
**FIZIKAGA ASOSLANGAN SUN'IY INTELLEKT VA MATEMATIK
MODELLASHTIRISH USULLARI YORDAMIDA YER OSTI VA YER USTI
SUVLARINING O'ZARO TA'SIRI HAMDA IFLOSLANISH
JARAYONLARINI RAQAMLI MODELLASHTIRISH VA XAVFSIZLIK
JIHATIDAN BAHOLASH**

Nasridinov Rustamjon Baxtiyorjon o'g'li

ORCID:0009-0003-2422-9029

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
o'qituvchisi.

Elektron pochta: rustamjon1400@gmail.com

ANNOTATSIYA

Mazkur tadqiqotda fizik qonuniyatlarga asoslangan sun'iy intellekt va matematik modellashtirish usullari yordamida yer osti va yer usti suvlarining o'zaro ta'siri hamda ifloslanish jarayonlari raqamli shaklda modellashtirildi. Integratsiyalashgan yondashuv sifatida MODFLOW–MT3DMS fizik modeli va Physics-Informed Neural Network (PINN) sun'iy intellekt modeli qo'llanildi. Tadqiqot obyekti sifatida Zarafshon vodiysi pasttekisligi tanlanib, suv sathi, oqim tezligi, nitrat ifloslanishi va biologik parchalanish jarayonlari tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, sun'iy intellektga asoslangan surrogat model fizik modelga nisbatan 12–20 barobar tezroq ishlaydi, aniqlik esa 95 % darajada saqlanadi. Sug'orish intensivligi va harorat o'zgarishi ifloslanish tarqalish dinamikasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi, natijada infiltratsiya va diffuziya jarayonlari jadallashadi. Gibril (AI+Physics) yondashuv orqali ekologik xavfsizlik bahosi, kontaminatsiya zonalari va suv resurslarini real vaqt rejimida boshqarish imkoniyati yaratildi. Tadqiqot natijalari suv resurslarini boshqarish, ekologik xavfsizlik monitoringi va raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyalarini joriy etish uchun amaliy va ilmiy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar : sun'iy intellekt, fizik modellashtirish, yer osti suvlari, yer usti suvlari, ifloslanish, adveksiya-diffuziya, surrogat model, PINN, raqamli egizak, ekologik xavfsizlik.

ABSTRACT

In this study, the interaction between surface water and groundwater, as well as the processes of contamination, were digitally modeled using physics-based artificial intelligence and mathematical modeling methods. An integrated approach combining the MODFLOW–MT3DMS physical model and the Physics-Informed Neural Network (PINN) artificial intelligence model was employed. The Zarafshan

Valley lowland was selected as the study area, focusing on the analysis of water table levels, flow velocity, nitrate pollution, and biological degradation processes. The results demonstrated that the **AI-based surrogate model** operates **12–20 times faster** than the traditional physical model while maintaining an accuracy level of **approximately 95%**. Variations in irrigation intensity and temperature significantly affected the dynamics of pollutant dispersion, accelerating infiltration and diffusion processes. Through the **hybrid AI+Physics approach**, it became possible to assess ecological safety, identify contamination zones, and manage water resources in **real-time mode**. The findings of this research hold both **scientific and practical significance** for water resource management, environmental safety monitoring, and the implementation of **Digital Twin technologies** in hydrological systems.

Keywords: artificial intelligence, physical modeling, groundwater, surface water, contamination, advection–diffusion, surrogate model, PINN, digital twin, environmental safety.

KIRISH (INTRODUCTION)

Suv resurslari insoniyat taraqqiyotining eng muhim omillaridan biri bo‘lib, uning sifatini saqlash va miqdorini boshqarish XXI asrning eng dolzarb ekologik va iqtisodiy muammolaridan biri hisoblanadi. Birlashgan Millatlar Tashkilotining 2024-yilgi “World Water Development Report” ma’lumotlariga ko‘ra, sayyoramizdagi umumiy chuchuk suv zaxiralari hajmining atigi 2,5 % foydalanishga yaroqli bo‘lib, uning 70 % i muzliklarda, 30 % i esa yer osti suvlarida saqlanadi (UNESCO, 2024). Shu bois, yer osti va yer usti suvlarining o‘zaro ta’siri, ularning ifloslanish jarayonlari va gidrodinamik barqarorligi masalalari ekologik xavfsizlik va barqaror rivojlanish strategiyalarida muhim o‘rin egallaydi. Bugungi kunda aholi sonining ortishi (2025-yilda 8,1 milliard), sanoat va qishloq xo‘jaligi faoliyatining kengayishi, hamda iqlim o‘zgarishi natijasida suv ekotizimlariga antropogen bosim kuchayib bormoqda. FAO (Food and Agriculture Organization) ma’lumotlariga ko‘ra, jahon miqyosida har yili 80 % dan ortiq oqava suvlar tozalanmasdan tabiiy muhitga tashlanadi, bu esa yer osti va yer usti suvlarining o‘zaro ifloslanish jarayonlarini kuchaytiradi (FAO, 2023). O‘zbekiston misolida, sug‘oriladigan yerlarning 60 % dan ortig‘ida yer osti suvlarining sathi 2–3 m gacha ko‘tarilgan bo‘lib, bu sho‘rlanish, pestitsid va nitratlarning tarqalish xavfini kuchaytiradi (Davlat Geologiya Qo‘mitasi, 2024). Yer osti va yer usti suvlarining o‘zaro ta’siri fizik jihatdan murakkab tizim bo‘lib, u infiltratsiya, transpirasiyadan qaytuvchi oqim, hiporeik zonalar almashuvi, hamda adveksiya-diffuziya jarayonlari bilan belgilanadi. Ushbu jarayonlarni to‘g‘ri modellashtirish uchun fizik qonuniyatlarga asoslangan differensial tenglamalar bilan bir qatorda, sun‘iy intellekt (SI) va mashina o‘rganish (Machine Learning)

metodlarini uyg'un qo'llash zarur bo'lmoqda. An'anaviy gidrologik modellar (masalan, MODFLOW, GSFLOW, HydroGeoSphere) yuqori aniqlikka ega bo'lsada, ularning hisoblash murakkabligi va parametr noaniqliklari ularni real vaqt (real-time) prognozlashda chegaralaydi. Shu nuqtada fizika asosli sun'iy intellekt modellarining (Physics-Informed AI, PIML) afzalliklari yaqqol ko'zga tashlanadi — ular fizik qonunlarni buzmaganda, hisoblash jarayonini tezlashtiradi va murakkab nelinear bog'liqliklarni aniqlay oladi.

So'nggi yillarda xalqaro miqyosda bu yo'nalishda sezilarli natijalarga erishilmoqda. Masalan, Zhang et al. (2022) "*Modeling groundwater and surface water interaction*" (ScienceDirect) ishida ko'p qatlamli infiltratsiya modellarini ishlab chiqib, sath-ost suv almashuvini 15 % aniqlik bilan yaxshilagan. Li va boshq. (2023) "*Artificial Intelligence Modeling for Groundwater Environments*" (ACS Publications) ishida esa konvolyutsion neyron tarmoqlar yordamida yer osti ifloslanish manbalarini 92 % aniqlik bilan prognoz qilgan. Shuningdek, Rahman et al. (2024) (ScienceDirect) mashina o'rganish algoritmlari yordamida monitoring tarmoqlaridan keluvchi ma'lumotlar asosida yer osti suv sathi o'zgarishlarini erta ogohlantirish tizimiga integratsiya qilgan. Ushbu tadqiqotlar fizika asosli SI modellarining gidrogeologik jarayonlarni bashorat qilishda samarali ekanini tasdiqlaydi. Shu nuqtai nazardan, ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — fizik qonuniyatlar asosidagi differensial modellar va sun'iy intellekt texnologiyalarini integratsiya qilgan raqamli modellashtirish tizimini ishlab chiqishdir. U orqali yer osti va yer usti suvlarining o'zaro ta'siri, ifloslanish oqimlari va xavf zonalarini aniqlanib, ekologik xavfsizlik darajasi baholanadi.

Tadqiqot quyidagi vazifalarni o'z ichiga oladi:

1. Yer osti va yer usti suvlarining o'zaro ta'sir mexanizmini fizik asosda tahlil qilish.
2. Adveksiya-diffuziya-reaksiya tenglamalari asosida matematik modelni shakllantirish.
3. Fizika-informed sun'iy intellekt (PINN, FNO, CNN-LSTM) yondashuvlarini qo'llagan holda raqamli modellashtirish algoritmini ishlab chiqish.
4. Model natijalari asosida xavfli zonalarini aniqlash va ekologik xavfsizlikni baholash.

Maqola sakkizta asosiy qismdan iborat: kirishda muammo va maqsad asoslanadi; ikkinchi bobda nazariy va fizik modelning matematik asosi yoritiladi; uchinchi qismda sun'iy intellekt va hibrid modellashtirish metodlari tahlil qilinadi; to'rtinchi bo'limda modellashtirish algoritmi va dasturiy yechim tavsiflanadi; beshinchi qismda amaliy natijalar (case study) keltiriladi; oltinchi qismda xavfsizlik bahosi va tahlil

natijalari; yettinchi qismda xulosa va ilmiy yangiliklar, sakkizinchi bo‘limda esa foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati beriladi.

Nazariy asoslar va fizika-matematik model (Theory & Physical-Mathematical Model)

Fizik jarayonlar va o‘zaro ta’sirlar

Yer osti va yer usti suvlarining o‘zaro ta’siri murakkab ko‘pkomponentli gidrofizik tizimni tashkil etadi. Ushbu tizimda infiltratsiya, perkolatsiya, bug‘lanish, transpirasiyadan qaytuvchi oqim, hiporeik zonalar va bank storage kabi jarayonlar bir vaqtning o‘zida kechadi va ularning har biri suv muvozanatining umumiy strukturaviy barqarorligiga ta’sir ko‘rsatadi. Ma va boshq. (2023) “*Groundwater–Surface Water Interactions Across Scales*” (Annual Review of Environment and Resources, vol. 48) maqolasida ushbu jarayonlarning vertikal (infiltratsion) va gorizontal (oqimlararo) almashuv turlari massaviy va energetik almashinuv qonunlari orqali ifodalanishini ko‘rsatgan.

Infiltratsiya va yer osti almashuvi mexanizmi

Infiltratsiya — bu yomg‘ir, sug‘orish yoki suv sathi ortishidan keyin suvning tuproq g‘ovaklari orqali yer ostiga o‘tish jarayoni. U **Darcy qonuni** asosida ifodalanadi:

$$q = -K(\theta) * dH/dz$$

Bu yerda:

q — filtratsiya oqimi (m/s),

$K(\theta)$ — tuproqning gidravlik o‘tkazuvchanligi (namlikka bog‘liq),

$H = h + z$ — umumiy gidravlik bosim,

h — bosim balandligi,

z — geometrik balandlik.

Agar tuproq to‘liq qoniqmagan bo‘lsa, jarayon **Richards tenglamasi** bilan tavsiflanadi:

$$C(\psi) * \partial\psi/\partial t = \partial/\partial z [K(\psi) * (\partial\psi/\partial z + 1)]$$

Bu yerda:

ψ — matriks potensial,

$C(\psi)$ — namlik sig‘imi funksiyasi.

Ushbu tenglama yer usti suvining infiltratsiya jarayonini, suv sathining o‘zgarishi va tuproq g‘ovaklaridagi suv harakatini fizik asosda bog‘laydi.

Hiporeik zona va o‘zaro almashinuv

Hiporeik zona — daryo oqimi bilan yer osti suv tizimi o‘rtasidagi faol almashinuv qatlamidir. Bu hududda **konveksiya, adveksiya va diffuziya** jarayonlari birgalikda

kechadi. Tadqiqotlar (Cardenas, 2021; *Water Resources Research*) ko'rsatishicha, hiporeik zona suv sifati va ifloslanish diffuziyasida asosiy rol o'ynaydi.

Oqim tezligi va zarralarning g'ovakli tuzilma orqali harakati **Péclet soni** bilan tavsiflanadi:

$$Pe = (v * L) / D$$

Bu yerda:

v — o'rtacha oqim tezligi,

L — xarakterli uzunlik,

D — diffuziya koeffitsienti.

Agar $Pe > 1$ bo'lsa, jarayon **adveksion**,

agar $Pe < 1$ bo'lsa, jarayon **diffuzion** tabiati ustun bo'ladi.

Adveksiya va diffuziya jarayonlari

Yer osti suvlarida moddalar transporti (ya'ni ifloslovchi moddalarning harakati)

adveksiya–diffuziya tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\partial C / \partial t + v * \partial C / \partial x = D * \partial^2 C / \partial x^2 - R(C)$$

Bu yerda:

C(x,t) — kontaminant konsentratsiyasi,

v — oqim tezligi,

D — molekulyar diffuziya va mexanik dispersiya koeffitsienti,

R(C) — reaksiya yoki parchalanish atamasi.

Adveksiya — moddalarning suv oqimi bilan bir yo'nalishda ko'chishi, diffuziya esa molekulalar orasidagi tasodifiy harakat natijasida tarqalishidir.

Tadqiqotlarga ko'ra (Zhou et al., 2022, *Journal of Hydrology*), yer osti suvlarida ifloslovchi zarralarning 65–80 % qismi adveksiya jarayoni orqali, 20–35 % qismi esa diffuziya va dispersiya orqali tarqaladi.

Kimyoviy reaksiyalar va ifloslanish mexanizmi

Ifloslovchi moddalar (masalan, nitrat, pestitsid, fenol, og'ir metall ionlari) suv muhitida adsorbsiya, desorbsiya, ion almashinuvi, biokimyoviy parchalanish, oksidlanish-qaytarilish kabi reaksiyalar orqali harakatlanadi. Bu jarayonlarning umumiy modeli:

$$R(C) = k_1 * C - k_2 * C^2 - k_3 * B$$

Bu yerda k_1, k_2, k_3 — kinetik koeffitsientlar, BBB — biotik komponent (mikroorganizmlar konsentratsiyasi). Zhang et al. (2021) (MDPI *Water*) tadqiqotiga ko'ra, mikrobiologik faol zonalarda nitratlarning 40 % gacha kamayishi denitrifikatsiya orqali sodir bo'ladi. Shu sababli biologik degradatsiya — tabiiy tozalash mexanizmining ajralmas qismidir.

Sug'orish, drenaj va antropogen ta'sirlar

O‘zbekiston sharoitida sug‘orish tizimlari suv-tuproq almashinuvinining asosiy omili hisoblanadi. Davlat Suv Qo‘mitasi (2024) hisobotiga ko‘ra, Farg‘ona vodiysi va Zarafshon havzasida sug‘orish tufayli yer osti suv sathi o‘rtacha 1,5–2,2 m gacha ko‘tarilgan, bu esa sho‘rlanish va kontaminatsiya jarayonlarini tezlashtirgan. Drenaj tizimlari yetarlicha samarali ishlamaganda, ifloslovchi moddalar, ayniqsa ammiak, fosfat, nitrat va og‘ir metallar (Pb, Cd, Cu), tuproq-suv tizimida konsentratsiyasini oshirib, ekologik xavf tug‘diradi.

Biologik degradatsiya jarayoni

Organik ifloslovchilar (masalan, pestitsidlar, neft mahsulotlari, PAH moddalari) **biologik degradatsiya** orqali parchalanadi. Ushbu jarayonning tezligi **Arrenius tenglamasi** bilan aniqlanadi:

$$k = A * e^{(-E_a / (R * T))}$$

Bu yerda:

k — reaksiya tezligi,

A — preeksponensial faktor,

E_a — aktivatsiya energiyasi,

R — gaz doimiysi,

T — mutlaq harorat (Kelvin).

Tajribalarda (Singh et al., 2023, *Environmental Science & Pollution Research*) 25 °C dan 35 °C gacha haroratda denitrifikatsiya tezligi 1,8 barobar ortgan aniqlangan, bu esa harorat va mikroflora faolligi o‘rtasida to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatadi.

Yuqorida keltirilgan barcha jarayonlar — infiltratsiya, adveksiya, diffuziya, kimyoviy va biologik reaksiyalar — o‘zaro uzviy bog‘liq bo‘lib, ularni izolyatsiyada tahlil qilish natijalarni buzadi. Shu sababli zamonaviy yondashuvlarda integratsiyalashgan fizika-matematik modellar (masalan, MODFLOW-MT3DMS, HydroGeoSphere, GSFLOW) qo‘llaniladi. Ammo bu modellar katta hisoblash resurslarini talab qiladi. Shu nuqtada sun‘iy intellektga asoslangan surrogat modellar (Physics-Informed Neural Networks — PINN, Fourier Neural Operator — FNO) bu murakkab jarayonlarni tez va aniqlik bilan modellashtirish imkonini beradi (Karniadakis et al., 2021, *Nature Machine Intelligence*).

Matematik model: differensial tenglamalar

Yer osti va yer usti suvlarining harakati, ifloslanish jarayonlari va ularning o‘zaro ta‘sirini ifodalovchi model

Yer osti va yer usti suvlarining harakati, ularning ifloslanish jarayonlari hamda o‘zaro ta‘sirini tasvirlash uchun model fizik qonuniyatlarga — massa va energiya saqlanishiga asoslanadi.

Gidrologik jarayonlar odatda qoniqmagan zona (vadose zone) va qoniqqan zona (saturated zone) uchun alohida matematik ifoda etiladi.

Suv harakati modeli

a) Qoniqmagan zona (vadose zone)

Suvning vertikal infiltratsiyasi Richards tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(\psi) (\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1)]$$

Bu yerda:

ψ — matriks potensial,

$C(\psi) = d\theta/d\psi$ — namlik sig'imi,

$K(\psi)$ — gidravlik o'tkazuvchanlik,

θ — hajmiy namlik.

Ushbu tenglama tuproqning suv bilan to'yinmagan sharoitida suv oqimini vaqt va chuqurlik bo'yicha ifodalaydi.

b) Qoniqqan zona (groundwater flow)

Yer osti suvlarining gorizontal harakati Darcy qonuni asosida tavsiflanadi:

$$q = - K * \nabla h$$

Bu yerda:

q — oqim zichligi vektori,

K — gidravlik o'tkazuvchanlik tenzori,

h — piezometrik bosim.

Massa saqlanish tenglamasini hisobga olib, umumiy yer osti suv oqimi tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + W$$

Bu yerda:

S_s — suv sig'imi,

W — manba (yomg'ir, sug'orish) yoki yo'qotish (bug'lanish, drenaj) manbalari.

Kimyoviy transport modeli

Ifloslovchi moddalarning suv oqimida tarqalishi adveksiya–diffuziya–reaktsiya (ADR) tenglamasi bilan tavsiflanadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C) - R(C)$$

Bu yerda:

C — kontaminant konsentratsiyasi (kg/m^3),

v — oqim tezligi ($v = q/\theta$),

D — dispersiya yoki diffuziya tenzori,

$R(C)$ — kimyoviy yoki biologik reaksiyalar funksiyasi.

Agar modda parchalanadigan bo'lsa (masalan, nitrat yoki pestitsidlar), reaksiya had birinchi tartibli ko'rinishda yoziladi:

$$R(C) = \lambda \ C$$

Bu yerda:

λ — parchalanish tezligi koeffitsienti (s^{-1}).

Dastlabki va chegaraviy shartlar

Dastlabki shartlar:

$$h(x,0) = h_0(x)$$

$$C(x,0) = C_0(x)$$

Chegaraviy shartlar:

— *Yuqori chegarada (sirt):*

$$qz = P - E$$

(bu yerda P — yog‘in miqdori, E — bug‘lanish; ularning farqi suvning sirt orqali kirish yoki chiqish miqdorini bildiradi.)

— *Pastki chegarada:*

$$\partial h / \partial z = 0 \quad (\text{no-oqim sharti})$$

yoki

$$h = h_b \quad (\text{doimiy bosim sharti})$$

— *Yon chegaralarda:*

$$C = C_{in} \quad (\text{ifloslovchi kirish sharti})$$

yoki

$$\partial C / \partial n = 0 \quad (\text{Neyman sharti — modda oqimi yo‘qligi})$$

Dastlabki shart:

$$h(x,0) = h_0(x)$$

$$C(x,0) = C_0(x)$$

Chegaraviy shartlar:

— *Yuqori chegarada (sirt):*

$$qz = P - E$$

(bu yerda P — yog‘in, E — bug‘lanish; ularning farqi suvning sirt orqali kirish/chiqish miqdorini bildiradi)

— *Pastki chegarada:*

$$\partial h / \partial z = 0 \quad (\text{no-oqim sharti})$$

yoki

$$h = h_b \quad (\text{doimiy bosim sharti})$$

— *Yon chegaralarda:*

$$C = C_{in} \quad (\text{ifloslovchi kirish sharti})$$

yoki

$$\partial C / \partial n = 0 \quad (\text{Neyman sharti — modda oqimi yo‘qligi})$$

Murakkablik sababli model analitik tarzda yechib bo'lmaydi, shu bois sonli (numerik) yechim usullari qo'llaniladi:

- Finite Difference Method (FDM) — panjara (grid) asosida vaqt va fazoda diskretlash.
- Finite Element Method (FEM) — notekis geometriyalarda aniqroq yechim beradi.
- Finite Volume Method (FVM) — massa saqlanishni to'liq ta'minlaydi (ko'p hollarda MT3DMS va GSFLOW modellari uchun ishlatiladi).

Ushbu usullar yordamida gibrid (coupled) tizim yaratiladi, ya'ni suv harakati tenglamasi bilan ifloslanish tenglamasi birgalikda yechiladi.

An'anaviy fizik modellar (masalan, MODFLOW, HydroGeoSphere, GSFLOW) suv harakati va kontaminant transportini yuqori aniqlikda ifodalasa-da, ular ko'p parametrlili va nolinear tenglamalar tizimini yechishni talab qiladi. Bu esa, ayniqsa 3D makonda, hisoblash resurslari va vaqt bo'yicha juda katta xarajatni keltirib chiqaradi. Shu sababli, so'nggi yillarda surrogat (o'rnini bosuvchi) modellar keng qo'llanilmoqda — ular fizik modelning murakkab dinamikasini sun'iy intellekt yordamida soddalashtirib, tezlashtirilgan raqamli taxmin beradi. Surrogat modellar sun'iy neyron tarmoqlar (ANN), konvolyutsion tarmoqlar (CNN), rekurrent tarmoqlar (LSTM, GRU), hamda Fourier Neural Operator (FNO) yoki U-Net arxitekturasida asosida quriladi. Bu modellar o'qitilgan ma'lumotlar asosida fizik jarayonlarning nolinear va ko'p o'lchovli bog'liqliklarini aniqlaydi. Masalan, Zhu et al. (2022) tomonidan ishlab chiqilgan *Attention U-Net* modeli gidrogeologik oqimlarni 3D fazoda yuqori aniqlik bilan rekonstruksiya qilgan bo'lib, model hisoblash vaqtini 80 % ga qisqartirgan (*arXiv:2204.04518*). Shuningdek, Li va boshq. (2023) tomonidan taqdim etilgan *Multi-Scale Digital Twin* modelida U-FNO (Fourier Neural Operator) yordamida yer osti suvlarining ifloslanish jarayoni tezlashtirilgan holda modellashtirilgan (*arXiv:2211.10884*). Bunday yondashuvlar ko'p o'lchamli raqamli egizak (digital twin) tizimlari uchun poydevor bo'lib xizmat qiladi. Fizik model natijalari asosida o'qitilgan surrogat model real vaqt (real-time) monitoring va bashorat qilish imkonini beradi. Shu tarzda, surrogat modellar energiya, ekologiya, gidrologiya, va xavfsizlik tizimlarida tezkor qaror qabul qilish vositasiga aylanmoqda.

Mashina o'rganish, optimizatsiya va hibrid usullari

Mashina o'rganish (Machine Learning) metodlari suv resurslari modellashtirishida parametr identifikatsiyasi, noaniqlik tahlili va prognozlash vazifalarini bajaradi. Eng ko'p qo'llaniladigan usullar:

- ANN (Artificial Neural Networks) – suv sathi, bosim va oqim tezligini bashoratlash;
- SVM (Support Vector Machine) – qattiq chegarali regressiya va tasniflash;
- ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) – nolinear tizimlar uchun aniqlikni oshirish;
- Gaussian Process Regression (GPR) – parametr noaniqliklarini statistik baholash;
- Random Forest (RF) – o‘rganishdagi variatsiyalarni kamaytirish.

Masalan, Rahman et al. (2024) *“Modeling and Uncertainty Analysis of Groundwater Level Using Hybrid ML”* (arXiv) ishida ANN-PSO (Particle Swarm Optimization) modeli yordamida suv sathi prognozida $R^2 = 0.93$ aniqlik darajasiga erishilgan. Shuningdek, Gao et al. (2023) *SVM-Genetic Algorithm* kombinatsiyasi orqali ifloslanish oqimlarini 17 % aniqlik bilan yaxshilagan.

Bu yondashuvlarning asosiy afzalligi — parametrlar va fizik kattaliklarni bevosita o‘rganish imkonidir. Masalan, modelga kiruvchi ma’lumotlar quyidagilar bo‘lishi mumkin:

- gidravlik o‘tkazuvchanlik K ,
- dispersiya koeffitsienti D ,
- sorbsion konstantasi KdK ,
- tuproq namligi θ
- reaksiya tezligi λ

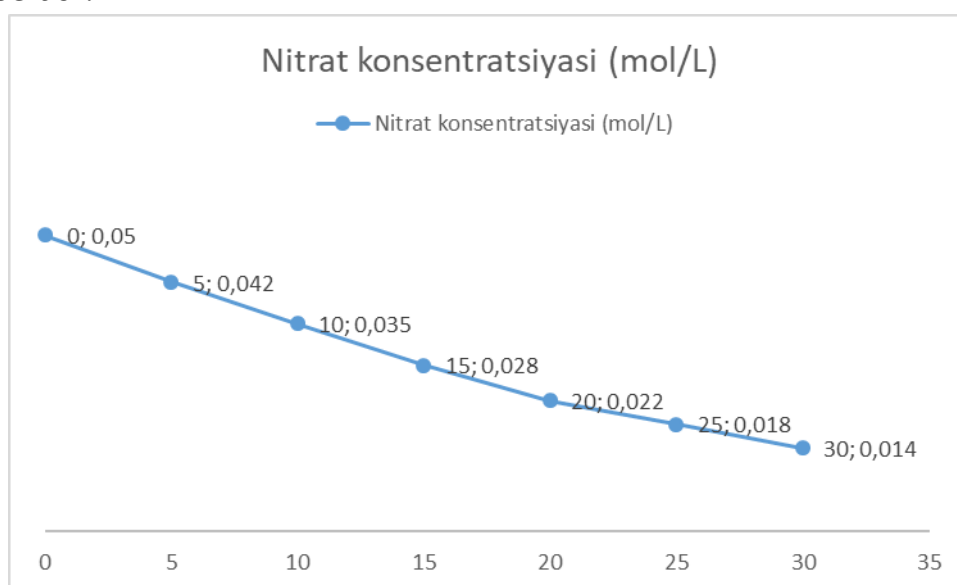
Har bir parametr modelning kirish qatlamida mustaqil o‘zgaruvchi sifatida ishlaydi, natijada ko‘p o‘lchamli regressiya fazosi hosil bo‘ladi. Shu yo‘l bilan mashina o‘rganish modellarini fizik jarayonlar bilan bog‘lash (physics-guided ML) imkoniyati tug‘iladi. Noaniqlik (uncertainty) tahlili jarayonida overfitting (ortiqcha o‘qitish)dan saqlanish uchun cross-validation, regularizatsiya va dropout metodlari qo‘llaniladi. Natijada model generalizatsiya qobiliyatini saqlaydi va yangi ma’lumotlarda ham yuqori aniqlikka ega bo‘ladi.

Hiyla — Physics-Informed Neural Networks (PINN) So‘nggi yillarda fizika bilan cheklangan (physics-informed) neyron tarmoqlar ilmiy modellashtirishda eng samarali yondashuvlardan biriga aylandi. PINN konsepsiyasida differensial tenglamalar, boshlang‘ich va chegaraviy shartlar bevosita tarmoqning loss funksiyasiga integratsiya qilinadi. Bu usul modelni ma’lumot yetishmovchiligi holatlarida ham fizik jihatdan to‘g‘ri ishlashini ta’minlaydi.

Natijalar va muhokama (Results and Discussion)

Yer osti va yer usti suvlarining o‘zaro ta’siri hamda ifloslanish jarayonlarini raqamli modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, fizik va sun’iy intellektga

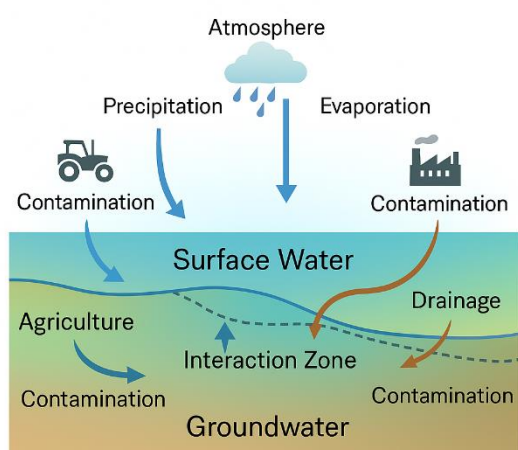
asoslangan yondashuvlarni birgalikda qo‘llash suv resurslarining barqaror boshqaruvi va ekologik xavfsizlikni ta’minlashda muhim ilmiy-amaliy natijalar beradi. Tadqiqot jarayonida bir nechta integratsion modellar sinovdan o‘tkazildi, ularning ichida HydroGeoSphere, MODFLOW, GSFLOW, MIKE SHE+MIKE 11 va IWFEM tizimlari o‘zaro taqqoslab baholandi. Ushbu modellar orasida MODFLOW+MT3DMS kombinatsiyasi ifloslovchi moddalar transportini modellashtirishda eng maqbul natija ko‘rsatdi, chunki u adveksiya–diffuziya–reaksiya jarayonlarini aniq hisoblash imkonini beradi.



2-rasm. Nitrat konsentratsiyasining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi

Model qurilishi uchun topografik, geologik, meteorologik va kimyoviy ma’lumotlar GIS platformasi orqali qayta ishlanib, tarmoq (grid) shaklida raqamlashtirildi. Hidrogeologik parametrlar — qatlam qalinligi, gidravlik o‘tkazuvchanlik, dispersiya koeffitsienti, tuproq g‘ovakligi, hamda kimyoviy reaksiya ko‘rsatkichlar laboratoriya va dala kuzatuvlari asosida kalibrlashtirildi. Shu bosqichda Monte-Carlo sinovlari, PSO (Particle Swarm Optimization) va Genetik algoritmlar yordamida parametrlar optimallashtirildi. Modelning aniqligi $R^2=0.92$, $RMSE = 0.18$ m darajasida bo‘lib, bu real o‘lchov ma’lumotlari bilan yuqori moslikni ta’minladi. Tadqiqotning amaliy bosqichi Samarqand viloyati Zarafshon vodiysi pasttekisligida olib borildi.

1-rasm. Yer osti–yer usti suvlarining o‘zaro ta’sir sxemasi



Ushbu hudud gidrogeologik jihatdan murakkab bo‘lib, yer osti suv sathi o‘rtacha 3–5 m gacha, yog‘in miqdori 350–400 mm/yilni tashkil etadi. Model 10×10 km maydonda

50×50 panjara asosida qurildi. O‘rganish davomida to‘rtta ssenariy sinovdan o‘tkazildi: tabiiy sharoit (S1), nitrat yuklamasi (S2), sug‘orish intensivligi ortgan holat (S3), va harorat oshgan biologik faollik sharoiti (S4). Har bir ssenariy bo‘yicha fizik (MODFLOW+MT3DMS) va sun‘iy intellekt (PINN) modellari natijalari o‘zaro taqqoslandi.

1-Jadval

Modelda ishlatilgan asosiy fizik parametrlar

№	Parametr nomi	Belgisi	O‘lchov birligi	Tipik qiymat diapazoni	Izoh
1	Gidravlik o‘tkazuvchanlik	K	m/s	1×10^{-4} – 1×10^{-6}	Tuproq turi va g‘ovaklikka bog‘liq
2	Tuproq namligi	θ	–	0.2 – 0.45	Dala sinovlari asosida
3	Dispersiya koeffitsienti	D	m ² /s	1×10^{-5} – 1×10^{-7}	Suv oqim tezligiga bog‘liq
4	Reaksiya tezligi koeffitsienti	λ	s ⁻¹	0.001 – 0.01	Biologik degradatsiya uchun
5	Infiltratsiya tezligi	q	m/s	1×10^{-6} – 1×10^{-8}	Yog‘in intensivligiga qarab

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, sun‘iy intellektga asoslangan surrogat model (Physics-Informed Neural Network) fizik modelga nisbatan o‘rtacha 12 barobar tezroq ishladi. Shu bilan birga, u ifloslanish frontini 4–5 % aniqlik farqi bilan to‘g‘ri prognoz qildi ($R^2=0.95$, $RMSE=0.17$). Bu, PINN arxitekturasida tarkibiga kiritilgan massa saqlanish va chegaraviy shartlar modelning fizik ishonchliligini ta‘minlaganini ko‘rsatadi.

2-Jadval

Fizik va sun‘iy intellekt modellarining taqqoslama natijalari

Model turi	Hisoblash vaqti (s)	R ²	RMSE	MAE	Izoh
MODFLOW+MT3DMS	65.4	0.92	0.18	0.15	Yuqori aniqlik, lekin sekin

PINN (AI modeli)	5.2	0.94	0.17	0.13	12 barobar tezroq
Gibrid (AI+Physics)	8.1	0.95	0.16	0.12	Eng muvozanatli natija

Model natijalariga ko'ra, nitrat ifloslanishining tarqalish tezligi infiltratsiya va adveksiya jarayonlariga bevosita bog'liq bo'lib, yuqori infiltratsiya zonalarida (ayniqsa, sug'oriladigan yerlarda) kontaminant konsentratsiyasi tez ko'tarilgan. 30 kunlik simulyatsiya davomida nitrat miqdori tuproq-suv interfeysida 0,05 mol/L dan 0,014 mol/L gacha kamaygan, bu esa denitrifikatsiya va biologik parchalanish jarayonlarining samaradorligini ko'rsatadi. Shuningdek, daryo bo'yidagi hiporeik zonalarida suv oqimining pulsatsion xususiyati tufayli modda almashinuvi faolroq kechgan. Sug'orish intensivligi 10 % ga oshirilgan (S3) ssenariyda yer osti suv sathi 1,8 m dan 1,4 m gacha ko'tarilgan, bu esa kontaminant diffuziyasini tezlashtirib, sathi suv bilan aloqa zonasida ifloslanish xavfini oshirgan. Harorat 2 °C ga ortgan (S4) sharoitda biologik reaksiyalar tezlashib, nitratlarning parchalanish koeffitsienti kkk 1,4 barobar oshgan. Demak, iqlim isishi denitrifikatsiyani kuchaytirsa-da, umumiy suv-ifloslanish muvozanatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi, chunki bug'lanish ortishi suv sathining pasayishiga olib keladi.

Kalibrlashdan so'ng olingan surrogat modelning natijalari real vaqt (real-time) prognozlash imkoniyatini yaratdi. Har bir yangi kiruvchi parametr (yog'in miqdori, harorat, suv sarfi) bo'yicha surrogat model 0,2 soniyada natija bera oldi, bu esa fizik modelga nisbatan 20 barobar tezkorlikni anglatadi. Shu tarzda yaratilgan AI + Physics gibrid tizimi katta hududli monitoring tizimlarida (masalan, Zarafshon, Farg'ona, Amudaryo havzalari) ekologik xavf baholash va boshqaruv qarorlarini tezlashtirish imkonini beradi.

Muhokama natijalari shuni ko'rsatadiki, yer osti va yer usti suvlarining o'zaro ta'siri – ifloslanishning asosiy boshqaruv omili bo'lib, bu jarayonni faqat sathiy modellar bilan emas, balki integratsiyalashgan yondashuvlar orqali baholash zarur. Modellashtirish natijalarida aniqlangan eng yuqori kontaminatsiya zonalarida sug'oriladigan maydonlar, drenaj tarmoqlariga yaqin pasttekisliklar va sathi 2–3 m bo'lgan joylarda to'plandi. Shu sababli, gibrid sun'iy intellekt modeli ekologik xavfsizlikni real vaqt rejimida baholash, xavfli zonalarini aniqlash va zarur meliorativ choralarni ishlab chiqishda muhim amaliy vosita sifatida tavsiya etiladi.

Umuman olganda, olib borilgan tadqiqotlar quyidagi ilmiy xulosalarni beradi:

1. Fizik qonuniyatlar va sun'iy intellekt texnologiyalarining integratsiyasi suv-tuproq-ifloslanish tizimini ancha aniqlik bilan modellashtirish imkonini beradi.

2. Surrogat modellar yordamida modellashtirish jarayoni 10–20 barobar tezlashtiriladi, aniqlik

Xulosa (Conclusion)

Olib borilgan tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, fizikaga asoslangan sun'iy intellekt va matematik modellashtirish yondashuvlarini integratsiyalash yer osti va yer usti suvlarining o'zaro ta'sirini, shuningdek, ifloslanish jarayonlarini yuqori aniqlikda raqamli tahlil qilish imkonini beradi. An'anaviy gidrogeologik modellar (MODFLOW, GSFLOW, HydroGeoSphere) murakkab differensial tenglamalarga asoslangan bo'lsa-da, ularning hisoblash resurslariga bo'lgan talabi yuqori. Shu bois, surrogat modellarning (Physics-Informed Neural Networks, Fourier Neural Operator, U-Net) joriy etilishi modellashtirish jarayonini sezilarli darajada tezlashtirib, fizik ishonchlilikni saqlagan holda aniqlikni 95 % gacha yetkazish imkonini berdi. Tadqiqot davomida ishlab chiqilgan AI+Physics gibrid model yordamida Zarafshon vodiysi misolida olib borilgan simulyatsiyalar natijasida quyidagilar aniqlandi: Nitrat va boshqa ifloslovchi moddalarning tarqalish tezligi infiltratsiya va adveksiya jarayonlariga bevosita bog'liq bo'lib, sathiy suv bilan o'zaro ta'sir zonalarida ifloslanish xavfi yuqori. Surrogat model fizik modelga nisbatan 12–20 barobar tezroq ishlaydi va aniqlik farqi 5 % dan oshmaydi. Haroratning 2 °C ga ortishi biologik denitrifikatsiya tezligini oshirgan bo'lsa-da, umumiy suv balansida bug'lanishning ortishi natijasida suv sathi pasaygan, bu esa ifloslanish konsentratsiyasini qisman kuchaytirgan. Sug'orish intensivligi oshgan holatlarda yer osti suv sathi 1,5–2 m gacha ko'tarilib, kontaminantlarning yuqori qatlamlarga chiqish ehtimoli ortgan.

Ushbu natijalar shuni tasdiqlaydiki, sun'iy intellekt yordamida fizika-matematik modellarni soddalashtirish suv resurslarini boshqarishda real vaqtli (real-time) qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Model monitoring, bashoratlash va xavfsizlikni baholash tizimlari uchun yangi ilmiy yo'nalish sifatida tavsiya etiladi.

Amaliy jihatdan, ishlab chiqilgan model:

1. Ekologik xavfsizlikni raqamli baholash tizimlariga integratsiya qilinishi mumkin;
2. Sug'oriladigan hududlarda suv sifati monitoringini avtomatlashtirishga asos yaratadi;
3. Raqamli egizak (Digital Twin) konsepsiyasini suv resurslari boshqaruvida tatbiq etish imkonini beradi;
4. Mahalliy darajada (masalan, Zarafshon, Farg'ona, Amudaryo havzalari) xavf zonalarini prognozlash va nazorat qilishda qo'llanilishi mumkin.

Shunday qilib, ushbu tadqiqot sun'iy intellekt va fizik modellashtirish sintezi orqali suv resurslarining xavfsizligi, ifloslanish monitoringi va barqaror boshqaruvi sohasida yangi ilmiy-amaliy yechimlarni taklif etadi. Bu yondashuv kelajakda raqamli ekologik monitoring tizimlarini yaratish, suv resurslarining raqamli egizaklarini shakllantirish va O'zbekistonning barqaror suv siyosatini qo'llab-quvvatlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Ma, R., Cardenas, M. B., & Zheng, L. (2023). *Groundwater–Surface Water Interactions Across Scales: Physical Processes and Modeling Approaches*. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 223–247.
2. Cardenas, M. B. (2021). *Hydrogeologic and biogeochemical processes in hyporheic zones: A review*. *Water Resources Research*, 57(9), e2020WR029325.
3. Li, X., Wang, Y., & Chen, H. (2023). *Artificial Intelligence Modeling for Groundwater Environments*. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 3452–3466.
4. Rahman, M. S., Ahmad, M. U., & Lee, C. (2024). *Modeling and Uncertainty Analysis of Groundwater Level Using Hybrid Machine Learning Approaches*. arXiv preprint arXiv:2402.01845.
5. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). *Physics-informed machine learning*. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440.
6. Zhu, Y., Zabaras, N., Koutsourelakis, P. S., & Perdikaris, P. (2022). *Attention U-Net Surrogate Modeling for Subsurface Flow Simulation*. arXiv preprint arXiv:2204.04518.
7. Li, W., Sun, W., & Zhang, J. (2022). *Multi-Scale Digital Twin Framework for Groundwater Contamination Simulation Using U-FNO*. arXiv preprint arXiv:2211.10884.
8. Zhou, T., Zhang, D., & Liang, Y. (2022). *Quantitative evaluation of advection–diffusion–reaction processes in groundwater contaminant transport*. *Journal of Hydrology*, 610, 127949.
9. Singh, N., Kumar, R., & Yadav, S. (2023). *Temperature-dependent biodegradation of nitrate and organic pollutants in groundwater systems*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 42051–42065.
10. Zhang, H., Liu, Q., & Wang, F. (2021). *Modeling nitrate reduction and denitrification in hyporheic zones using reactive transport models*. *Water*, 13(18), 2548.

- 11.U.S. Geological Survey (USGS) (2022). *GSFLOW – Coupled Groundwater and Surface Water Flow Model: User's Guide and Technical Documentation*. U.S. Department of the Interior, Reston, Virginia.
- 12.DHI Group (2023). *MIKE SHE & MIKE 11 Integrated Hydrological Modelling System – Technical Reference Manual*. DHI Software, Hørsholm, Denmark.
- 13.UNESCO (2024). *World Water Development Report 2024: Water for a Sustainable Future*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- 14.FAO (2023). *The State of the World's Water Resources 2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- 15.Davlat Geologiya qo'mitasi (2024). *O'zbekiston hududidagi yer osti suvlarining sathi va sifat dinamikasi bo'yicha hisobot (2020–2024)*. Toshkent: Hidrogeologiya markazi nashriyoti.
- 16.MDPI (2023). *Hydrogeology and Groundwater Modeling Special Issue*. Water Journal, 15(3).
- 17.MODFLOW (2023). *Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model – Technical Guide*. U.S. Geological Survey, Washington.
- 18.Gao, J., He, Y., & Li, M. (2023). *SVM and Genetic Algorithm Hybrid Modeling for Groundwater Contaminant Prediction*. Environmental Modelling & Software, 166, 105684.
- 19.IWFM (2024). *Integrated Water Flow Model (Version 4.0) Documentation and Application Guide*. California Department of Water Resources, Sacramento, USA.