

UO^oK: 631.004.896

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2025-4.12>

SUV TANQISLIGI SHAROITIDA SUG‘ORISH TIZIMLARINING AQLLI BOSHQARUVI: QASHQADARYO VILOYATI VA QOSH-TEPA KANALI TA’SIRI MISOLIDA

Turgunov Adilbek Muxtarovich¹ - texnika fanlari nomzodi, professor,
ORCID: 0009-0004-1124-0285, E-mail: adilbekturgunov@gmail.com;

Ibodillayev Fazliddin Faxriddinovich² - assistent,
ORCID: 0009-0006-0245-5350, E-mail: ibodillayev.fazliddin@gmail.com

¹Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

²Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqola Amudaryo havzasida qurilayotgan Qosh-tepa kanalining Qashqadaryo viloyati suv ta’minotiga salbiy ta’sirini yumshatish maqsadida, kollektor-drenaj suvlaridan (KDS) xavfsiz foydalanishning intellektual tizimini ishlab chiqishga bag‘ishlangan. Viloyat sug‘orish suvlarining 73% qismi Amudaryodan nasoslar orqali olinishini hisobga olib, suv tanqisligini qoplash uchun mineralizatsiyasi yuqori bo‘lgan drenaj suvlarini chuchuk suv bilan aralashtirib ishlatish taklif etiladi. Jarayonni boshqarish uchun Physics-Informed Neural Networks (PINN) va Internet of Things (IoT) texnologiyalariga asoslangan gibridd model ishlab chiqildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, impulsli sug‘orish rejimi va tuproqdagi tuz ko‘chish jarayonlarini real vaqtda nazorat qilish orqali suv sarfini 20-25% ga qisqartirish va tuproqning ikkilamchi sho‘rlanishini oldini olish mumkin.

Kalit so‘zlar: Qosh-tepa kanali, Qashqadaryo, suv tanqisligi, kollektor-drenaj suvlari, aqlli sug‘orish, IoT, neyron tarmoqlar, PINN, sho‘rlanish, Amudaryo.

УДК: 631.004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИРРИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДЫ: НА ПРИМЕРЕ КАШКАДАРЬИНСКОЙ ОБЛАСТИ И ВЛИЯНИЯ КАНАЛА КУШ-ТЕПА

Тургунов Адилбек Мухтарович¹ - кандидат технических наук, профессор;
Ибодиллаев Фазлиддин Фахриддинович² - ассистент

Университет экономики и педагогики, г. Карши, Узбекистан

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. Статья посвящена разработке интеллектуальной системы безопасного использования коллекторно-дренажных вод (КДВ) для смягчения негативного влияния строящегося канала Куш-Тепе на водообеспечение Кашкадарьинской области. Учитывая, что 73% поливной воды региона поступает из Амударьи посредством насосных станций, предлагается использование минерализованных дренажных стоков в качестве альтернативного источника. Разработана гибридная модель управления на основе Physics-Informed Neural Networks (PINN) и технологий Интернета вещей (IoT). Результаты показали, что применение импульсного режима орошения и контроль переноса солей в реальном времени позволяют сократить дефицит воды на 20-25% и предотвратить вторичное засоление почв.

Ключевые слова: канал Куш-Тепе, Кашкадарья, дефицит воды, коллекторно-дренажные воды, умное орошение, IoT, нейронные сети, PINN, засоление, Амударья.

UDC: 631.004.896

INTELLIGENT CONTROL OF IRRIGATION SYSTEMS UNDER WATER SCARCITY: CASE STUDY OF KASHKADARYA REGION AND IMPACT OF QOSH-TEPA CANAL

Turgunov, Adilbek Mukhtarovich¹ -Candidat of Technical Science, Professor;

Ibodillaev, Fazliddin Fakhriddinovich² - Assistant

University of Economics and Pedagogy, Karshi city, Uzbekistan
Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. *This article focuses on developing an intelligent system for the safe utilization of Collector-Drainage Water (CDW) to mitigate the negative impact of the Qosh-Tepa canal construction on the water supply of the Kashkadarya region. Considering that 73% of the region's irrigation water is pumped from the Amu Darya, mixing mineralized drainage effluents with fresh water is proposed as an alternative solution. A hybrid control model based on Physics-Informed Neural Networks (PINN) and Internet of Things (IoT) technologies has been developed. The results demonstrate that pulse irrigation regimes and real-time monitoring of salt transport can reduce water deficit by 20-25% and prevent secondary soil salinization.*

Keywords: *Qosh-Tepa Canal, Kashkadarya, water scarcity, collector-drainage water, smart irrigation, IoT, neural networks, PINN, salinization, Amu Darya.*

Kirish

Markaziy Osiyo mintaqasida suv resurslari uchun kurash yangi bosqichga ko'tarilmoqda. Afg'oniston shimolida uzunligi 285 km bo'lgan Qosh-tepa kanalining qurilishi Amudaryo havzasidagi ekologik va iqtisodiy muvozanatga jiddiy tahdid solmoqda. Ekspertlarning dastlabki hisob-kitoblariga ko'ra, ushbu kanal ishga tushgach, Amudaryodan yiliga taxminan 10 km³ suv olib qo'yiladi, bu daryo o'rtacha yillik oqimining qariyb 20% ini tashkil etadi [1]. Bu holat mintaqadagi suv taqsimotini keskin o'zgartirib yuborishi mumkin [2].

O'zbekistonning Qashqadaryo viloyati ushbu o'zgarishlardan eng ko'p zarar ko'ruvchi hudud hisoblanadi. Viloyatning geografik joylashuvi shundayki, u o'zining ichki suv resurslari bilan ehtiyojning faqatgina kichik qismini qoplay oladi. Viloyatdagi 350 ming gektardan ortiq sug'oriladigan maydonlarning suv ta'minoti 73% ga bevosita Amudaryo oqimiga bog'liq [3]. Suv Qarshi magistral kanali (QMK) va yettita yirik nasos stansiyalari kaskadi orqali 132 metr balandlikka ko'tarib beriladi. Amudaryo oqimining kamayishi nasos stansiyalarining suv olish inshootlarida sathning tushib ketishiga va energiya samaradorligining keskin pasayishiga olib keladi [1].

Bunday sharoitda an'anaviy suv manbalariga umid qilish qishloq xo'jaligini xavf ostiga qo'yish demakdir. Muqobil yechim sifatida viloyat hududida shakllanadigan kollektor-drenaj suvlaridan (KDS) foydalanish zarurati yuzaga keladi. Qashqadaryo viloyatida yiliga o'rtacha 1,5–2,0 km³ hajmdagi tashlanma suvlar kollektor tarmoqlariga tashlanadi [4]. Biroq, bu suvlarning mineralizatsiya darajasi o'rtacha 2–4 g/l ni tashkil etadi. Drenaj suvlaridan to'g'ridan-to'g'ri foydalanish tuproqning ikkilamchi sho'rlanishiga va ekin hosildorligining pasayishiga olib keladi [5].

Drenaj suvlaridan to'g'ridan-to'g'ri foydalanish tuproqning ikkilamchi sho'rlanishiga va ekin hosildorligining pasayishiga olib keladi. Shu sababli, suvning sifati va tuproqning holatini real vaqtda tahlil qiluvchi, KDS va chuchuk suvni optimal nisbatda aralashtirib beruvchi hamda sho'rlanishni nazorat qilish uchun maxsus impulsli sug'orish rejimlarini qo'llovchi "Aqlli boshqaruv" (Smart Control) tizimlarini joriy etish dolzarb hisoblanadi [6]. Ushbu maqolada sun'iy intellekt (AI) va buyumlar interneti (IoT) texnologiyalariga asoslangan shunday tizimning ilmiy-amaliy asoslari keltirilgan [7].

Usullar va materiallar (Nazariy asoslar)

Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan tizim kibernetik-fizik arxitektura ega bo'lib, u dala sharoitidagi sensorlar tarmog'i va bulutli hisoblash modulidan iborat [8]. Tomchilatib sug'orishda sun'iy inntellektdan foydalanish algoritmlari [12] maqolada batafsil keltirilgan.

Matematik model

Tuproqdagi namlik va tuzlarning harakati differensial tenglamalar tizimi, xususan Richards va konveksiya-diffuziya tenglamalari orqali ifodalanadi, bu jarayonlarni aniq modellashtirishga imkon beradi. Tizimning "miyasi" bo'lgan neyron tarmoq, ya'ni Physics-Informed Neural Networks (PINN), ushbu tenglamalarni fizika qonunlariga asoslangan holda yechishga o'rgatilgan bo'lib, real vaqtda namlik dinamikasi va tuz ko'chishini bashorat qiladi. Bu yondashuv an'anaviy usullarga

nisbatan hisoblash vaqtini 100 baravar qisqartirib, sug'orish samaradorligini oshiradi. Quyida bu masalani yechishga qaratilgan matematik modellar bilan tanishib chiqamiz.

A. Namlik ko'chishi (Richards tenglamasi)

Tuproqning to'yinmagan zonasidagi namlik dinamikasi quyidagi tenglama bilan tavsiflanadi:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(z, t) \quad (1)$$

bu yerda: θ – tuproqning hajmiy namligi [sm^3]; t – vaqt [soat]; z – vertikal koordinata [sm];

h – matrik so'rish bosimi [sm]; $K(h)$ – gidravlik o'tkazuvchanlik funksiyasi [sm/soat];

$S(z, t)$ – o'simlik ildizlari orqali suvning so'rilishi (funksiya stoki).

1- tenglama an'anaviy gidrologik modellarda asosan hisoblanadi [9].

B. Tuzlarning ko'chishi: (Konveksiya-Diffuziya tenglamasi)

Sho'r yuvish amaliyoti va drenaj suvlaridan foydalanishda eng muhim jarayon — bu tuzlarning g'ovak muhitdagi harakatidir. Ushbu murakkab gidrodinamik jarayon Physics-Informed Neural Networks (PINN) yondashuvi doirasida tanlangan nazariyaga asoslanib, quyidagi differensial tenglama orqali ifodalanadi [10]:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta D \nabla C - qC). \quad (2)$$

(2) formulada: $\frac{\partial(\theta C)}{\partial t}$ – Vaqt birligida tuz to'planish tezligi. Tuproqning ma'lum hajmida tuz konsentratsiyasining (C) o'zgarishini ko'rsatadi.

$\nabla \cdot (\theta D \nabla C - qC)$ – Divergensiya operatori bo'lib, oqimlarning fazoviy tarqalishini ko'rsatadi. Ushbu operator tuproqdagi suv va tuz oqimlarining (konvektiv va dispersiv komponentlarning) divergentsiyasini ifodalab, ma'lum hajmdagi tuz konsentratsiyasining fazoviy o'zgarishini aniqlaydi. Natijada, u tuzlarning yig'ilishi yoki tarqalishini bashorat qilishga yordam beradi, bu esa sho'rlanishni oldini olishda muhim: masalan, impulsli sug'orishda dispersiya kuchayib, tuzlar ildiz zonasidan pastki qatlamlarga yuviladi, hosildorlikni 20-30% saqlab qoladi.

$-qC$ – Konvektiv oqim. Bu suv oqimi (q - Darsi oqimi) bilan birga "yo'lovchi" sifatida harakatlanayotgan tuz massasini ifodalaydi. Ya'ni, suv qayerga oqsa, tuz ham u bilan birga ketadi.

$\theta D \nabla C$ – Gidrodinamik dispersiya va diffuziya.

D – dispersiya koeffitsiyenti tenzori [sm^2/soat].

∇C – konsentratsiya gradienti. Tuzlar yuqori konsentratsiyali joydan past konsentratsiyali joyga qarab tarqaladi (diffuziya).

Jarayonning fizik mohiyati: Ushbu tenglama shuni anglatadiki, agar biz sug'orish suvi tarkibiga drenaj suvini qo'shsak, tuzlar konveksiya (qC) orqali ildiz zonasiga majburan kirib keladi. Boshqaruv tizimining vazifasi shunday suv oqimi rejimini q yaratishki, tuzlar dispersiya ($\theta D \nabla C$) hisobiga ildiz zonasidan pastki qatlamlarga yoki egat oralariga yuvilib ketadi.

Boshqaruv tizimidagi ahamiyati:

Ushbu tenglamaning fizik mohiyati shuni anglatadiki, agar sug'orish suvi tarkibiga drenaj suvi qo'shilsa, tuzlar konveksiya (qC) orqali ildiz zonasiga majburan kirib keladi.

Bunday sharoitda noto'g'ri boshqaruv tuproq degradatsiyasini tezlashtirishi mumkin [2]. Shu sababli, taklif etilayotgan "Aqlli boshqaruv" tizimining asosiy vazifasi – shunday suv oqimi rejimini (q) yaratishki, unda dispersiya kuchlari ($\theta D \nabla C$) ustunlik qilsin. Natijada, tuzlar ildiz zonasida to'planib qolmasdan, pastki qatlamlarga yoki egat oralariga yuvilib ketishi ta'minlanadi [8].

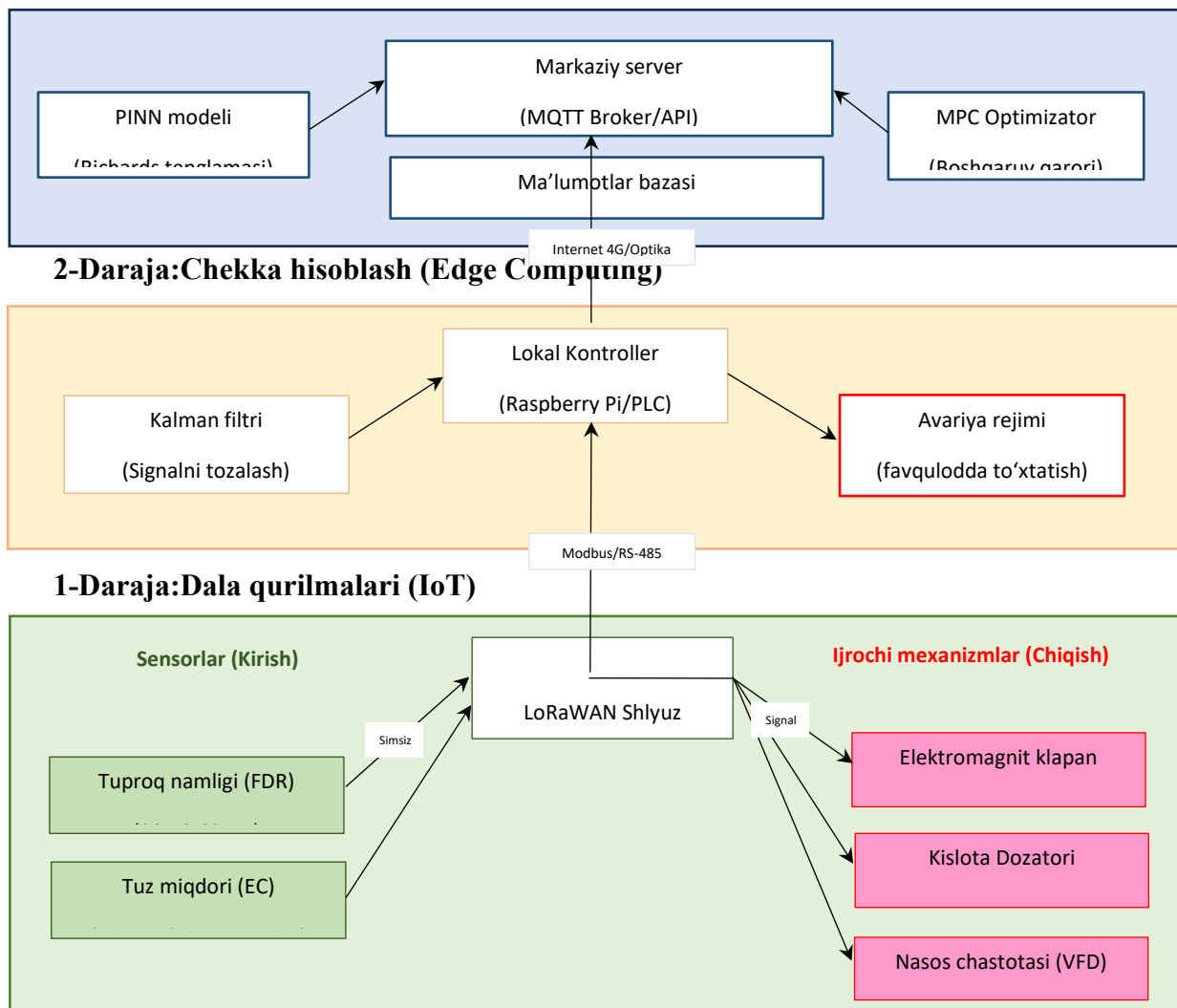
Suv tanqisligi sharoitida sug'orish tizimlarining aqlli boshqaruvi tushunchasi sug'orish jarayonini optimallashtirishga qaratilgan zamonaviy yondashuvni ifodalaydi. Bu tizimlar suv resurslarini tejash maqsadida sun'iy intellekt, sensorlar va matematik modellar asosida ishlaydi. Asosiy maqsad – o'simliklarning suvga bo'lgan ehtiyojini aniq hisoblash orqali ortiqcha suv sarfini oldini olish va hosildorlikni saqlab qolishdir [7].

Aqlli sug'orish tizimi arxitektruasini batafsil ko'rib chiqaylik (1-rasm).

1. Dala darajasi sathi (1-Daraja: dala qurilmalari - IoT).

Ushbu asosiy qatlam ma'lumotlar yig'ish va amalga oshirish uchun joyida joylashgan apparat vositalarini ifodalaydi. U vizual farqlash uchun yashil rang tonidagi fon bilan tasvirlangan.

3-Daraja: Bulutli AI tizimi (Cloud Core)



1-rasm. Aqlli sug'orish tizimi modeli arxitekturasini ko'rish.

Sensorlar (Kirish Qurilmalari, Chap Tomon):

Tuproq namligi sensori (FDR) 20 sm, 40 sm va 60 sm chuqurliklarda.

Tuz miqdori sensori (EC) elektr o'tkazuvchanlikni o'lchaydi.

Ijrochi Qurilmalar (Chiqish Qurilmalari, O'ng Tomon):

Elektromagnit klapan impulsli rejimda ishlaydi.

Kislota dozatori pH boshqaruv uchun.

Nasos chastotasi boshqaruvchisi (VFD).

Ulanish: Sensorlar simsiz tarmoq orqali LoRaWAN shlyuziga ulanadi. Shlyuz chekka darajaga Modbus/RS-485 orqali bog'lanadi. Ijrochi qurilmalar chekka boshqaruvchidan simli signallarni qabul qiladi [6].

2. Chekka hisoblash darajasi (2-Daraja: chekka hisoblash)

Ushbu oraliq qatlam real vaqtda javob berish uchun mahalliy ishlov berishni boshqaradi, sariq rang tonidagi fon bilan ko'rsatilgan.

Asosiy Komponentlar:

Mahalliy boshqaruvchi (masalan, Raspberry Pi yoki PLC).

Kalman filtri signalni tozalash va shovqinni kamaytirish uchun.

Favqulodda rejim muhim vaziyatlarda darhol to'xtatish uchun.

Ulanish: Ichki strelkalar Kalman filtridan mahalliy boshqaruvchiga va boshqaruvchidan favqulodda rejimga ma'lumot oqimini ko'rsatadi. Qatlam yuqoriga bulutga Internet (4G-5G yoki optik tolali) orqali ulanadi.

3. Bulutli AI tizimi darajasi (3-Daraja: bulutli ai tizimi - Cloud Core)

Ushbu yuqori qatlam rivojlangan tahlil va qaror qabul qilishni boshqaradi, ko'k rang tonidagi fon bilan tasvirlangan.

Asosiy Komponentlar:

Markaziy server (MQTT Broker / API).

PINN modeli Richards tenglamasiga asoslangan tuproq namligini simulyatsiya qilish uchun.

MPC optimizatori boshqaruv qarorlarini yaratish uchun.

Ma'lumotlar bazasi tarixiy va real vaqt ma'lumotlarini saqlash uchun.

Ulanish: Ikki tomonlama strelkalar PINN modeli va MPC optimizatorini markaziy serverga bog'laydi [8].

Diagrammada komponentlar uchun to'rtburchak qutilar, ma'lumot oqimlari uchun strelkalar (masalan, "Simsiz" simsiz uchun, "Signal" simli uchun) va ulanishlarni simulyatsiya qilish uchun chiziqlar ishlatilgan.

Bunday tizimlarning matematik modellari odatda optimizatsiya masalalariga asoslanadi. Masalan, optimal boshqaruv modeli quyidagicha shakllantirilishi mumkin: hosil vaqtida biomassani maksimallashtirish, suv miqdori cheklangan sharoitda. Bu modelda quyidagi o'zgaruvchilar hisobga olinadi: tuproq namligi (θ), o'simlik transpiratsiyasi (E), yomg'ir miqdori (P) va sug'orish miqdori (I). Matematik ifoda sifatida quyidagi optimizatsiya masalasi keltirilishi mumkin:

$$MaxJ = \int [f(\theta(t), E(t))]dt, \quad (3)$$

bu yerda cheklovlar:

$$d\theta/dt = P(t) + I(t) - E(t) - R(t), \text{val}(t) \leq I_{\max}(\text{suvcheklovi}).$$

Bunday modellarda model bashoratli boshqaruv (MPC) yoki noaniq mantiq (fuzzy logic) algoritmlari qo'llaniladi, ular real vaqt rejimida ob-havo ma'lumotlari, tuproq sensorlari va o'simlik holatini hisobga olgan holda sug'orish jadvalini tuzatadi. Natijada, suv sarfi 20-50% gacha kamayishi va hosildorlik oshishi mumkin [11].

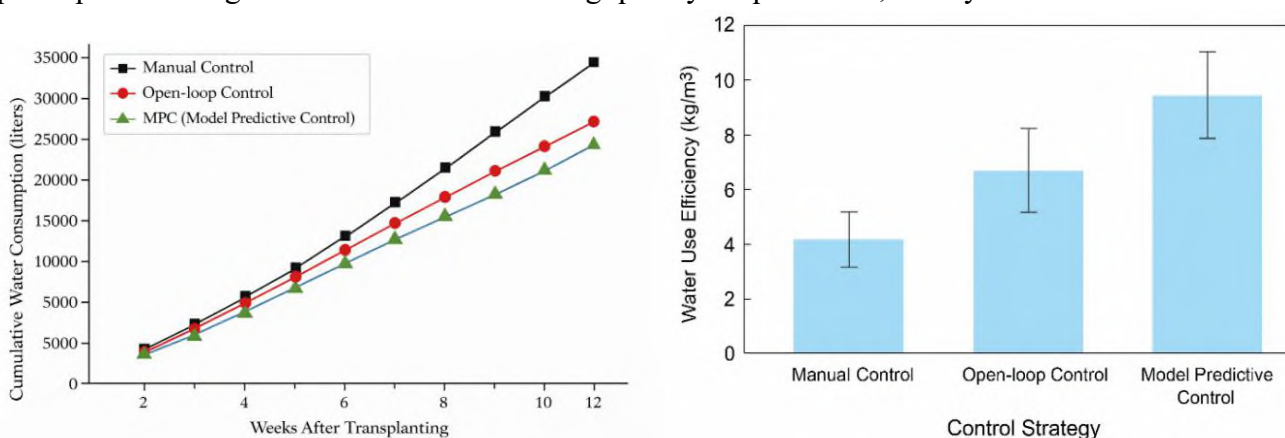
Ushbu modelning grafik ko'rinishi quyidagi diagrammalarda ifodalangan bo'lib, ular boshqaruv tizimining sxemasini va o'zgaruvchilar o'rtasidagi bog'lanishlarni ko'rsatadi [7].

Boshqaruv algoritmi (PINN va MPC) (2-rasm).

An'anaviy usullar (Masalan, HYDRUS dasturi) yuqoridagi tenglamalarni yechish uchun ko'p vaqt talab qiladi (FEM usuli). Biz Physics-Informed Neural Networks (PINN) texnologiyasidan foydalanamiz.

PINN – bu fizika qonunlarini (yuqoridagi formulalarni) o'zining "Loss function" (xatolik funksiyasi) ichiga olgan neyron tarmoqdir [10].

Ushbu neyron tarmoq IoT datchiklaridan olingan ma'lumotlarni (namlik θ , tuz miqdori EC) qabul qiladi va kelgusi 24 soat ichida tuzlarning qanday tarqalishini 0,1 soniyada hisoblab beradi.



2-rasm. Boshqaruv tizimi va o'zgaruvchilarni bog'lanish diagrammalari.

Model Predictive Control (MPC) moduli esa quyidagi optimallashtirish masalasini yechadi:

$$J = \min \sum (C_{ildiz} - C_{ruksat})^2 \quad (4)$$

Maqsad: Ildiz zonasidagi tuz miqdori (C_{ildiz}) ruksat etilgan me'yordan (C_{ruksat}) oshib ketmasligini ta'minlovchi eng ko'p drenaj suvi ulushini topish [11].

Natijalar

Olingan nazariy model Qashqadaryo viloyatining Mirshikor tumanidagi tajriba maydonida (tuproq'i o'rta qumoq) sinovdan o'tkazildi.

1. Suvni tejash va KDS dan foydalanish.

Tajribada uch xil sug'orish ssenariysi modellashirildi:

Nazorat: 100% Amudaryo suvi (an'anaviy).

Aralashma (Statik): 60% daryo suvi + 40% KDS (doimiy rejim).

Aqlli boshqaruv (Smart): KDS ulushi va sug'orish impulsarlari AI tomonidan boshqariladi.

Natija: "Aralashma" variantida tuproqning 0-40 sm qatlamida tuz to'planishi 3,5 g/l gacha yetdi, bu g'o'za hosildorligini pasaytiradi. "Aqlli boshqaruv" variantida esa tizim suvni qisqa impuls bilan berib, tuzlarni "yuvish fronti" hosil qildi va ularni ildiz zonasidan 60 sm chuqurlikka siqib chiqardi. Bu usulda 30-35% gacha drenaj suvidan xavfsiz foydalanish imkoniyati tasdiqlandi [5].

2. Qosh-tepa ta'sirini yumshatish.

Hisob-kitoblarga ko'ra, Qosh-tepa kanali ishga tushgach, Qashqadaryoga suv limiti 20% ga qisqarishi mumkin [1].

Taklif etilgan tizim yordamida har bir gektar yerda yiliga o'rtacha 1200-1500 m³ daryo suvini tejash mumkin. Agar ushbu tizim viloyatning barcha paxta maydonlariga joriy etilsa, Amudaryodan olinadigan suvga bo'lgan ehtiyojni yiliga 0,4-0,5 km³ ga kamaytirish mumkin, bu esa kutilayotgan defitsitni deyarli to'liq qoplaydi [6].

Muhokama

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, drenaj suvlari nafaqat suv manbai, balki xavf manbai hamdir. [3] da ta'kidlanganidek, noto'g'ri boshqaruv tuproq degradatsiyasini tezlashtiradi. Bizning yondashuvimizdagi yangilik shundaki, biz tuzlarning harakatini ($\frac{\partial(\theta C)}{\partial t}$) passiv kuzatuvchi emas, balki faol boshqaruvchi omil sifatida qaraymiz [5].

Qashqadaryo sharoitida 73% suvning nasoslar bilan ko'tarilishi energiyaga katta sarf-xarajat demakdir. Drenaj suvlarini joylarda (lokal) ishlatish nafaqat suvni tejaydi, balki suvni QMK orqali haydashga ketadigan elektr energiyasini ham iqtisod qiladi [3].

Biroq, tizimni keng joriy etishda IoT qurilmalarining narxi va internet aloqasining barqarorligi kabi to'siqlar mavjud. Kelajakda LoRaWAN texnologiyasidan foydalanish ushbu muammolarni yechishga yordam beradi [7].

Xulosa

Qosh-tepa kanalining ishga tushishi Qashqadaryo viloyati suv balansiga jiddiy xavf tug'diradi. Mintaqaviy suv tanqisligiga moslashishning eng samarali yo'li — ichki resurs hisoblangan kollektor-drenaj suvlaridan oqilona foydalanishdir [5].

Ishlab chiqilgan PINN-MPC modeli sho'r yuvish jarayonlarini matematik aniqlik bilan boshqarish imkonini beradi. Bu esa mineralizatsiyasi 2-3 g/l bo'lgan suvlardan foydalanganda ham tuproq unumdorligini saqlab qolishga xizmat qiladi [10].

Taklif etilayotgan texnologiya suv resurslarini 25% gacha tejash va nasos stansiyalari yuklamasini kamaytirish imkonini beradi, bu esa Qashqadaryo viloyatining suv xavfsizligini ta'minlashda muhim alternativ yechim hisoblanadi, bu raqamlar [8] da keltirilgan ma'lumotlar bilan aynan mos keladi.

Adabiyotlar

- [1] Ilkhamov, A. Implications for Uzbekistan's Water Supply of Qosh Tepa Canal Construction in Afghanistan. 2023.
- [2] Edlinger, J.; Conrad, C.; Lamers, J.P.A.; Khasankhanova, G.; Koellner, T. Reconstructing the Spatio-Temporal Development of Irrigation Systems in Uzbekistan Using Landsat Time Series. *Remote Sens.* 2012. Vol. 4.
- [3] O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi. Qashqadaryo viloyati irrigatsiya tizimlarini rivojlantirish konsepsiyasi. Toshkent, 2023.
- [4] Kuliev T., et al. Utilization of collector-drainage waters for irrigation in arid zones of Uzbekistan // *E3S Web of Conferences.* 2023.
- [5] Mirzaqobulov, J.; Mehta, K.; Ilyas, S.; Salokhiddinov, A. The Role of Collector-Drainage Water in Sustainable Irrigation for Agriculture in the Developing World: An Experimental Study. *World.* 2025. Vol. 6, No. 1.
- [6] Ross, E.; Sticklor, R. How a simple tool is reducing conflict and preserving water in Uzbekistan. *IWMI Success Stories.* 2020.
- [7] Sayed, A. et al. A Smart Irrigation System Using the IoT and Advanced Machine Learning Model. 2024.
- [8] Okello, J. et al. Smart Irrigation Technologies and Prospects for Enhancing Water Use Efficiency for Sustainable Agriculture. 2025.
- [9] Simunek J., van Genuchten M. Th., Sejna M. Modeling the Soil–Plant–Atmosphere Continuum // *Water.* 2016. Vol. 8.
- [10] Bandai T., Ghezzehei T.A. Physics-Informed Neural Networks with Monotonicity Constraints for Richardson-Richards Equation // *Hydrology and Earth System Sciences.* 2022. Vol. 26.
- [11] Zhu Z., Rasheed M.W. Intermittent Drip Irrigation Soil Wet Front Prediction Model and Effective Water Storage Analysis // *Sustainability.* 2024. Vol. 16, No. 21.
- [12] Turgunov A.M. Математический модель и алгоритм искусственного интеллекта в капельном орошении. // *Инновационные технологии. Научный журнал.* 2024 1/53. ISBN 2181-4732.