



## راهبردهای نوین شناسایی و کنترل آلودگی در شبکه‌های توزیع آب: از پایش لحظه‌ای تا هوش مصنوعی



دکتر جعفر یزدی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست،  
پردیس شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی و عضو  
هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران

شبکه‌های توزیع آب یکی از زیرساخت‌های کلیدی در هر جامعه محسوب می‌شوند که برای رساندن آب سالم و مطلوب به مصرف‌کنندگان ایجاد شده‌اند. گستردگی این شبکه و نیاز همگانی به آن، سبب شده است تا در برابر عوامل ایجاد آلودگی – چه عمدی (به‌صورت خرابکاری) و چه غیرعمدی (مانند نفوذ آلاینده‌ها از طریق شکستگی‌ها) – شکننده و آسیب‌پذیر باشد. در بسیاری از نقاط جهان، رخداد آلودگی در شبکه توزیع آب هزینه‌های جانی و مالی سنگینی به‌دنبال داشته و لزوم پایش مداوم و مدیریت پیشگیرانه را دوچندان کرده است. اهمیت یافتن منبع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب از آن‌جا ناشی می‌شود که هرگونه تأخیر در تشخیص و مهار این آلودگی‌ها می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت عمومی و اقتصاد جامعه داشته باشد. آب آشامیدنی یکی از حیاتی‌ترین نیازهای انسان است و هرگونه تغییر در کیفیت آن می‌تواند موجب گسترش بیماری‌های عفونی و همه‌گیری شود. از این‌رو، شناسایی سریع منشأ آلودگی در شبکه و جلوگیری از گسترش آن، افزون بر صیانت از سلامت جامعه، از تحمیل هزینه‌های سنگین بر سیستم‌های درمانی و اقتصادی کشور جلوگیری می‌کند.

برای کنترل سریع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب، ابتدا لازم است از فناوری‌های پایش لحظه‌ای (آنلاین) کیفیت آب استفاده

شود. این فناوری‌ها با کمک حسگرهای چندپارامتری (شامل سنجش کلر باقی‌مانده، کدورت، هدایت الکتریکی و pH) امکان تشخیص تغییرات ناگهانی کیفیت آب را فراهم می‌کنند. در گام دوم، بهره‌گیری از روش‌های هیدرولیکی و مدل‌های هیدرودینامیک (نظیر EPANET) کمک می‌کند که با توجه به الگوی جریان، منبع یا منشأ احتمالی آلودگی در شبکه شناسایی شود. همچنین، اندازه‌گیری آزمایشگاهی میکروبی (با روش‌های متداول کشت باکتریایی یا روش‌های مولکولی سریع مانند Real-Time PCR) و تعیین نوع آلاینده‌ها گام مهم دیگری است تا تیم‌های عملیاتی بتوانند با اقدامات ضدعفونی‌کننده (تزریق کلر یا مواد گندزدا) و کنترل هیدرولیکی (بستن یا محدود کردن محدوده‌های آلوده) به شکل مؤثر از گسترش بیشتر آلودگی جلوگیری کنند.

در ایران نمونه‌های متعددی از حوادث آلودگی در شبکه‌های توزیع آب رخ داده است که می‌تواند زنگ هشدار برای ضرورت پایش دقیق‌تر باشد. به‌عنوان مثال، در سال‌های اخیر حادثه کدورت و آلودگی احتمالی میکروبی در شهرکرد به‌دلیل سیلاب‌ها و اختلال در منابع آب سطحی رخداد و سبب نگرانی جدی شهروندان شد. در برخی مناطق تهران نیز در مقاطعی، گزارش‌هایی از افت کلر باقی‌مانده و نگرانی از رشد باکتری‌های شاخص ارایه شد که با مدیریت سریع و تزریق به‌موقع مواد گندزدا، وضعیت پایداری به‌دست آمد. همچنین در شهرهای ساحلی ایران، به‌ویژه در استان‌های شمالی و جنوبی، ورود آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی به منابع آب سطحی نیز از جمله مواردی بوده که سیستم توزیع را در معرض خطر قرار داده است. برای پیشگیری و کنترل بهتر این حوادث، تحقیقات نوینی در حال شکل‌گیری است. یکی از حوزه‌های جذاب، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نقاط با ریسک بالاتر آلودگی است. در این روش، با تحلیل داده‌های حجیم (Big Data) ثبت‌شده از حسگرها و آزمایش‌های دوره‌ای، می‌توان الگوهای پنهان آلودگی را شناسایی و هشدارهای زودهنگام صادر کرد. همچنین، توسعه حسگرهای ارزان‌قیمت و کم‌مصرف برای استقرار گسترده در شبکه، استفاده از روش‌های تشخیصی سریع مانند سنجش آنلاین پارامترهای میکروبی یا ترکیبات آلی و حتی کاربرد فناوری‌های نانو برای حذف انتخابی آلاینده‌های خاص، از دیگر زمینه‌های تحقیقاتی رو به گسترش است. این تلاش‌های پژوهشی می‌تواند پشتیبانی قوی برای شرکت‌های آب و فاضلاب در شناسایی، پیشگیری و کنترل به‌موقع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی فراهم آورد.