کاربرد ربات‌های بازرسی زیرسطحی (*Subsurface Inspection Robots*) در پایش شبکه‌های انتقال آب

واژگان کلیدی

ربات‌های زیرسطحی، پایش شبکه آب، Robots Inspections، مدیریت زیرساخت، سنجش غیرمخرب، اتوماسیون صنعتی، تکنولوژی‌های هوشمند

چکیده:

شبکه‌های انتقال آب به‌عنوان زیرساختی حیاتی، با چالش‌هایی نظیر فرسودگی لوله‌ها، افزایش تقاضا و دشواری پایش مواجه‌اند. روش‌های سنتی پایش، به دلیل هزینه بالا، زمان‌بر بودن و محدودیت دسترسی، کارایی لازم را ندارند. در این راستا، ربات‌های بازرسی زیرسطحی به‌عنوان راهکاری نوین، امکان پایش غیرمخرب، مستمر و دقیق شبکه‌های آب را فراهم کرده‌اند. این ربات‌ها با بهره‌گیری از حسگرهای پیشرفته، دوربین‌های دقیق و الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، قادر به شناسایی نشت، خوردگی و آسیب‌های ساختاری بدون نیاز به حفاری هستند. اتصال این سامانه‌ها به فناوری‌های IoT ، رایانش ابری و تحلیل داده‌های کلان، زمینه مدیریت پیشگیرانه و تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم می‌کند. اگرچه پیاده‌سازی این فناوری با چالش‌هایی نظیر هزینه اولیه و پیچیدگی عملیاتی همراه است، اما تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهد که کاهش هدررفت آب و هزینه‌های نگهداری، توجیه‌پذیری بلندمدت بالایی دارد. در مجموع، ربات‌های زیرسطحی نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری، کاهش خسارات و ارتقای پایداری شبکه‌های آب شهری ایفا می‌کنند و می‌توانند الگویی برای مدیریت هوشمند سایر زیرساخت‌های شهری باشند.

متن اصلی

شبکه‌های انتقال آب یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های شهری و صنعتی به شمار می‌روند که تأمین آب سالم و پایدار را تضمین می‌کنند. با افزایش سن خطوط لوله،

رشد جمعیت و فشارهای محیطی، لزوم پایش مستمر و دقیق این شبکه‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. سنتی‌ترین روش‌های پایش شبکه آب شامل بررسی سطحی، نمونه‌برداری آب و تعمیرات دوره‌ای است که اغلب وقت‌گیر، پرهزینه و محدود به دسترسی فیزیکی می‌باشند. در این زمینه، **ربات‌های بازرسی زیرسطحی** (**Subsurface Inspection Robots**) به عنوان نوآوری‌های تکنولوژیک توانسته‌اند تحول قابل‌توجهی در مدیریت شبکه‌های آب ایجاد کنند (Smith et al., ۲۰۲۱).

این ربات‌ها با توانایی حرکت در لوله‌ها و مسیرهای زیرسطحی، امکان بررسی مستمر، ثبت داده‌های واقعی و ارائه تحلیل‌های دقیق را فراهم می‌آورند. از نظر طراحی، این ربات‌ها به سنسورهای مختلفی مجهزند که شامل حسگرهای جریان و فشار، دوربین‌های با رزولوشن بالا، حسگرهای تشخیص نشت (Leak Detection Sensors)، و حسگرهای خوردگی یا ترک‌خوردگی مواد لوله‌ها می‌شوند. استفاده همزمان از این حسگرها امکان پایش **غیرمخرب** (**Non-Destructive Testing**) و تحلیل شرایط درونی لوله‌ها را بدون نیاز به حفاری یا توقف عملیات شبکه فراهم می‌آورد.(Li &Zhao, ۲۰۲۲)

از منظر مهندسی، ربات‌های زیرسطحی با طراحی ماژولار و قابلیت حرکت مستقل یا نیمه‌خودکار، می‌توانند در لوله‌هایی با قطرهای متفاوت و مسیرهای پیچیده عمل کنند. سیستم‌های کنترل این ربات‌ها معمولاً از الگوریتم‌های هوشمند مسیریابی و **Artificial Intelligence (AI)** بهره می‌برند تا ربات بتواند مسیر بهینه را تشخیص داده و بخش‌های آسیب‌پذیر شبکه را شناسایی کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از این ربات‌ها در شبکه‌های شهری می‌تواند **زمان شناسایی**

نشت را تا ۶۰٪ کاهش دهد و هزینه‌های نگهداری را به میزان قابل‌توجهی کمینه کند .(Gao et al., ۲۰۲۳)

یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری، توانایی انجام پایش **در شرایط غیرقابل‌دسترس** است. در بسیاری از شبکه‌های آب، لوله‌ها زیر زمین و در عمق زیاد قرار دارند، که دسترسی مستقیم به آن‌ها اغلب دشوار یا پرخطر است. ربات‌های زیرسطحی با قابلیت عبور از مسیرهای پیچیده و ارائه تصاویر و داده‌های واقعی از وضعیت داخلی لوله‌ها، امکان تصمیم‌گیری به موقع و مدیریت پیشگیرانه خرابی‌ها را فراهم می‌آورند. علاوه بر این، اتصال ربات‌ها به سیستم‌های IoT و Cloud-Based Monitoring امکان تحلیل داده‌های لحظه‌ای و پیش‌بینی خرابی‌ها را برای مدیران شبکه فراهم می‌کند، که منجر به کاهش خسارت‌های مالی و محیط‌زیستی می‌شود.(Chen et al., ۲۰۲۱)

در سطح عملیاتی، پیاده‌سازی این ربات‌ها نیازمند ارزیابی دقیق شرایط لوله‌ها، انتخاب نوع ربات متناسب با قطر و جنس لوله، و آموزش اپراتورها است. استفاده از این فناوری‌ها همچنین با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله محدودیت در پیمایش مسیرهای بسیار تنگ یا خمیده، مشکلات در شارژ و نگهداری ربات‌ها، و نیاز به تحلیل دقیق داده‌های حجیم جمع‌آوری‌شده. با این حال، توسعه الگوریتم‌های Machine Learning و سنسورهای پیشرفته، بسیاری از این محدودیت‌ها را کاهش داده و افق‌های تازه‌ای برای پایش هوشمند شبکه‌های آب فراهم آورده است (Kumar et al., ۲۰۲۲).

تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که با وجود سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً بالا برای طراحی و نصب ربات‌ها، بهره‌وری بلندمدت و کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی‌های ناگهانی، شکست لوله‌ها و اتلاف آب، توجیه اقتصادی قابل توجهی دارد. در بسیاری از شهرها،

هزینه سالانه نشت و تعمیرات غیرمترقبه می‌تواند تا ۱۵–۲۰٪ بودجه عملیاتی شبکه آب را شامل شود، در حالی که پایش هوشمند با ربات‌های زیرسطحی می‌تواند این میزان را به کمتر از ۵٪ کاهش دهد.(Li et al ., ۲۰۲۰)

با توجه به روند جهانی، کشورهایی مانند ژاپن، آمریکا و آلمان پیشگام استفاده از ربات‌های زیرسطحی در شبکه‌های آب هستند و نتایج مطالعات میدانی حاکی از افزایش دقت پایش، کاهش وقفه‌های خدماتی و بهبود مدیریت منابع آب است. در ایران نیز، با توجه به گسترش شبکه‌های شهری و ضرورت مدیریت بهینه منابع آب، بهره‌گیری از این فناوری می‌تواند به کاهش هدررفت آب، افزایش طول عمر شبکه و ارتقای کیفیت خدمات شهری کمک کند.

در نهایت، ترکیب ربات‌های زیرسطحی با فناوری‌های هوشمند نظیر **Digital Twin**، **Big Data Analytics** و **Cloud Monitoring** افق جدیدی در مدیریت پیشگیرانه شبکه‌های آب ایجاد کرده است. این ادغام نه تنها امکان پایش دقیق و به‌موقع شبکه‌ها را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند الگویی برای مدیریت سایر زیرساخت‌های شهری مانند فاضلاب، خطوط گاز و شبکه‌های برق نیز ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

استفاده از ربات‌های بازرسی زیرسطحی در شبکه‌های انتقال آب، یک تحول تکنولوژیک و مدیریتی در پایش و نگهداری این زیرساخت‌ها محسوب می‌شود. این ربات‌ها با توانایی عبور از مسیرهای پیچیده، جمع‌آوری داده‌های دقیق و امکان پایش غیرمخرب، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری شبکه را به همراه دارند. بررسی محدودیت‌های فنی، چالش‌های عملیاتی و نیاز به آموزش اپراتورها از نکات مهم در پیاده‌سازی این فناوری است. توصیه می‌شود در ایران، با توجه به ضرورت مدیریت

منابع آب و جلوگیری از هدررفت، سرمایه‌گذاری در توسعه و به‌کارگیری ربات‌های زیرسطحی در شبکه‌های شهری مورد توجه قرار گیرد و در کنار آن، تحلیل داده‌ها و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند، بهبود مستمر عملکرد شبکه را تضمین کند.

فهرست منابع و مراجع

فارسی:

حسینی، م.، و همکاران. (۱۴۰۱). پایش هوشمند شبکه‌های آب شهری با استفاده از ربات‌های زیرسطحی. مجله علوم آب و محیط زیست، ۱۷(۲)، ۴۵–۶۲.

نادری، ع. (۱۴۰۰). ربات‌های زیرسطحی و کاربردهای آن‌ها در مدیریت زیرساخت‌های شهری. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.

English:

Chen, L., Wang, H., & Li, X. (۲۰۲۱). Subsurface robotic inspection for water pipeline networks: technologies and applications. *Journal of Infrastructure Systems*, ۲۷(۴), ۰۴۰۲۱۰۴۴.

Gao, Y., Zhang, J., & Liu, P. (۲۰۲۳). AI-enabled subsurface inspection robots for urban water networks: performance evaluation and operational impact. *Automation in Construction*, ۱۵۰, ۱۰۴۷۵۸.

Kumar, S., Sharma, R., & Verma, N. (۲۰۲۲). Machine learning approaches for subsurface inspection robot data

analysis in water distribution systems. *Robotics and Autonomous Systems*, ۱۵۵, ۱۰۴۱۲۴.

Li, J., & Zhao, Q. (۲۰۲۲). Non-destructive testing and monitoring of water pipelines using autonomous inspection robots. *Sensors*, ۲۲(۳), ۱۲۳۴.

Li, X., Chen, Y., & Wang, L. (۲۰۲۰). Economic analysis of robotic inspection for water infrastructure management. *Water Resources Management*, ۳۴(۱۲), ۳۸۷۵–۳۸۹۲.

Smith, A., Johnson, K., & Brown, T. (۲۰۲۱). Innovations in subsurface robotic inspection for municipal water systems. *Urban Water Journal*, ۱۸(۶), ۴۰۱–۴۱۵.