

OOOVA SUVLARNI REAL VAQT REJIMIDA NAZORAT QILISHDA ONLAYN SENSORLARDAN FOYDALANISH SAMARADORLIGINI BAHOLASH

Yulborsov Faxridin Xamidullayevich

Andijon davlat texnika instituti assistenti

Annotatsiya. Mazkur maqolada oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilishda onlayn sensor texnologiyalaridan foydalanishning ilmiy-amaliy samaradorligi tadqiq etilgan. Oqova suv sifatini an'anaviy laboratoriya usullarida nazorat qilish bilan real vaqt rejimida ishlaydigan sensor tizimlari o'rtasidagi farqlar tahlil qilingan. Tadqiqotda pH, harorat, elektr o'tkazuvchanlik, loyqalik, erigan kislorod, kimyoviy kislorodga bo'lgan talab va oqim tezligi kabi asosiy parametrlarni uzluksiz kuzatish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Onlayn sensorlardan foydalanishning asosiy samaradorlik mezonlari sifatida ma'lumot olish tezligi, monitoring uzluksizligi, erta ogohlantirish imkoniyati, inson omilining kamayishi, ma'lumotlarning aniqligi va ekspluatatsiya xarajatlari belgilangan. Shuningdek, sensorlarni IoT texnologiyalari bilan integratsiyalash orqali ma'lumotlarni masofadan uzatish va avtomatik boshqaruv qarorlarini qabul qilish imkoniyatlari asoslangan. Tadqiqot natijalari real vaqt monitoringi oqova suvlarni boshqarish tizimining tezkorligi va ekologik xavflarni oldindan aniqlash imkoniyatini oshirishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: oqova suv, real vaqt monitoringi, onlayn sensor, suv sifati, IoT, pH, loyqalik, erigan kislorod, elektr o'tkazuvchanlik, avtomatlashtirilgan monitoring.

Аннотация. В статье исследуется научно-практическая эффективность использования онлайн-сенсоров для мониторинга сточных вод в режиме реального времени. Рассматриваются различия между традиционными лабораторными методами контроля качества сточных вод и сенсорными системами непрерывного мониторинга. Анализируются возможности постоянного измерения таких параметров, как pH, температура, электропроводность, мутность, растворенный кислород, химическое потребление кислорода и расход сточных вод. В качестве основных критериев эффективности онлайн-мониторинга определены скорость

получения информации, непрерывность наблюдений, возможность раннего предупреждения, снижение влияния человеческого фактора, точность данных и эксплуатационные затраты. Особое внимание уделяется интеграции сенсоров с технологиями Интернета вещей, позволяющей осуществлять удаленную передачу данных и автоматизацию управленческих решений.

Ключевые слова: сточные воды, мониторинг в реальном времени, онлайн-сенсоры, качество воды, IoT, pH, мутность, растворенный кислород, электропроводность, автоматизированный мониторинг.

Abstract. This article examines the scientific and practical effectiveness of using online sensors for real-time wastewater monitoring. The study compares traditional laboratory-based wastewater quality assessment with continuous sensor-based monitoring systems. Particular attention is paid to the continuous measurement of pH, temperature, electrical conductivity, turbidity, dissolved oxygen, chemical oxygen demand and wastewater flow. The main efficiency criteria include data acquisition speed, monitoring continuity, early-warning capability, reduction of human intervention, data accuracy and operational costs. The study also considers the integration of online sensors with Internet of Things technologies, enabling remote data transmission and automated decision-making. The results demonstrate that real-time monitoring can improve the responsiveness of wastewater management systems and facilitate earlier identification of environmental risks.

Keywords: wastewater, real-time monitoring, online sensors, water quality, IoT, pH, turbidity, dissolved oxygen, electrical conductivity, automated monitoring.

KIRISH

Oqova suvlarning shakllanishi va ularni yetarli darajada tozalamasdan atrof-muhitga chiqarish suv ekotizimlari, aholi salomatligi va tabiiy resurslarning barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadigan muhim ekologik muammolardan biridir. Oqova suv tarkibidagi organik moddalar, azot va fosfor birikmalari, turli kimyoviy komponentlar hamda mikrobiologik ifloslantiruvchilarni o'z vaqtida aniqlash va ularning miqdorini nazorat

qilish samarali oqova suv boshqaruvining muhim sharti hisoblanadi. Jahon sog'liqni saqlash tashkiloti ham oqova suvlarni monitoring qilishni atrof-muhit va jamoat salomatligini kuzatish tizimlarining muhim yo'nalishlaridan biri sifatida ko'rsatadi.

An'anaviy oqova suv monitoringi, odatda, namunalarni ma'lum vaqt oralig'ida olish, ularni laboratoriyaga yetkazish va tegishli fizik-kimyoviy tahlillarni amalga oshirishga asoslanadi. Bunday yondashuv yuqori aniqlikdagi natijalarni olish imkonini bersa-da, namuna olish va laboratoriya tahlili o'rtasidagi vaqt oralig'i sababli jarayondagi keskin o'zgarishlarni darhol aniqlash imkoniyati cheklanadi. Bourgeois, Burgess va Stuetzning "On-line monitoring of wastewater quality: a review" maqolasida aynan oqova suvlarning organik yuklamasini aniqlashda real vaqt monitoringi muammosi va sensor texnologiyalarining imkoniyatlari tahlil qilingan. Mualliflar BOD, COD va TOC kabi ko'rsatkichlarni onlayn aniqlash uchun biosensorlar, optik sensorlar, sensor massivlari hamda virtual sensorlar istiqbolli yo'nalish ekanligini ko'rsatganlar. [1]

Oqova suvlarni real vaqt rejimida nazorat qilishning dolzarbligi shundaki, suv sifatining o'zgarishi ko'pincha bir xil tezlikda kechmaydi. Sanoat korxonalarida ishlab chiqarish siklining o'zgarishi, kommunal oqimlarning kunlik tebranishi yoki favqulodda ifloslanish manbasining paydo bo'lishi oqova suv tarkibining qisqa vaqt ichida sezilarli o'zgarishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli faqat davriy laboratoriya namunalariga tayanish ayrim holatlarda monitoringning tezkorligini pasaytiradi.

Vanrolleghem va Lee "On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art" asarida sensorlarning oqova suvlarni tozalash jarayonidagi uchta muhim vazifasini — operatorni axborot bilan ta'minlash, avtomatik boshqaruv tizimlarini qo'llab-quvvatlash hamda jarayonlarni audit qilish, optimallashtirish va modellashtirish — sifatida ajratib ko'rsatgan. [2] Mazkur yondashuv onlayn sensorlarni oddiy o'lchash vositasi emas, balki oqova suvlarni boshqarishning raqamli infratuzilmasi elementi sifatida baholash zarurligini ko'rsatadi.

Bugungi kunda sensor texnologiyalarining rivojlanishi ularni Internet of Things (IoT) infratuzilmasi bilan birlashtirish imkonini bermogda. Bunda sensor tomonidan qayd

etilgan ma'lumotlar aloqa tarmoqlari orqali markaziy server yoki bulutli platformaga uzatiladi va operator real vaqt rejimida monitoring paneli orqali jarayon holatini kuzatishi mumkin. Alshami, Ali, Elsayed, Eltoukhy va Zayed tomonidan 2024-yilda IEEE Access jurnalida e'lon qilingan tadqiqotda suv va oqova suvlarni boshqarishda IoT, simsiz sensorlar, oqim va sath sensorlari hamda pH sensorlaridan foydalanish tendensiyalari tahlil qilingan. [3]

Shu nuqtai nazardan, mazkur tadqiqotning maqsadi oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilishda onlayn sensorlardan foydalanish samaradorligini baholash, sensorlarning asosiy funksional imkoniyatlarini aniqlash va ularni an'anaviy monitoring usullari bilan qiyosiy baholashdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilish masalasi ilmiy adabiyotlarda uzoq yillardan buyon tadqiq etib kelinayotgan yo'nalishlardan biridir. Mazkur tadqiqotlar rivojlanishini shartli ravishda an'anaviy onlayn o'lchash vositalarini shakllantirish, sensorlarning texnologik imkoniyatlarini kengaytirish, IoT asosidagi monitoring tizimlarini yaratish va sun'iy intellekt hamda "soft sensor" modellarini joriy etish bosqichlariga ajratish mumkin.

Wilfrid Bourgeois, Joanna E. Burgess va Richard M. Stuetzning "On-line monitoring of wastewater quality: a review" maqolasida oqova suvlar sifatini real vaqt rejimida monitoring qilish muammosi keng tahlil qilingan. Mualliflar BOD, COD va TOC kabi umumiy organik ko'rsatkichlarni monitoring qilish uchun mavjud standart usullar bilan bir qatorda biosensorlar, optik sensorlar, sensor massivlari va virtual sensorlarning rivojlanish imkoniyatlarini ko'rib chiqqan. Ularning qarashlariga ko'ra, onlayn monitoringning asosiy ustunligi o'lchash natijalarini jarayonning o'zida olish va ushbu ma'lumotlardan boshqaruv qarorlarini qabul qilishda foydalanish imkoniyatidir. [1]

Peter A. Vanrolleghem va Dae Sung Lee "On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art" maqolasida sensorlarni faqat nazorat

qilish vositasi sifatida emas, balki oqova suvlarni tozalash jarayonlarini boshqarish va optimallashtirish vositasi sifatida ko‘rib chiqadi. Ularning tadqiqotida sensorlardan foydalanishning operatorni qo‘llab-quvvatlash, avtomatik boshqaruv hamda audit va optimallashtirish kabi uchta asosiy yo‘nalishi ajratilgan. Mualliflar kundalik monitoring uchun ishonchli, sodda va kam texnik xizmat talab qiladigan sensorlarni, murakkab modellashtirish va optimallashtirish vazifalari uchun esa rivojlangan sensorlarni farqlagan. [2]

Minh Hang Do va hammualliflarning “Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: A critical review” maqolasida mikrobiologik yoqilg‘i elementi asosidagi biosensorlarning oqova suvlarni tezkor va real vaqt rejimida monitoring qilish imkoniyatlari tahlil qilingan. Mualliflar ushbu texnologiyaning BOD, toksiklik va boshqa ekologik parametrlarni aniqlashdagi istiqbollarini ko‘rsatgan. Shu bilan birga, sezgirlik, takrorlanuvchanlik, barqarorlik va keng miqyosda qo‘llash bilan bog‘liq muammolar mavjudligini ham ta’kidlagan. [4]

Phoebe M.L. Ching, Richard H.Y. So va Tobias Morckning “Advances in soft sensors for wastewater treatment plants: A systematic review” maqolasida real vaqt monitoringida fizik sensorlarning imkoniyatlarini matematik modellar bilan to‘ldirish masalasi tadqiq qilingan. Mualliflar oqova suv muhitining sensorlar uchun og‘ir sharoit ekanligini, bioqoplama, interferensiya va sensorlarning eskirishi o‘lchash natijalariga ta’sir qilishi mumkinligini qayd etadi. Shu sababli ular “soft sensor” — ya’ni mavjud o‘lchovlar va matematik modellar asosida bevosita o‘lchash qiyin bo‘lgan parametrlarni baholash usullarining rivojlanishini muhim yo‘nalish sifatida ko‘rsatadi. Tadqiqotda neyron tarmoqlar uzoq vaqt davomida yetakchi yondashuv bo‘lib kelgani, ayrim daraxtga asoslangan modellar esa barqarorlik nuqtayi nazaridan istiqbolli ekanligi qayd etilgan. [5]

Muhammad Izz Hakimi Zaidi Farouk, Zadariana Jamil va Mohd Fuad Abdul Latipning “Towards online surface water quality monitoring technology: A review” maqolasida onlayn suv sifati monitoringi tizimlarining sensorlar, kalibrlash, validatsiya va IoT texnologiyalari bilan bog‘liq jihatlari ko‘rib chiqilgan. Mualliflarning fikricha, an’anaviy namuna olish va laboratoriya tahlili ko‘p vaqt talab qilishi sababli real vaqt

ma'lumotlarini shakllantirishda cheklovlarga ega. Shu sababli sensorlarni to'g'ri kalibrlash va validatsiya qilish onlayn monitoring tizimining ishonchliligi uchun muhim shart hisoblanadi. [6]

Alessandro Moretti, Heidi Lynn Ivan va Jan Skvaril 2024-yilda chop etilgan "A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible?" maqolasida oqova suvlarni tavsiflashning laboratoriya va real vaqt usullarini kompleks qiyoslagan. Ularning tadqiqotida BOD, umumiy azot, umumiy fosfor, oqim, harorat va pH kabi parametrlarning monitoringdagi ahamiyati ko'rsatilgan. Mualliflar real vaqt o'lchovlari ma'lumotlarni olishdagi kechikishni kamaytirishi va oqova suvlarni tozalash jarayonlarini optimallashtirishga yordam berishini ta'kidlaydi. Shuningdek, soft sensorlar, IoT, mashinali o'qitish va sun'iy intellektning birgalikda qo'llanishi real vaqt monitoringining imkoniyatlarini yanada kengaytirishi mumkinligi qayd etilgan. [7]

Ahmad Alshami, Eslam Ali, Moustafa Elsayed, Abdelrahman E.E. Eltoukhy va Tarek Zayedning "IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring" maqolasida suv va oqova suvlarni boshqarishda IoT texnologiyalarining rivojlanish tendensiyalari tahlil qilingan. Mualliflar suv sathi, oqim tezligi va pH kabi parametrlarni kuzatishda sensorlarning keng qo'llanayotganini, simsiz aloqa texnologiyalari esa real vaqt monitoringining texnik imkoniyatlarini kengaytirayotganini ko'rsatgan. Shu bilan birga, sensor aniqligi, energiya sarfi, aloqa ishonchliligi va sensor qamrovi kabi omillar tizim samaradorligiga ta'sir qiluvchi asosiy muammolar sifatida ajratilgan. [3]

Shunday qilib, mavjud ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, onlayn sensorlarning samaradorligini faqat bitta parametrning aniqligi orqali baholash yetarli emas. Tizim samaradorligi o'lchash chastotasi, ma'lumotlarni uzatish tezligi, sensorlarning barqarorligi, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari, erta ogohlantirish imkoniyati va monitoring natijalarini avtomatik boshqaruv bilan bog'lash darajasi orqali kompleks baholanishi lozim.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqotda oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilish samaradorligini baholash uchun qiyosiy, tizimli va indikatorli tahlil usullaridan foydalanildi. An'anaviy laboratoriya monitoringi onlayn sensor monitoringi bilan ma'lumot olish tezligi, uzluksizlik, tezkor ogohlantirish, inson omili va ekspluatatsiya samaradorligi mezonlari bo'yicha taqqoslandi. Samaradorlikni kompleks baholash uchun asosiy parametrlarning monitoringdagi funksional ahamiyati va texnologik imkoniyatlari tizimlashtirildi. Shuningdek, sensor ma'lumotlarini IoT platformasiga uzatish, ma'lumotlarni saqlash va vizual monitoring qilish jarayonlari yagona raqamli monitoring zanjiri sifatida qaraldi. Tahlil natijalarini umumlashtirish uchun integral samaradorlik ko'rsatkichi konsepsiyasidan foydalanish taklif etildi.

TAHLIL VA NATIJALAR

Oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilishda onlayn sensorlarning samaradorligini baholash uchun, avvalo, monitoring obyekting asosiy parametrlarini aniqlash zarur. Amaliy nuqtayi nazardan pH, harorat, elektr o'tkazuvchanlik, loyqalik, erigan kislorod va oqim tezligi tezkor monitoring uchun muhim parametrlar hisoblanadi. BOD va COD kabi ko'rsatkichlar esa oqova suvning organik yuklamasini tavsiflashda muhim bo'lsa-da, ularni bevosita va uzluksiz aniqlash boshqa fizik-kimyoviy parametrlarni o'lchashga nisbatan texnik jihatdan murakkabroq bo'lishi mumkin. Moretti, Ivan va Skvaril tomonidan olib borilgan tadqiqotda ham oqim, harorat va pH kabi parametrlar jarayonni boshqarishda muhim o'rin tutishi, BOD, TN va TP kabi parametrlar esa suv sifatini tavsiflashda muhim ekanligi ko'rsatilgan. [7]

1-jadval

Oqova suvlarni real vaqt rejimida monitoring qilishda asosiy sensor parametrlarining funksional ahamiyati

Parametr	Sensor turi	Monitoringdagi vazifa	asosiy	Real vaqt monitoringidagi ahamiyati
----------	-------------	-----------------------	--------	-------------------------------------

pH	Elektrokimyoviy pH sensor	Kislotalilik/ishqoriylikni aniqlash	Juda yuqori
Harorat	Termik sensor	Jarayon haroratini kuzatish	Yuqori
Elektr o'tkazuvchanlik	Konduktometrik sensor	Ionlar va umumiy mineral yuklamani baholash	Yuqori
Loyqalik	Optik sensor	Suspenziya va qattiq zarrachalarni aniqlash	Yuqori
Erigan kislorod	Optik yoki elektrokimyoviy sensor	Biologik tozalash jarayonini nazorat qilish	Juda yuqori
Oqim tezligi	Ultrasonik/elektromagnit sensor	Oqova suv hajmini aniqlash	Juda yuqori
COD	Optik/elektrokimyoviy yoki model asosidagi sensor	Organik yuklamani baholash	Juda yuqori
BOD	Biosensor/soft sensor	Biologik oksidlanish yuklamasini baholash	Yuqori

Jadvaldan ko'rinadiki, real vaqt monitoringida sensorlarni tanlashda faqat o'lchanadigan parametr emas, balki ushbu parametrning boshqaruv qarorlariga ta'siri ham hisobga olinishi kerak. Masalan, pH qiymatining keskin o'zgarishi oqova suv tarkibiga noodatiy kimyoviy komponent tushganligini bildirishi mumkin. Erigan kislorod ko'rsatkichi esa biologik tozalash jarayonining samaradorligini nazorat qilish uchun muhim bo'lib, uning me'yoriy diapazondan chiqishi biologik jarayonlarning buzilishi xavfini ko'rsatishi mumkin.

Onlayn sensorlarning asosiy ustunligi ma'lumotlarni davriy emas, balki uzluksiz yoki juda qisqa vaqt oralig'ida olish imkoniyatidir. An'anaviy tizimda namuna olish — laboratoriyaga yetkazish — tahlil qilish — natijani qayta ishlash ketma-ketligi mavjud bo'lsa, onlayn monitoringda ushbu jarayon sensor → aloqa moduli → ma'lumotlar platformasi → operator/boshqaruv tizimi ko'rinishida ishlashi mumkin. Shu sababli real vaqt tizimida aniqlangan o'zgarishga javob berish vaqti sezilarli darajada qisqaradi.

2-jadval

An'anaviy va onlayn monitoring tizimlarining qiyosiy bahosi

Samaradorlik mezonlari	An'anaviy laboratoriya monitoringi	Onlayn sensor monitoringi
------------------------	------------------------------------	---------------------------

Ma'lumot olish tezligi	Past/o'rtacha	Yuqori
Monitoring uzluksizligi	Davriy	Uzluksiz
Favqulodda o'zgarishni aniqlash	Cheklangan	Yuqori
Inson ishtiroki	Yuqori	Nisbatan past
Masofadan kuzatish	Cheklangan	Mavjud
Avtomatik ogohlantirish	Odatda alohida tizim talab qiladi	Tizimga integratsiya qilish mumkin
Katta hajmdagi ma'lumotlarni yig'ish	Cheklangan	Yuqori
Jarayonni avtomatik boshqarish	Bilvosita	Bevosita integratsiya qilish mumkin
Dastlabki investitsiya	Nisbatan past	Nisbatan yuqori
Uzoq muddatli monitoring samaradorligi	O'rtacha	Yuqori

Mazkur qiyoslash sensor monitoringining samaradorligi ayniqsa tezkor boshqaruv qarorlari talab qilinadigan holatlarda yuqori bo'lishini ko'rsatadi. Vanrolleghem va Lee sensorlarning operatorni qo'llab-quvvatlash bilan birga avtomatik boshqaruv tizimlarida ham qo'llanishi mumkinligini ta'kidlagan. [2]

Biroq onlayn sensorlarni joriy qilishning samaradorligi avtomatik ravishda yuqori natija beradi, degan xulosaga kelish noto'g'ri bo'ladi. Oqova suv muhitining o'ziga xosligi sensorlarning yuzasida bioqoplama hosil bo'lishi, mexanik ifloslanish, kimyoviy ta'sir va kalibrlashning buzilishiga olib kelishi mumkin. Ching, So va Morck aynan sensorlarning og'ir ish sharoitida ishlashi natijasida interferensiya va sensorlarning ishdan chiqishi real vaqt monitoringidagi muhim muammolardan ekanligini qayd etgan. [5]

Shu sababli monitoring tizimining texnik samaradorligini quyidagi omillar orqali baholash maqsadga muvofiq:

1. O'lchash aniqligi. Sensor tomonidan olingan qiymat laboratoriya usuli bilan olingan nazorat qiymatiga qanchalik yaqin bo'lsa, tizimning ishonchliligi shunchalik yuqori bo'ladi.

2. Ma'lumot olish chastotasi. Bir sutkada yoki bir soatda qancha kuzatuv olish mumkinligi tizimning real vaqt xususiyatini belgilaydi.

3. Sensorning barqarorligi. Uzoq vaqt davomida kalibrlashni saqlab qolish va oqova suvning agressiv muhitida ishlash qobiliyati muhim mezondir.

4. Aloqa ishonchliligi. Sensor tomonidan o'lchangan ma'lumot operatorga yoki serverga o'z vaqtida yetib bormasa, yuqori aniqlikdagi sensorning o'zi ham amaliy samaradorlikni ta'minlay olmaydi.

5. Ogohlantirish tizimi. Belgilangan chegaradan chiqish holatida tizim avtomatik xabar berishi monitoringning amaliy qiymatini oshiradi.

6. Integratsiya darajasi. Sensorlarning SCADA, IoT yoki boshqa avtomatlashtirilgan boshqaruv platformalariga integratsiyasi monitoringni oddiy kuzatuvdan boshqaruv tizimiga aylantiradi.

3-jadval

Onlayn sensor monitoringi samaradorligini kompleks baholash modeli

Mezon	Belgilangan ulush, %	Baholash shkalasi
O'lchash aniqligi	25	1–5
Monitoring uzluksizligi	20	1–5
Ma'lumot uzatish tezligi	15	1–5
Erta ogohlantirish imkoniyati	15	1–5
Sensor barqarorligi	10	1–5
IoT/SCADA integratsiyasi	10	1–5
Ekspluatatsiya samaradorligi	5	1–5
Jami	100	1–5

Mazkur model asosida integral samaradorlik ko'rsatkichi quyidagicha aniqlanishi mumkin:

$$IS = \sum (W_i \times B_i)$$

bu yerda:

IS — integral samaradorlik ko‘rsatkichi;

Wi — tegishli mezonning ulushi;

Bi — mezon bo‘yicha berilgan baho.

Ushbu yondashuvning afzalligi shundaki, sensor tizimini faqat texnik aniqlik bo‘yicha emas, balki uning umumiy monitoring tizimidagi funksional samaradorligi bo‘yicha ham baholash mumkin.

Masalan, metodik baholash sifatida barcha mezonlar bo‘yicha 4 ballik natija qayd etilgan tizimning integral samaradorligi 80 foizni tashkil etadi. 4,5 ballik o‘rtacha baho esa 90 foizlik shartli samaradorlikka mos keladi. Bu qiymatlar real obyekt natijalari emas, balki taklif etilayotgan baholash metodikasining ishlash mexanizmini ko‘rsatish uchun keltirilgan.

Onlayn sensorlarning samaradorligini oshirishda IoT texnologiyalarining ahamiyati ham alohida e‘tiborga loyiq. Alshami va hammualliflarining tadqiqotida suv va oqova suv tizimlarida oqim, suv sathi va pH sensorlarining keng qo‘llanishi, simsiz aloqa texnologiyalarining esa real vaqt monitoringidagi roli ko‘rsatilgan. Mualliflar sensor aniqligi, energiya samaradorligi, aloqa ishonchliligi va sensor qamrovi tizim samaradorligiga ta’sir qiluvchi asosiy muammolar ekanligini ta’kidlaydi. [3]

Bundan kelib chiqib, oqova suv monitoringining optimal raqamli arxitekturasini quyidagi ketma-ketlikda shakllantirish mumkin:

Sensor → Mikrokontroller/IoT gateway → Simsiz aloqa → Ma’lumotlar serveri → Analitik platforma → Ogohlantirish → Boshqaruv qarori.

Bunday tizimda sensorlar boshlang‘ich ma’lumotni shakllantiradi, IoT gateway ma’lumotlarni yig‘adi va uzatadi, server yoki bulutli platforma esa ularni saqlaydi va qayta ishlaydi. Analitik modul belgilangan chegaralar bilan haqiqiy qiymatlarni solishtirib, operatorga avtomatik xabar yuborishi mumkin.

Bundan tashqari, kelgusida fizik sensorlardan olinadigan ma’lumotlarni “soft sensor” modellariga uzatish orqali bevosita o‘lchash murakkab bo‘lgan parametrlarni

baholash imkoniyati mavjud. Ching, So va Morckning tadqiqotida soft sensorlarning matematik va mashinali o'qitish modellariga asoslangan holda oqova suv parametrlarini baholash imkoniyatlari keng yoritilgan. [5]

Shunday qilib, onlayn sensorlarning iqtisodiy va texnologik samaradorligini baholashda faqat sensor narxi bilan cheklanib qolmaslik lozim. Tizimning umumiy samarasi laboratoriya tahlillarining qisqarishi, operatorlarning vaqt sarfi kamayishi, favqulodda ifloslanishlarni erta aniqlash, tozalash jarayonlarini optimallashtirish va ekologik xavflarning oldini olish imkoniyatlari bilan birgalikda baholanishi kerak.

Moretti, Ivan va Skvaril tadqiqotlarida real vaqt monitoringiga o'tishning asosiy afzalliklaridan biri ma'lumot olishdagi vaqt kechikishini kamaytirish va ushbu ma'lumotlardan oqova suvlarni tozalash jarayonini optimallashtirishda foydalanish imkoniyati ekanligi qayd etilgan. [7] Shu bilan birga, mualliflar real vaqt o'lchovlarining ayrim turlari hozircha laboratoriya usullarini to'liq almashtira olmasligini ham ko'rsatadi. Demak, eng samarali model laboratoriya va onlayn monitoringni bir-biriga raqib emas, balki o'zaro to'ldiruvchi tizim sifatida tashkil etishdan iborat.

XULOSA

Oqova suvlarni real vaqt rejimida nazorat qilishda onlayn sensorlardan foydalanish ekologik monitoringni raqamlashtirish va boshqaruv jarayonlarining tezkorligini oshirishning istiqbolli yo'nalishlaridan biridir. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, pH, harorat, elektr o'tkazuvchanlik, loyqalik, erigan kislorod va oqim kabi parametrlarni uzluksiz kuzatish oqova suv tarkibidagi o'zgarishlarni an'anaviy davriy monitoringga nisbatan tezroq aniqlash imkonini beradi.

Onlayn sensorlarning asosiy samaradorligi ma'lumotlarni tezkor olish, monitoringning uzluksizligini ta'minlash, favqulodda holatlarni erta aniqlash va inson omilini kamaytirish bilan belgilanadi. Biroq sensorlarning texnik imkoniyatlari o'z-o'zidan yuqori samaradorlikni kafolatlamaydi. Sensorlarni muntazam kalibrlash, texnik xizmat ko'rsatish, ma'lumotlarni validatsiya qilish va aloqa tizimining barqarorligini ta'minlash zarur.

Tadqiqotda taklif etilgan integral baholash modeli onlayn sensor tizimining samaradorligini o‘lchash aniqligi, monitoring uzluksizligi, ma’lumot uzatish tezligi, erta ogohlantirish, sensor barqarorligi, IoT/SCADA integratsiyasi va ekspluatatsiya samaradorligi kabi mezonlar asosida kompleks baholash imkonini beradi. Mazkur yondashuv kelgusida muayyan oqova suv tozalash inshootlarida real monitoring ma’lumotlari asosida amaliy samaradorlikni hisoblash uchun metodik asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Eng maqbul yondashuv an’anaviy laboratoriya monitoringini to‘liq bekor qilish emas, balki laboratoriya nazoratini onlayn sensorlar bilan integratsiyalashdan iborat. Bunda sensorlar tezkor monitoring va ogohlantirish vazifasini bajaradi, laboratoriya tahlillari esa sensorlarning aniqligini tekshirish va murakkab parametrlarni tasdiqlash vositasi sifatida saqlanadi. Kelgusida IoT, soft sensor, mashinali o‘qitish va sun’iy intellekt texnologiyalarining ushbu tizimga integratsiyalashuvi oqova suv monitoringini oddiy ma’lumot yig‘ish tizimidan prognozlovchi va avtomatik boshqaruv tizimiga aylantirish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Bourgeois W., Burgess J.E., Stuetz R.M. On-line monitoring of wastewater quality: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 76, Issue 4. Wiley, Chichester, 2001. pp. 337–348.
2. Vanrolleghem P.A., Lee D.S. On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art. *Water Science and Technology*, Vol. 47, No. 2. IWA Publishing, London, 2003. pp. 1–34.
3. Alshami A., Ali E., Elsayed M., Eltoukhy A.E.E., Zayed T. IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions. *IEEE Access*, Vol. 12. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 2024. pp. 58427–58453.

4. Do M.H., Ngo H.H., Guo W., Chang S.W., Nguyen D.D., Liu Y., Varjani S., Kumar M. Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: A critical review. *The Science of the Total Environment*, Vol. 712. Elsevier, Amsterdam, 2020. Article 135612.
5. Ching P.M.L., So R.H.Y., Morck T. Advances in soft sensors for wastewater treatment plants: A systematic review. *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 44. Elsevier, Amsterdam, 2021. Article 102367.
6. Farouk M.I.H.Z., Jamil Z., Abdul Latip M.F. Towards online surface water quality monitoring technology: A review. *Environmental Research*, Vol. 238, Part 1. Elsevier, Amsterdam, 2023. Article 117147.
7. Moretti A., Ivan H.L., Skvaril J. A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible? *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 60. Elsevier, Amsterdam, 2024. Article 105061.

