

GIDROGEOLOGIK JARAYONLARNING MODELLASHTIRILISHI VA BASHORATLASH IMKONIYATLARI

Nazira Abroqulova¹,

Jamoljon Djumanov²,

Ma'ruffjon Bolbekov³

¹ Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent
axborot texnologiyalari universiteti tayanch
doktaranti: abroqulovanazira@gmail.com

² Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot
texnologiyalari universiteti Kompyuter tizimlari
kafedrası professori: jamoljon@mail.ru

³ Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent
axborot texnologiyalari universiteti
Samarqand filiali katta o'qituvchi.
shahriyovvsshahrambek@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada gidrogeologik monitoring tizimlarini zamonaviy texnologiyalar asosida tashkil etish, ularni modellashtirish va bashoratlash imkoniyatlari ilmiy asosda tahlil qilingan. Yer osti suvlarining harakati, sathi, sifati va ularning fazoviy-vaqtinchalik o'zgarishlarini aniqlash uchun IoT sensorlaridan, sun'iy intellekt algoritmlaridan, geoinformatik tizimlar (GIS) va bulutli hisoblash texnologiyalaridan foydalanish taklif etiladi. Ekologik xavflarni oldindan aniqlash, yer osti suvlarini boshqarish samaradorligini oshirish hamda ilmiy bashoratlashning aniqligini ta'minlash imkoniyati o'rganilgan.

Kalit so'zlar: Gidrogeologik monitoring, yer osti suvlari, modellashtirish, IoT, sun'iy intellekt, GIS, ESP32, sensorlar, bashoratlash, bulutli platformalar, real vaqt monitoringi, ekologik xavfsizlik.

Yer osti suvlari insoniyat hayotining ajralmas manbai bo'lib, ichimlik suvi ta'minoti, qishloq xo'jaligi sug'orish tizimlari, sanoat ehtiyojlari hamda ekologik muvozanatni saqlashda muhim rol o'ynaydi. Aholi sonining ko'payishi, iqlim o'zgarishi, texnogen bosimning ortishi kabi omillar yer osti suv resurslariga bo'lgan ehtiyojni keskin oshirib yubormoqda. Ayniqsa, yarim qurg'oqchil va suv tanqisligi mavjud bo'lgan hududlarda bu resurslarni samarali boshqarish dolzarb masalaga aylangan. Mazkur holat gidrogeologik jarayonlarni chuqur o'rganish, ularning dinamikasini tahlil qilish va bashoratlash zaruratini yuzaga keltiradi.

So'nggi yillarda axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining tez sur'atlar bilan rivojlanishi gidrogeologik monitoring tizimlariga zamonaviy yondashuvlarni joriy etish imkonini yaratdi. Jumladan, IoT (Internet of Things) texnologiyalari, sun'iy intellekt (AI), geoinformatik tizimlar (GIS), bulutli hisoblash, hamda energiyaga mustaqil qurilmalar yordamida yer osti suv holatini real vaqt rejimida kuzatish, bashorat qilish va boshqarish imkoniyati yuzaga kelmoqda. Bu esa tabiiy resurslardan oqilona foydalanish, ekologik xavfsizlikni ta'minlash va favqulodda holatlarning oldini olishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur ilmiy tadqiqot ishida gidrogeologik jarayonlarni modellashtirish va bashoratlashning nazariy asoslari, zamonaviy texnologiyalar yordamida monitoring tizimi arxitekturasini, shuningdek, ushbu tizimlarning istiqbollari va amaliy qo'llanilish sohalari o'rganiladi.

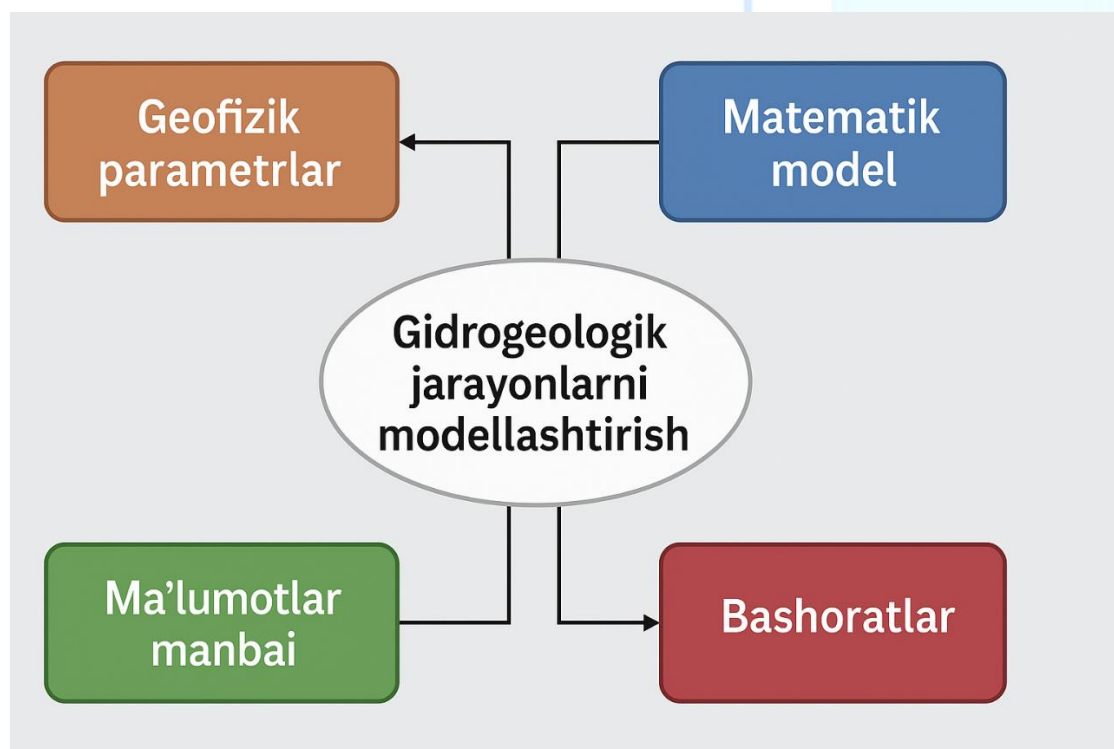
Gidrogeologik jarayonlarni modellashtirish va bashoratlash masalalari bugungi kunda geofizika, ekologiya, geoinformatika va axborot texnologiyalari sohalarining kesishgan nuqtasida faol rivojlanayotgan ilmiy yo'nalishlardan biridir. Ilmiy adabiyotlarda bu boradagi tadqiqotlar ko'plab uslubiy va amaliy yondashuvlar asosida olib borilgan. Masalan, Bear (1979) va Freeze & Cherry (1979) tomonidan taklif etilgan klassik gidravlik va geologik modellar yer osti suvlari harakatining asosiy fizik qonuniyatlarini tushuntirishga qaratilgan. [1] Ular tomonidan ishlab chiqilgan Darcy qonuni asosida yaratilgan deterministik

modellar bugungi kunda ham ko‘plab simulyatsion tizimlarda asosiy hisoblanadi. So‘nggi yillarda GIS (Geographic Information Systems) va masofaviy zondlash (remote sensing) texnologiyalari yordamida gidrogeologik modellarni fazoviy tahlil qilish imkoniyati sezilarli darajada oshdi. Bu borada [Rodriguez-Galiano et al., 2014] tomonidan taklif etilgan metodologiyalar, fazoviy bashoratlash modellari va landshaft indikatorlari asosida suv zaxiralarini monitoring qilishda qo‘llanilmoqda. Bundan tashqari, sun‘iy intellekt (AI) va mashina o‘rganish (ML) algoritmlarining qo‘llanilishi ham bu yo‘nalishda yangi bosqichga olib chiqdi. [2] Random Forest, Support Vector Machine (SVM), va Deep Neural Networks asosida yer osti suvlarining sathi, oqimi, ifloslanishi bo‘yicha yuqori aniqlikdagi bashoratlar olish imkoniyati yaratilmoqda (Qi et al., 2019; Ali et al., 2020). IoT sensorlari orqali uzluksiz ma‘lumot yig‘ish imkoniyati (Chowdhury et al., 2021) esa bu modellarni real vaqt rejimida ishlashiga asos yaratdi. O‘zbekiston olimlari ham bu yo‘nalishda muhim tadqiqotlar olib bormoqda. Jumladan, D.J. Jumanov, O.B. Mardiyev va boshqalarning yer osti suvlarining monitoringi, gidrodinamik bosimlarni tahlil qilish va mintaqaviy bashorat modellari ishlab chiqish borasidagi ishlari e‘tiborga loyiq. Ular respublika hududlarida mavjud gidrogeologik sharoitlarni hisobga olgan holda amaliy model yaratish muammolarini yoritib bergan.

Shu bilan birga, zamonaviy mikrokontrollerlar (ESP32, Arduino), simsiz aloqa texnologiyalari (LoRa, Wi-Fi) va bulutli platformalar (Firebase, Thingspeak) asosidagi monitoring tizimlari yordamida tadqiqotlar sohasida yangi imkoniyatlar ochilmoqda. Bu texnologiyalar ilmiy modellashtirishdan tashqari, amaliy boshqaruv va ekologik xavfsizlikni ta‘minlashda keng qo‘llanilmoqda. [3]

Gidrogeologik jarayonlarni modellashtirish zamonaviy geofizik va geoinformatik yondashuvlarga asoslangan holda, yer osti suvlarining harakati, zaxirasi, ifloslanish darajasi va ularning vaqtinchalik va fazoviy o‘zgarishlarini tushunish va bashorat qilishda muhim vosita hisoblanadi. Ushbu jarayonlar odatda gibrid xarakterga

ega bo‘lib, ularning kechishi turli fizikaviy omillar (masalan, geologik qatlamlar holati, gidravlik o‘tkazuvchanlik, infiltratsiya darajasi, sirtga yaqin joylashgan tuproq xossalari) bilan chambarchas bog‘liq. Modellashtirish orqali gidrogeologik tizimlarning murakkab dinamikasini soddalashtirish, ularni matematik tenglamalar yordamida ifodalash, va bu model orqali kelajakdagi holatlarni oldindan baholash mumkin bo‘ladi. Gidrogeologik modellar asosan deterministik, statistik va stoxastik usullarga asoslanadi. Deterministik modellar fizik qonuniyatlarga asoslanib, aniq parametrlar va boshlang‘ich shartlardan foydalangan holda natija beradi. Statistik modellar esa mavjud tarixiy ma’lumotlarga tayangan holda, regressiya tahlillari yoki neyron tarmoqlar yordamida natijani baholaydi. Stoxastik yondashuvlar esa tasodifiylik elementlarini ham hisobga olib, bashoratlarning ishonchlilik darajasini baholash imkonini beradi. Bu modellashtirish yondashuvlari, ayniqsa, qurg‘ochilikka chidamli hududlarda, suv resurslarini barqaror boshqarish, ifloslanish xavfini minimallashtirish va favqulodda vaziyatlarga tayyor turishda alohida ahamiyatga ega.[4]

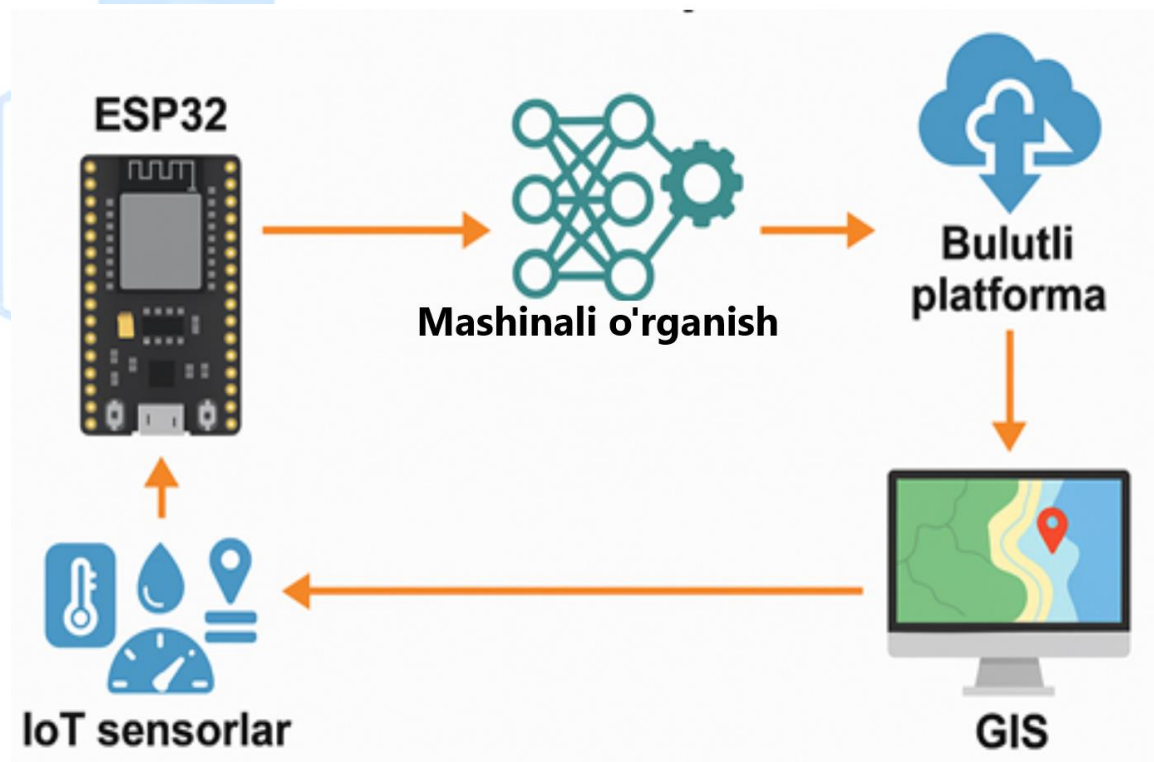


1 – rasm Gidrogeologik jarayonlarni modellashtirish

Ushbu 1 – rasmda gidrogeologik monitoring tizimining asosiy tarkibiy qismlari va ularning o‘zaro aloqasi modellashtirilgan. Rasmning yuqori qismida yer sathidagi landshaft – o‘simliklar, suv havzasi va tabiiy muhit tasvirlangan. Pastki qismda esa yer osti qatlamlari (qum, shag‘al, gil) orqali harakatlanayotgan yer osti suvlari ko‘rsatilgan bo‘lib, ularning oqimi qatlamlararo fizik xususiyatlarga bog‘liq tarzda o‘zgarmoqda. Monitoring maqsadida joylashtirilgan chuqurlikdagi sensorlar (masalan, HC-SR04 ultratovushli sensor, DHT22 harorat va namlik sensori) orqali yer osti suv sathi, harorati va tuproq namligi kabi parametrlar doimiy tarzda o‘lchanadi. Ushbu sensorlar ESP32 mikrokontrolleriga ulangan bo‘lib, u yig‘ilgan ma’lumotlarni simsiz aloqa (Wi-Fi yoki LoRa) orqali bulutli serverga uzatadi. Ma’lumotlar markaziy serverda saqlanadi va maxsus web interfeys orqali foydalanuvchiga grafik yoki jadval ko‘rinishida taqdim etiladi. Axborot oqimining harakati sensorlardan markaziy tizimga, u yerdan esa monitoring foydalanuvchisiga uzatilib, real vaqt rejimida ishlash imkonini beradi.

So‘nggi yillarda IoT (Internet of Things), sun‘iy intellekt, masofaviy zondlash, va GIS (Geographic Information Systems) texnologiyalarining rivojlanishi gidrogeologik monitoring va bashoratlash jarayonlariga tub o‘zgarishlar kiritdi. Sun‘iy intellekt va mashinali o‘rganish algoritmlari (masalan, Random Forest, Support Vector Machine, Deep Learning) yordamida bu ma’lumotlar asosida yer osti suvlarining kelajakdagi holati prognoz qilinadi. Masalan, DHT22 va HC-SR04 kabi sensorlar yordamida o‘lchangan atrof-muhit parametrlarini ESP32 mikrokontrolleriga uzatib, bu axborotni tahlil qilish va grafik ko‘rinishda taqdim etish mumkin. Bunday tizimlar Thingspeak yoki Firebase kabi bulutli platformalarda real vaqt monitoringini ta’minlab, geologlar, ekologlar va suv resurslari bilan ishlovchi mutaxassislar uchun ishonchli axborot bazasini shakllantiradi. GIS tizimlari esa modellashtirilgan natijalarni fazoviy tahlil qilish imkonini beradi. Natijada, ma’lum bir hududda suv resurslarining zaxirasi qancha vaqtga yetishi, qaysi zonalarda qurg‘oqchilik xavfi yuqori ekanligi yoki ifloslanish manbalari tarqalish yo‘nalishi aniqlanishi mumkin. Bu

bashoratlash imkoniyatlari tabiiy ofatlarning oldini olish, suv infrastrukturasini boshqaruvi va ekologik xavfsizlikni ta'minlashda beqiyos ahamiyatga ega.



2 – rasm Zamonaviy texnologiyalar yordamida gidrogeologik bashoratlash tizimi arxitekturasini.

Yuqorida 2 – rasm zamonaviy raqamli texnologiyalar asosida tashkil etilgan aqlli gidrogeologik bashoratlash tizimining funktsional qismlarini ko'rsatadi. Bu arxitektura gidrogeologik ma'lumotlarni avtomatik yig'ish, uzatish, saqlash, tahlil qilish va vizualizatsiya qilishni ta'minlaydi. Asosiy maqsad — yer osti suvlari sathi, namlik, harorat, bosim kabi tabiiy ko'rsatkichlarning real vaqt rejimida monitoringini olib borish va ularning asosida bashoratlar hosil qilishdir.[5-6]

Diagrammada tizimning birinchi qismi sensorlar (IoT qurilmalar) bo'lib, ular real muhitdan kerakli fizik parametrlarni o'lchaydi. Ushbu sensorlarga DHT22 (harorat va namlik), HC-SR04 (masofa o'lchovchi), bosim sensorlari va hatto yer tebranishini aniqlovchi geofizik sensorlar kiradi. Bu sensorlar bevosita monitoring hududiga joylashtiriladi va uzluksiz ma'lumotlarni yig'adi. Sensorlardan kelgan raqamli signal

mikrokontroller (ESP32, Arduino, Raspberry Pi) ga uzatiladi. Mikrokontroller ma'lumotlarni dastlabki tahlil qilib, kerakli formatda simsiz aloqa moduli orqali uzatadi.

Aloqa texnologiyasi sifatida Wi-Fi, LoRaWAN yoki NB-IoT ishlatiladi. Wi-Fi yaqin masofalar uchun qulay bo'lsa, LoRaWAN uzoq masofalarda kam energiya sarflab ishlaydi. NB-IoT esa mobil aloqa tarmoqlari orqali keng qamrovli uzatishni ta'minlaydi. Sensorlardan olingan ma'lumotlar ushbu aloqa kanallari orqali bulutli server yoki ma'lumotlar markaziga uzatiladi.

Keyingi bosqich — ma'lumotlarni saqlash va tahlil qilish. Bu bosqichda ma'lumotlar Firebase, Thingspeak, InfluxDB, PostgreSQL kabi platformalarda saqlanadi. Ma'lumotlar bazasidan foydalanib, ular ustida bashoratlash, regressiya, klasterlash, vaqt qatorlari tahlili kabi sun'iy intellekt (AI) va mashina o'rganish (ML) algoritmlari orqali chuqur tahlil o'tkaziladi. Masalan, suv sathining o'zgarishi bo'yicha kelajakdagi qurg'oqchilik xavfi yoki yer osti suvlarining ifloslanish yo'nalishi bashorat qilinishi mumkin.

Shuningdek, tizimga vizualizatsiya va ogohlantirish interfeysi ham kiritilgan. Bu interfeys — veb-sayt, mobil ilova yoki monitoring paneli ko'rinishida bo'lib, foydalanuvchiga real vaqtli graflar, statistik hisobotlar, dinamik xaritalar ko'rinishida ma'lumotlarni taqdim etadi. Interfeysda ma'lum cheklovlardan oshib ketgan qiymatlar bo'lsa, foydalanuvchiga ogohlantirish yuboriladi (masalan, SMS yoki push-xabar ko'rinishida).

Arxitektura oxirida qaror qabul qilish tizimi mavjud bo'lib, bu tizim avtomatik ravishda chora-tadbirlarni ishlab chiqadi: nasoslarni ishga tushurish, suv ta'minotini o'zgartirish, havolani yopish yoki ekotizimni muhofaza qilish choralarini boshlash. Tizim mustaqil, energiya tejamkor va kengaytiriladigan bo'lib, uni qishloq xo'jaligida, ekologik monitoringda va favqulodda vaziyatlar xizmatida muvaffaqiyatli qo'llash mumkin.

Shunday qilib, 2 – rasmda ko'rsatilgan arxitektura — bu zamonaviy raqamli texnologiyalar, IoT, AI, va bulutli hisoblash asosida yaratilgan aqlli gidrogeologik

monitoring va bashoratlash tizimining to‘liq ishlash mexanizmini ifodalaydi. U nafaqat monitoring jarayonini soddalashtiradi, balki ilmiy tahlillar va boshqaruv qarorlarining sifatini ham oshiradi.

Kelajakda gidrogeologik monitoring tizimlarining yanada takomillashuvi sun‘iy intellekt, katta ma’lumotlar (Big Data) va energetik mustaqil qurilmalar yordamida sodir bo‘ladi. Masalan, quyosh panellari bilan jihozlangan sensorlar yirik maydonlarda uzoq muddatli monitoringni talab qiluvchi loyihalarda samarali ishlatiladi. Shuningdek, bulutli hisoblash texnologiyalari yordamida yig‘ilgan ma’lumotlar tezkor qayta ishlanib, tahlil qilinadi va foydalanuvchiga mobil ilova yoki web-panel orqali taqdim etiladi. IoT asosidagi gidrogeologik tizimlar yer osti suvlarini faqat kuzatish bilan cheklanmay, balki boshqarish imkoniyatini ham yaratadi. Masalan, avtomatik nasos tizimlarini masofadan boshqarish, zaxira suvlar sarfini nazorat qilish, yoki ifloslanish aniqlangan hollarda avtomatik ogohlantirish yuborish kabi funksiyalar kiritilishi mumkin. Bu esa zamonaviy gidrogeologik monitoring tizimlarini energetik, agrar va sanoat tarmoqlarida keng qo‘llash imkonini beradi. Ayniqsa, O‘zbekiston kabi yarim qurg‘oqchil hududlarda suv resurslarini barqaror boshqarish, texnogen xavflarni kamaytirish va ekologik barqarorlikni saqlab qolish yo‘lida bunday tizimlar muhim ahamiyat kasb etadi. Shu bilan birga, gidrogeologik modellar orqali yer osti suvlarining qatlamlar bo‘yicha harakati, ular orasidagi bog‘liqlik, va inson faoliyatining gidrodinamik holatlarga ta’siri ham keng ko‘lamda o‘rganilishi mumkin. Bu ilmiy yondashuvlar atrof-muhitni muhofaza qilishda, strategik rejalashtirishda va tabiiy resurslarni boshqarishda zamonaviy va ilmiy asoslangan qarorlar qabul qilishga xizmat qiladi.

Adabiyotlar

1. Singh, A., & Woolhiser, D.A. (2002). Mathematical Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 81–88.
2. Sophocleous, M. (2005). Groundwater recharge and sustainability in the context of integrated water resources management. *Water Resources Update*, 127, 12–20.

3. Anderson, M.P., Woessner, W.W., & Hunt, R.J. (2015). Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. *Groundwater Journal*, 53(4), 541–555.
4. Dogan, S., et al. (2021). Integration of IoT and AI for Real-time Groundwater Quality Monitoring and Forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Article 755.
5. Jumanov, D.J., Mardiev, O. (2020). O‘zbekistonning yer osti suvlarini monitoring qilishda zamonaviy texnologiyalar va ularning samaradorligi. *O‘zbekiston geologiyasi jurnali*, 3(45), 25–31.
6. Mardiev, O., & To‘raqulov, R. (2020). Hidrogeologik monitoring tizimlarining raqamlashtirilishi va O‘zbekistonda qo‘llanilishi. *O‘zbekiston Suv xo‘jaligi ilmiy-amaliy jurnali*, 2(18), 33–39.