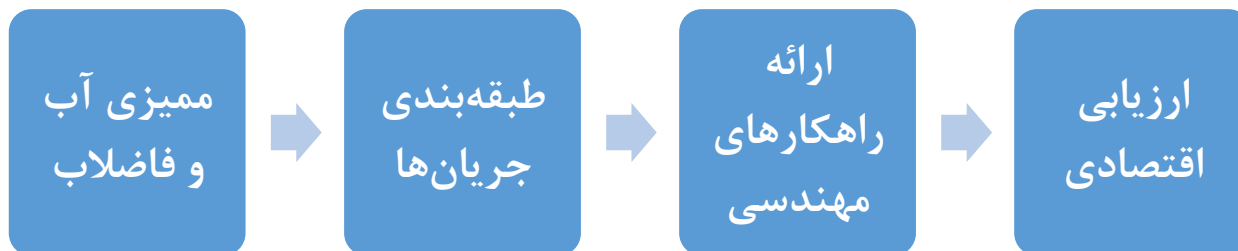
۱- مقدمه

طبق آمارهای منتشره، حدود ۲/۸٪ از حجم کل آب مصرفی سطح کشور در بخش صنعت به مصرف می‌رسد [1]. اگرچه این مقدار در مقایسه با سهم سایر بخش‌ها به‌ویژه کشاورزی، چندان قابل مقایسه نیست ولی به‌طور مستقیم با رشد تولید ناخالص ملی و توسعه پایدار کشور در ارتباط است. آب، یکی از ارکان مهم در اکثر صنایع به‌شمار رفته و با قطعیت می‌توان گفت که حیات صنایع یک کشور به آب وابسته است. آب در صنایع عموماً دو مصرف عمده دارد: (۱) مصارف فرآیندی، یعنی مصارفی که آب در آن به‌طور مستقیم در چرخه فرآیند تولید محصول وارد شده و به مصرف می‌رسد؛ (۲) مصارف یوتیلیتی^۱، که شامل ایجاد

¹ Utility

سرمایش و گرمایش، تولید الکتریسیته و مصارف بهداشتی و شست‌وشو می‌شود که سهم بیشتری را در مقایسه با آب فرآیندی به خود اختصاص می‌دهد [2]. آب موردنیاز اکثر صنایع در کشور از منابع آب تازه نظیر آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی تأمین می‌شود که با تشدید بحران منابع آبی کشور، تأمین آب موردنیاز، به چالشی جدی برای صاحبان صنایع تبدیل خواهد شد. از آنجایی که عمده صنایع تولیدی مهم کشور در نواحی خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، لذا ادامه این روند در آینده‌ای نه‌چندان دور منجر به تعطیلی کارخانه‌ها و واحدهای صنعتی تولیدی شده و متعاقباً مشکلات بزرگی از قبیل رشد نرخ بیکاری، کاهش نرخ تولید ناخالص ملی و تهدید توسعه پایدار کشور خواهد شد.

از این رو اگرچه سهم مصرف آب صنایع چندان چشمگیر نیست، با در نظر گرفتن نقش حیاتی صنایع در توسعه پایدار کشور، مدیریت مصرف آب در صنایع از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. علاوه بر مسأله تأمین منابع آب، حجم چشمگیر فاضلاب با بار آلودگی بالا، یکی دیگر از چالش‌های مهمی است که صنایع در حوزه آب با آن دست‌به‌گریبان هستند [3]. آلاینده‌های آلی آروماتیک و آلیفاتیک، ترکیبات شیمیایی تجزیه‌ناپذیر و فلزات سنگین عمده‌ترین آلاینده‌هایی هستند که به واسطه فعالیت‌های صنعتی وارد جریان فاضلاب خروجی از واحدهای صنعتی شده و معمولاً به طبیعت تخلیه می‌گردند [4]. از این رو، علاوه بر مدیریت مصرف آب در صنایع، مدیریت کمی و کیفی فاضلاب تولیدی در صنایع نیز از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده و نقش انکارناپذیری در حفاظت از محیط‌زیست ایفا می‌نماید. بنابراین، نیاز به راه‌حلی پایدار در بخش مدیریت آب و فاضلاب صنایع، به‌طور جدی احساس می‌شود. نگاه و رویکرد یکپارچه^۲ به منظور مدیریت مصرف آب و تولید فاضلاب در این بخش، خلأیی است که به‌شدت احساس می‌شود. "نظام یکپارچه مدار بسته آب" راهکاری است که برای برون‌رفت صنایع از بحران آب پیشنهاد



شکل ۱- مراحل نظام مدار بسته آب

می‌گردد. نظام مدار بسته آب، مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی، فنی و مهندسی و آزمایشگاهی است که نه تنها موجب بهینه‌سازی میزان مصرف آب و تولید فاضلاب در سطح یک واحد صنعتی می‌شود، بلکه هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری و هزینه‌های جاری

² Integrated

واحد را نیز بهینه می‌سازد. اساس این نظام، مبتنی بر فاضلاب به‌عنوان یک ذخیره ارزشمند آب و سایر منابع است، البته با این تفاوت که تأکید روی تصفیه فاضلاب تنها نیست و مجموعه‌ای از مفاهیم مدیریتی و مهندسی را به‌صورت یکپارچه و درهم‌تنیده دربرمی‌گیرد. در این نظام، مسأله کلان مدیریت مصرف آب و تولید فاضلاب در یک واحد صنعتی به مجموعه‌ای از مسائل خُرد در سطح بخش‌های مختلف آن واحد صنعتی تبدیل شده و رویکرد تفکیک و طبقه‌بندی پساب‌ها از مبدأ مدنظر قرار می‌گیرد. شکل ۱ به‌صورت شماتیک، پروسه مرحله به مرحله نظام مداربسته آب را نشان می‌دهد.

۲- ممیزی آب و فاضلاب

ممیزی آب، شامل بررسی کمی و کیفی شبکه توزیع آب و پساب در سطح واحد صنعتی است. همان‌گونه که در حوزه مدیریت مصرف انرژی، واحدهای صنعتی موظف به ممیزی و ارزیابی مصرف انرژی در سطح فرآیند خود هستند، در حوزه مصرف آب نیز این خلأ احساس می‌شود. منظور از ممیزی آب، شناسایی تمامی واحدهای مصرف‌کننده آب و تولیدکننده پساب در سطح یک واحد صنعتی، اندازه‌گیری دبی جریان آب و پساب در هر مورد و درنهایت مشخص نمودن آن روی نقشه گردش آب واحد صنعتی است. همچنین در مورد هریک از جریان‌های آب و پساب، آلاینده یا آلاینده‌های هدف که در واقع محدودکننده کیفی جریان موردنظر برای تصفیه و استفاده مجدد هستند، شناسایی شده و اندازه‌گیری می‌شوند. در نهایت، بیشینه حدمجاز آلاینده پذیرنده برای هر واحد به‌منظور طراحی فرآیندهای تصفیه و استفاده مجدد، تعیین می‌گردند.

سپس با استفاده از نتایج به‌دست آمده از بررسی کمی و کیفی جریان‌های آب و پساب، موازنه جرم جزئی آب و سایر منابع برای هر بخش به‌طور مجزا و همچنین برای کل واحد صنعتی نوشته شده و بدین ترتیب مسأله به‌طور کامل مشخص شده و تعریف می‌گردد. بدین ترتیب وضعیت کلی و جزئی واحد صنعتی از منظر مصرف آب و تولید پساب به‌طور کامل مشخص شده و سهم هر بخش از کل آب مصرفی، فاضلاب تولیدی و میزان آلاینده‌ها در فاضلاب خروجی تعیین می‌گردد. این نتایج، امکان مدیریت گردش آب و فاضلاب را در سطح کل واحد صنعتی تا حد بسیار زیادی فراهم می‌آورد.

مزیت مهم دیگری که ممیزی آب دارد، امکان پایش جریان مواد در سطح واحد صنعتی و جلوگیری از هدررفت مواد ارزشمند صنعتی از طریق جریان فاضلاب است. امروزه فاضلاب نه فقط به‌عنوان یک منبع آب، بلکه به‌عنوان منشأ نسبتاً پایداری برای تأمین مواد و منابع ارزشمند صنعتی به‌شمار می‌رود و از این منظر فاضلاب را "کارخانه تولید منابع" در نظر می‌گیرند [5]. ویژگی برجسته‌ای که نظام یکپارچه مدار بسته آب در مقایسه با رویکرد تصفیه فاضلاب و بازیافت آب تنها دارد در این است که تأکید فقط روی آب نیست بلکه بنا به مقتضیات و شرایط، امکان بازیافت و بازچرخانی مواد و منابع نیز وجود دارد.

۳- طبقه‌بندی جریان‌ها

خروجی اصلی مرحله ممیزی آب و فاضلاب، مشخصات کمی و کیفی کلی جریان‌های آب و پساب در سطح واحد صنعتی و نقشه توزیع و گردش آب و فاضلاب در سطح واحد است. بر اساس این داده‌ها، برگه شناسایی^۳ کمی و کیفی هر جریان تشکیل شده و بر اساس نوع آلاینده و میزان این آلاینده‌ها به سه گروه جریان سفید، خاکستری و سیاه، طبقه‌بندی می‌شوند. جریان‌های سفید جریان‌هایی هستند که از لحاظ کیفی بسیار نزدیک به آب تازه بوده و می‌توانند به‌جای آب تازه شهر مورد استفاده قرار گیرند. آب خاکستری به جریان‌هایی اطلاق می‌شود که از لحاظ بار آلاینده چندان آلوده نبوده و با انجام تصفیه جزئی نظیر فرآیندهای ساده غشایی، امکان استفاده مجدد را خواهند داشت. جریان‌های سیاه نیز جریان‌هایی هستند که میزان بار آلودگی آن‌ها بسیار بالا بوده و نیازمند فرآیندهای تصفیه پیچیده و عموماً مستلزم صرف هزینه بالا می‌باشند.

اساس طبقه‌بندی در این بخش، مبتنی بر منطق فازی^۴ بوده و به‌جای اینکه جریان‌ها را به یکی از حالت‌های تمیز یا کثیف (۰ یا ۱) در نظر بگیریم، بر اساس نوع کاربردها در بحث استفاده مجدد، تقسیم‌بندی می‌کنیم. مزیت اصلی این کار در این است که ضمن ممانعت از اختلاط جریان‌های پساب با کیفیت‌های مختلف و تولید حجم بالایی از فاضلاب سخت تصفیه‌پذیر، از هدررفت جریان‌های پساب با کیفیت قابل قبول که پتانسیل قابل توجهی برای بازیافت و بازچرخانی به سیستم تولید را دارد، جلوگیری می‌شود. مزیت دیگر طبقه‌بندی جریان‌ها، مشخص شدن پتانسیل استفاده مجدد و بازیافت برای هر جریان و اهمیت اقتصادی آن در کل فرآیند تولید است. پتانسیل بازیافت، نه فقط به معنای بازیافت آب بلکه به معنای بازیافت منابع به‌طور عام است. نگاه یکپارچه به مقوله مدیریت مصرف آب و تولید فاضلاب در کنار طبقه‌بندی جریان‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل بازیافت بر اساس منطق فازی امکان مدیریت بهتر هزینه‌ها و کمینه‌سازی اتلاف منابع را در سطح واحد صنعتی فراهم می‌آورد.

۴- ارائه راهکارهای مهندسی

پس از مشخص شدن وضعیت کلی جریان‌های آب و پساب، راهکارهای مهندسی لازم با توجه به شرایط، پیشنهاد می‌گردد. در این بخش از روش‌های موسوم به "پینچ آب" و "انتگراسیون فرآیند" استفاده می‌شود. پینچ آب، روشی ریاضی است که طی آن کمترین میزان مصرف آب قابل دسترس در یک واحد صنعتی با در نظر گرفتن الزامات و محدودیت‌های فرآیندی، محاسبه گردیده و شبکه آب واحد بر اساس رسیدن به آن طراحی یا اصلاح می‌گردد. به مجموعه این اصول، اصول انتگراسیون

³ Profile

⁴ Fuzzy Logic

فرآیند اطلاق می‌گردد [6]. در بحث طراحی و اصلاح شبکه، سه رویکرد عمده کاهش^۵، استفاده مجدد^۶ و بازیافت^۷ مدنظر قرار گرفته و راهکارهای مهندسی بر اساس یک یا مجموعه‌ای از این رویکردها ارائه خواهند شد [7].

در رویکرد کاهش، هدف اصلی این است که به گونه‌ای فرآیند را تغییر دهیم که نیاز ذاتی به آب کاهش یابد. به عنوان مثال، تغییر برج خنک‌کننده تر به برج خشک نمونه‌ای از این تغییرات فرآیندی است که موجب کاهش نیاز به آب می‌شود. تأکید رویکرد استفاده مجدد، بر جریان‌های خاکستری است، یعنی جریان‌هایی که نیاز به تصفیه چندانی نداشته و معمولاً با فرآیندهای تصفیه جزئی امکان استفاده مجدد در بخش‌هایی غیر از بخشی که در آن تولید شده را دارند. در بازیافت، جریان‌های با میزان بار آلودگی بالا که ارزش بازیافت و بازچرخانی دارند، با استفاده از فرآیندهای تصفیه پیچیده، تصفیه شده و آب یا منابع دیگر جدا شده طی آن، در هریک از بخش‌های واحد صنعتی که نیاز باشد، به مصرف می‌رسند.

۵- ارزیابی اقتصادی

در بحث ارزیابی اقتصادی، هزینه‌های مربوط به راهکارهای ارائه شده در مرحله قبل، به طور کامل تعیین شده و سود ناشی از اعمال این راهکارها نیز محاسبه می‌گردد. از طریق تابع هزینه‌های مربوط به هر راهکار، تعریف شده و تلاش می‌شود در بعد فنی و مهندسی راهکارها، شرایطی مدنظر قرار گیرد که این تابع هزینه‌ها کمینه شده یا در شدیدترین شرایط، بهینه گردد. ارزیابی اقتصادی شامل تعیین مشخصات، طراحی تجهیزات و تعیین هزینه‌ها برای هریک از راهکارها به منظور رسیدن به بهترین نتیجه است.

۶- نتیجه‌گیری

اگرچه میزان مصرف آب در صنایع در مقایسه با سایر بخش‌های مصرف‌کننده آب، چندان قابل توجه نیست ولی به خاطر نقش تأثیرگذاری که صنایع در رشد تولید ناخالص ملی و توسعه پایدار کشور دارند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. رویکردهای موجود در حوزه مدیریت مصرف آب صنایع به دلیل فقدان نگاه یکپارچه و نبود تفکر پایدار، اغلب کارآمد نبوده و منجر به اتلاف قابل توجه منابع در صنایع می‌شود. ضمن اینکه حجم بالای فاضلاب تولیدی در صنایع که عموماً حاوی بار آلاینده بالایی هم هستند، آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به محیط زیست وارد می‌آورد. از این رو در بسته پیشنهادی حاضر، نظام یکپارچه‌ای موسوم به نظام مدار بسته آب به منظور مدیریت مصرف آب و تولید فاضلاب در صنایع معرفی می‌گردد که علاوه بر امکان مدیریت هزینه‌ها، اطلاعات

⁵ Reduce

⁶ Reuse

⁷ Recovery



مفیدی از جریان گردش آب و مواد در سطح واحد صنعتی فراهم می‌آورد. پیاده‌سازی این نظام در صنایع، می‌تواند گام مؤثری در ارتقاء بهره‌وری در حوزه آب و مواد بوده و نقش انکارناپذیری در توسعه پایدار کشور داشته باشد.

۷- مراجع

- [1] ه. اصغرنژاد، م. صراف‌زاده "مقایسه مدیریت مصرف آب صنایع در ایران و جهان و نقش آن در توسعه پایدار" ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه کردستان، سنندج، ۱۳۹۵.
- [2] R. Connor, "The United Nations World Water Development Report: Water and Jobs," UNESCO, Paris, 2016.
- [3] R. Connor, "The United Nations Water Development Report: Wastewater, The untapped resource," UNESCO, Paris, 2017.
- [4] D. Swami and D. Buddhi, "Removal of contaminants from industrial wastewater through various non-conventional technologies: a review," *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 24, no. 4, pp. 324-346, 2006.
- [5] J. S. Guest, S. J. Skerlos, M. B. Beck, G. T. Daigger, H. Hilger, S. Jackson, K. Karvazy, L. Kelly, L. Macpherson, J. R. Mihelcic, A. Pramanic, L. Raskin, M. C. M. van Loosdrecht, D. Yeh and N. G. Love, "A New Planning and Design Paradigm to Achieve Sustainable Resource Recovery from Wastewater," *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 16, pp. 6126-6130, 2009.
- [6] D. C. Foo, *Process Integration for Resource Conservation*, Florida, U.S: CRC Press, 2012.
- [7] C. R. C. Mohanty, "Reduce, reuse and recycle (the 3Rs) and resource efficiency as the basis for sustainable waste management.," in *Proceedings of the Synergizing Resource Efficiency with Informal Sector towards Sustainable Waste Management*, New York, USA, 2011.