همتاهای دیجیتال، فناوری تحول آفرین در مدیریت آب شهری

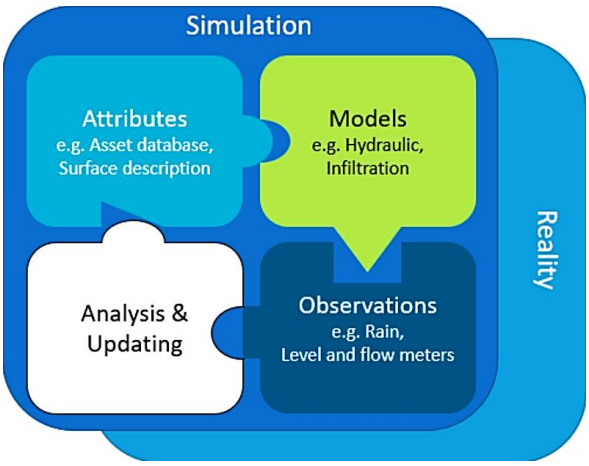
دکتر علی حقیقی
استاد دانشگاه شهید چمران اهواز و
سردبیر نشریه

امروز همه می‌دانیم که کشور عزیزمان ایران با بحران‌های آبی و محیط‌زیستی کم سابقه‌ای رو به رو است و این مهم چالش‌های پیچیده‌ای را برای مدیریت منابع آب کشور به‌وجود آورده است. کمبود آب به‌دلیل تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و مصرف بی‌رویه آب توامان با آلودگی روزافزون منابع موجود و توسعه ناپایدار کشاورزی و صنعت، معضلات بزرگی برای مدیریت منابع آب کشور ایجاد کرده است. در کنار همه اقدامات و روش‌های علمی موثر برای مقابله با این چالش‌ها، آگاهی و استفاده صحیح از فناوری‌های نوین مبتنی بر پایش مستمر و کنترل زمان واقعی (Real-time control) سیستم‌های منابع آب امری ضروری است.

مدیریت آب شهری شامل چالش‌های متعدد اما به‌هم پیوسته‌ای در زمینه تأمین، انتقال و توزیع آب، جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی و فاضلاب و تصفیه آب شرب و فاضلاب و درنهایت بازچرخانی پساب تصفیه‌شده است. اگر فقط بر مدیریت زیرساخت‌های موجود تمرکز کنیم، می‌توان گفت که فرسودگی این تأسیسات از یک‌سو و کاهش تاب‌آوری آن‌ها به‌دلیل فشارهای روزافزون از سوی دیگر، نیاز به راه‌حل‌های نوآورانه را تأکید می‌کند که می‌توانند به بهبود کارآیی، پایداری و انطباق در برابر فشارهای رو به افزایش سیستم‌های آب شهری کمک کنند و زمینه را برای تعمیر و نگهداری موثرتر آن‌ها فراهم سازند.

در سال‌های اخیر، مفهومی تحت‌عنوان همتاهای دیجیتال (Digital Twins) به‌عنوان یک فناوری امیدبخش در صنایع مختلف معرفی شده است. یک همتای دیجیتال، یک نمونه مجازی از یک سیستم فیزیکی است که از داده‌های زمان واقعی و تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی، نظارت و بهینه‌سازی عملکرد آن سیستم استفاده می‌کند. ایده اصلی همتاهای دیجیتال برای نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ توسط David Gelernter و با انتشار کتابی به نام "آینه‌های جهان" مطرح شد. این ایده سپس در سال ۲۰۰۲ توسط Michael Grieves، در کنفرانس انجمن مهندسان ساخت و تولید در دانشگاه میشیگان تشریح و به دانشمندان و مهندسان مکانیک معرفی شد. با این‌حال، ناسا نقش مهمی در توسعه مفهوم همتاهای دیجیتال ایفا کرد، چنان‌که در سال ۲۰۱۰، John Vickers از ناسا از این فناوری برای شبیه‌سازی کپسول‌های فضایی استفاده کرد (Wikipedia). از آن‌زمان تا به امروز، این مفهوم به‌عنوان یکی از چشم‌اندازهای استراتژیک در فناوری شناخته‌شده و توسعه آن در مجموعه‌ای از برنامه‌ها و فرآیندهای صنعتی و مدیریت شهری ادامه دارد.

- توسعه یک همتای دیجیتال برای سیستم‌های آب شهری شامل ادغام شبکه‌های حسگر، تجزیه و تحلیل داده و مدل‌های محاسباتی ریاضی و هوش مصنوعی برای ایجاد یک شبیه‌سازی پویا و زمان واقعی از تمام فرایندهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفیت آب است. این همتاهای دیجیتال فهم عمیقی از شرایط سیستم را فراهم می‌کنند و به بهره‌برداران امکان می‌دهند تا عملکرد سیستم را با جزئیات بیشتری نظارت و تجزیه و تحلیل کنند. این قابلیت در شناسایی ناکارآمدی‌ها، پیش‌بینی شکست‌ها و خطاهای سیستم و بهینه‌سازی تخصیص منابع در چرخه آب شهری بسیار ارزشمند است. هم‌چنین از دیگر مزایای توسعه همتاهای دیجیتال برای زیرساخت های آب شهری می‌توان به بهینه‌سازی بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، برنامه‌ریزی ارتقا و به‌روز رسانی مداوم سیستم، بهبود انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و اعتمادپذیری سیستم با کمک تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌ها اشاره نمود. شکل ۱ مدل مفهومی یک همتای دیجیتال در یک سیستم آب شهری را نشان می دهد. در این شکل اجزای مختلف سیستم به‌صورت اجزای پازل تلاش می‌کنند تا واقعیت فیزیکی مسئله را بازنمایی کنند.



شکل ۱- مدل مفهومی یک همتای دیجیتال و اجزای پازل آن برای شبیه سازی سیستم آب شهری (Pedersen et al. 2021)

با این‌حال علی‌رغم رشد قابل‌توجه این فناوری و استفاده روزافزون آن در شهرهای پیشرفته جهان، هنوز مقدمات آن برای پیاده‌سازی در کشور ما چندان فراهم نیست. در حقیقت راهبرد توسعه فناوری همتاهای دیجیتال برای مدیریت آب شهری در ایران نیازمند یک سلسله اقدامات گسترده و هماهنگ است که در ادامه به اهم آن‌ها اشاره می‌شود:

- توسعه شبکه حسگرها و تجمیع داده‌ها؛
- توسعه مدل‌های محاسباتی پیشرفته برای شبیه‌سازی دقیق فرایندها در سیستم‌های آب شهری؛
- توسعه مدل‌های قابل‌اعتماد بهینه‌سازی، طبقه‌بندی و رگرسیون هوشمند مبتنی بر داده و مدل ریاضی؛
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی بر مبنای داده‌های شهری، هواشناسی و آلودگی زمین و هوا برای تخمین مقدار و الگوی مصرف آب، آلاینده‌ها و سایر پارامترهای اثرگذار در سیستم‌های آب شهری؛
- تطبیق همتاهای دیجیتال با سیاست‌های ملی و محلی مدیریت آب؛
- ارتقای قانون‌ها و مقررات مربوط به حقوق آب و مدیریت آب شهری؛
- آموزش و فرهنگ‌سازی، ارتقای آموزش‌های فنی و علمی در زمینه توسعه و استفاده از همتاهای دیجیتال در دانشگاه‌ها و شرکت‌های آب و فاضلاب؛
- همکاری سیستماتیک میان صنایع، دولت و دانشگاه‌ها؛
- اتخاذ تدابیر امنیتی برای حفاظت از داده‌های حساس مرتبط با همتاهای دیجیتال و پیشگیری از حملات سایبری و دسترسی غیرمجاز به سیستم؛
- تخصیص منابع مالی مناسب برای توسعه و نگهداری همتاهای دیجیتال.

بدون تردید ایجاد این هماهنگی‌ها و پیش‌نیازها همکاری همه‌جانبه ارگان‌های مرتبط را می‌طلبد و در این‌میان شرکت‌های آب و فاضلاب و دانشگاه‌ها مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند. در درجه اول لازم است آگاهی و احساس نیاز جدی به توسعه و به‌کارگیری همتاهای دیجیتال و فناوری‌های داده‌محور در مدیریت کلان منابع آب کشور ایجاد شود و سپس اراده و اهمیت آن همراه با حمایت‌های مالی و تشکیلاتی به بخش‌های اجرایی و تحقیقاتی مرتبط منعکس شود. با نگاه جزئی‌تر به اجزای همتاهای دیجیتال پی می‌بریم که هیچ‌کدام به تنهایی موضوع چندان جدیدی در کشور ما نیست و دانش فنی آن در دسترس است. موضوعاتی مانند توسعه مدل‌های شبیه‌سازی ریاضی، بهینه‌سازی، سیستم‌های تصمیم‌یار، هوشمندسازی ایستگاه‌های پمپاژ و مدیریت انرژی، مدل‌های هوش مصنوعی داده‌محور برای تعیین نشت و سایر اشکال آب‌های بدون‌درآمد، توسعه مدل‌های کنترل زمان واقعی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، داده‌کاوی و شناسایی الگوهای موجود در فرایندهای هیدرولوژی، هیدرولیک و کیفیت آب، همه موضوعاتی هستند که در دو دهه اخیر در کشور ما مطرح هستند و دست کم در سطح دانشگاه‌ها پیشرفت‌های قابل‌توجهی در این موضوعات شاهد هستیم. با این‌حال مفهوم همتای دیجیتال به‌عنوان یک فناوری یک‌پارچه‌سازی و بهره‌برداری سیستماتیک از این پیشرفت‌ها در عمل دیده نمی شود. توسعه و استقرار همتاهای دیجیتال جدا از منافع بی‌شماری که برای صنعت و مدیریت آب شهری دارد می‌تواند از پراکنده‌کاری، صرف هزینه‌های زیاد و اتلاف انرژی محققان و مهندسان مرتبط بکاهد و در عین‌حال سبب تشویق، ارتقای دانش و هم‌سویی و هم‌افزایی تحقیقات آن‌ها شود. این مهم به‌نوبه خود زمینه را برای حل مسائل پیچیده در مدیریت منابع آب کشور فراهم خواهد ساخت. در این راستا توجه به دستاوردها و تجربیات سایر کشورها بسیار رهگشا و آموزنده خواهد بود. در انتها به‌عنوان نمونه، چند کاربرد موفق از توسعه همتاهای دیجیتال در بخش‌های مختلف آب شهری در زیر ارائه می‌شود.

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., and Stisen, S.A., (2023), "New digital twin for climate change adaptation, water management, and disaster risk reduction (HIP digital twin)", *Water*, *15*, 25, https://doi.org/10.3390/w15010025.

Ramos, H.M., Kuriqi, A., Coronado-Hernández, O.E., López-Jiménez, P.A., and Pérez-Sánchez, M., (2023), "Are digital twins improving urban-water systems efficiency and sustainable development goals?", *Urban Water Journal*, https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2180396.

Pedersen, A.N., Borup, M., Brink-Kjær, A., Christiansen, L.E., and Mikkelsen, P.S., (2021), "Living and prototyping digital twins for urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors", *Water*, *13*, 592. https://doi.org/10.3390/w13050592.

Pesantez, J.E., Alghamdi, F., Sabu, S., Mahinthakumar, G., and Zechman Berglund, E., (2022), "Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic", *Sustainable Cities and Society*, 77, 103520, https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103520.

Valverde-Pérez, B., Johnson, B., Wärff, C., Lumley, D., Torfs, E., Nopens, I., and Townley, L., (2021), "Digital water: Operational digital twins in the urban Water sector: Case studies", *IWA*, Available at: https://iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies/

Walter, C., (2024), "Digital technologies for the future of the water sector? Examining the discourse on digital water", *Geoforum*, 148, 103918, https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103918.

Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin