

KUZATUV TARMOG'IDA YER OSTI SUVLARINING HISOBLANGAN PARAMETRLARI VA CHEGARAVIY SHARTLARINI GEOAXBOROT- MATEMATIK MODELASHTIRISH ASOSIDA ASOSLASH: NAZARIY TAHLIL

J.X. Djumanov

*t.f.d, Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari
universiteti professori*

G.D. Kabulova

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari
universiteti magistranti*

R.P. Jumabayev

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari
universiteti magistranti*

Annotatsiya

Maqolada kuzatuv tarmog'i asosida yer osti suvlari monitoringini yuritishning matematik modeli va gidrogeologik parametrlar hamda chegaraviy shartlarni geoaxborot-matematik modellashtirish orqali asoslash metodologiyasining nazariy asoslari tahlil etiladi. Ishning maqsadi — Darsi qonuni va yer osti suvlari oqimining differensial tenglamasi asosida suvli qatlam parametrlari (filtratsiya koeffitsienti, g'ovaklik, transmissivlik, zahira koeffitsienti) va chegaraviy shartlarining (Dirichlet, Neumann va Cauchy turlari) ilmiy-uslubiy asoslash prinsiplarini, shuningdek fazoviy ekstrapolyatsiyada Kriging geostatistik usulining qo'llanilishini yoritishdir. Maqolada inverse-masala shaklidagi parametrlarni kalibrlash yondashuvi, chegaraviy shartlarni geoaxborot qatlamlari asosida avtomatik tayinlash algoritmi hamda modellar ishonchliligini baholashning standart mezonlari (NRMSE, R^2 , Nash–Sutcliffe samaradorligi) nazariy jihatdan tahlil qilinadi. Yondashuv arid iqlimli mintaqalar uchun tatbiq etilishi mumkin bo'lgan uslubiy asos sifatida tavsif etiladi.

Kalit so'zlar: *kuzatuv tarmog'i, yer osti suvlari, matematik modellashtirish, Darsi qonuni, chegaraviy shartlar, Kriging, geoaxborot tizim, filtratsiya koeffitsienti, parametrlarni kalibrlash, Nash–Sutcliffe samaradorligi.*

1. Kirish

Yer osti suvlari tabiiy gidrologik tsiklning asosiy komponentlaridan biri bo'lib, ularning rejimi va sifatini ishonchli baholash uchun maxsus loyihalashtirilgan kuzatuv tarmoqlaridan foydalaniladi [1, 8]. Shu bilan birga, kuzatuv nuqtalari har doim cheklangan miqdorda bo'ladi: keng hududda ma'lumotlar faqat alohida quduqlardan olinadi va ularni butun suvli qatlam ustiga ekstrapolyatsiya qilish zaruriyati tug'iladi. Ushbu ekstrapolyatsiya sifati bevosita gidrogeologik parametrlarning — filtratsiya

koeffitsienti (K), g'ovaklik (n), transmissivlik (T) va zahira koeffitsienti (S) ning — qanchalik aniq asoslanganligiga bog'liq [1, 2].

Matematik modellashtirish yondashuvi Darsi qonuni va yer osti suvlari oqimining differensial tenglamasi asosida suvli qatlamdagi bosim taqsimotini, oqim yo'nalishini va massa balansini hisoblashga imkon beradi [1, 2, 3]. Biroq modelning ishonchliligi ikki omilga — parametrlarning to'g'ri aniqlanishiga va chegaraviy shartlarning mos tanlanishiga bog'liq. Chegaraviy shartlarning noto'g'ri qo'yilishi prognoz xatoligini bir necha baravarga oshirishi mumkin [3].

Geoaxborot tizimlari (GIS) matematik modellashtirish bilan integratsiyalashganda kuzatuv ma'lumotlarini fazoviy tahlil qilish, ma'muriy chegaralar, gidrografik tarmoq va litologik qatlamlarni hisobga olish hamda modelni kalibrlash uchun zamin yaratadi. Ushbu maqolaning maqsadi — kuzatuv tarmog'i asosida yer osti suvlari gidrogeologik parametrlarini va chegaraviy shartlarini geoaxborot-matematik modellashtirish orqali asoslash metodologiyasining nazariy asoslarini yoritish hamda uning mumkin bo'lgan uslubiy chegaralarini tahlil qilishdir.

2. Adabiyotlar tahlili

Yer osti suvlari oqimini matematik modellashtirishning nazariy poydevorini Darsi qonuni (1856) va uning umumlashgan differensial shakli tashkil etadi. Hubbert (1940) regional oqim tizimlari uchun bosim maydoni va ekvipotensial chiziqlar o'rtasidagi bog'liqlikni matematik tarzda ifodaladi, Tóth (1962) esa lokal, mintaqaviy va regional oqim tizimlari nazariyasini taklif etdi. Ushbu ishlar McDonald va Harbaugh tomonidan ishlab chiqilgan MODFLOW cheklangan ayirmalar modeli [2] uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi. Freeze va Cherry ning klassik monografiyasi [1] hozirda ham sohaning fundamental qo'llanmasi hisoblanadi.

Parametrlarni baholash masalasi (inverse problem) adabiyotda keng muhokama qilingan. Anderson, Woessner va Hunt ning "Applied Groundwater Modeling" qo'llanmasida zamonaviy kalibrlash usullari tizimlashtirilgan [3]. Geostatistik yondashuvlar Matheron tomonidan asoslanib, Krige [4] va keyin Cressie [5] tomonidan kengaytirilgan Kriging usuli fazoviy interpolyatsiyada standart vositaga aylangan. Isaaks va Srivastava [6] uning amaliy qo'llanilishini batafsil yoritgan. So'nggi o'n yillikda kuzatuv tarmoqlarini optimallashtirish bo'yicha Loáiciga va hamkasblari [8] yondashuvlarni tizimlashtirgan.

Chegaraviy shartlarni tanlash va asoslash bo'yicha Anderson va hamkasblari [3] uch asosiy turni — belgilangan bosh (Dirichlet), belgilangan oqim (Neumann) va aralash shart (Cauchy/Robin) — tavsiflaydi. Chegaraviy shartlarning tanlovi masalaning fizik ma'nosi va mavjud ma'lumotlarga bog'liq: daryo va ko'l chegaralarida odatda Dirichlet sharti, suv ajratuvchi chegaralarda — Neumann, infiltratsiya zonalarida — Cauchy sharti qo'llaniladi. GIS va matematik model birlashmasini Markaziy Osiyo, xususan, Amudaryo havzasi sharoitida Rakhmatullaev va hamkasblari [9] tahlil qilgan.

Gidrogeologik modellarni baholash bo'yicha xalqaro e'tirof etilgan mezonlarni Moriasi va hamkasblari [7] shakllantirgan.

3. Metodologik asoslar

3.1. Yer osti suvlari oqimining matematik modeli

Yer osti suvlari oqimining asosiy tenglamasi Darsi qonunining massa saqlanish qonuni bilan birlashishidan kelib chiqadi [1]. Bir jinsli izotrop muhitda bosim to'yingan zonadagi oqim uchun quyidagicha ifodalanadi:

$$\partial/\partial x(Kx \partial h/\partial x) + \partial/\partial y(Ky \partial h/\partial y) + \partial/\partial z(Kz \partial h/\partial z) + W = Ss \partial h/\partial t,$$

bu yerda h — gidravlik bosim (m); Kx , Ky , Kz — mos yo'nalishlardagi filtratsiya koeffitsientlari (m/kun); W — manba/ketma hol (1/kun); Ss — solishtirma zahira koeffitsienti (1/m); t — vaqt (kun). Turg'un rejim uchun tenglamaning o'ng tomoni nolga teng bo'ladi. Ikki o'lchamli soddalashtirishda (planli masala) tenglama transmissivlik $T = K \cdot b$ orqali yoziladi, bu yerda b — suvli qatlamning quvvati (m) [1, 3].

Modelning diskret ko'rinishini olish uchun cheklangan ayirmalar usuli qo'llaniladi [2]. Hudud to'r hujayralariga bo'linadi, har hujayrada bosh qiymati noaniq o'zgaruvchi sifatida qaraladi. Chegaraviy shartlar va manba hollari to'liq aniqlangandan so'ng chiziqli tenglamalar tizimi hosil bo'ladi, uni yechish natijasida butun hududdagi bosh maydoni topiladi. Murakkab geometriyali hududlar uchun cheklangan elementlar usuli yanada moslashuvchan yechim beradi [3].

3.2. Chegaraviy shartlarni asoslash

Modelda uch tur chegaraviy shart qo'llaniladi [3]. Birinchi tur — Dirichlet sharti — chegarada bosh qiymati berilgan: $h(x, y, t)|\Gamma_1 = h_0(x, y, t)$. Bu shart daryo, ko'l yoki suv omboriga tutash chegaralarda qo'llaniladi, bu yerda sirt suvlari sathi o'lchanadi va hisoblashga bevosita kiritiladi.

Ikkinchi tur — Neumann sharti — chegarada oqimning tashqi normal tashkiliysi berilgan: $-K \partial h/\partial n|\Gamma_2 = q(x, y, t)$. Bu shart suv ajratuvchi chegaralarda (oqim nolga teng, $q = 0$) yoki tabiiy buloqlarda ($q > 0$) qo'llaniladi. Uchinchi tur — Cauchy (Robin) sharti — oqim va bosh o'rtasida chiziqli bog'liqlik belgilaydi: $-K \partial h/\partial n|\Gamma_3 = \alpha(h - hR)$, bu yerda α — shartli o'tkazuvchanlik koeffitsienti, hR — tashqi muhit boshi. Bu shart infiltratsiya zonalari va daryo tagi orqali qayta zaryadlanuvchi chegaralar uchun mos [3].

Chegaraviy shartlarni geoaxborot qatlamlari asosida avtomatik tayinlash algoritmi quyidagi tartibda amalga oshirilishi mumkin. Birinchi qadamda GIS qatlamlari tahlil qilinadi: gidrografik tarmoq (daryolar, ko'llar), suv ajratuvchi chiziqlar, infiltratsiya zonalari va ma'muriy chegaralar aniqlanadi. Ikkinchi qadamda modelning to'r hujayralari bu qatlamlar bilan kesishishga ko'ra klassifikatsiyalanadi. Uchinchi qadamda har klass uchun mos shart turi (Dirichlet, Neumann, Cauchy) tayinlanadi. To'rtinchi qadamda kuzatuv quduqlaridan olingan oxirgi ma'lumotlar asosida shart parametrlari (h_0 , q , hR , α) kalibrlanadi. Bunday avtomatlashtirish mutaxassis mehnatini

tejaydi va loyihalar o'rtasida uslubiy izchillikni ta'minlaydi, biroq natija albatta ekspert tomonidan ko'rib chiqilishi zarur [3].

3.3. Kuzatuv tarmog'ini loyihalash tamoyillari

Kuzatuv tarmog'i to'rt asosiy talabdan kelib chiqib loyihalanaadi [8]: (i) hududning gidrogeologik xilma-xilligini yetarli qamrash; (ii) mavsumiy va uzoq muddatli tendensiyalami qayd etish uchun o'lchash chastotasining yetarliligi; (iii) kritik zonalardagi (suv olish inshootlari, ifloslanish manbalari) zichroq qamrov; (iv) iqtisodiy samaradorlik. Tarmoq optimallashtirish masalasi geostatistik yondashuvga asosan shunday tuzilishi mumkin: har yangi kuzatuv punkti maksimal axborot qiymatiga ega bo'lishi kerak, ya'ni uning qo'shilishi Kriging variansini maksimal kamaytirishi lozim [5, 6].

3.4. Parametrlarni geostatistik kalibrlash

Filtratsiya koeffitsienti (K) va zahira koeffitsienti (S) kuzatuv quduqlarida bevosita o'lchanishi qiyin — ular odatda nasos sinovi yoki laboratoriya tajribalari asosida aniqlanadi. Shu bilan birga, kuzatuv ma'lumotlari (sath o'zgarishi dinamikasi) matematik model orqali K va S ni bilvosita baholashga imkon beradi [1, 3]. Kalibrlashning inverse-masalasi quyidagi funksionalni minimallashtirishdan iborat:

$$\Phi(K, S) = \sum_i \sum_j [h_obs(x_i, t_j) - h_mod(x_i, t_j; K, S)]^2 \rightarrow min,$$

bu yerda h_obs — kuzatish natijalari, h_mod — model tomonidan hisoblangan qiymatlar. Minimallashtirish uchun Levenberg–Marquardt yoki Gauss–Newton gradient usullari qo'llaniladi [3]. Kalibrlashdan keyin olingan parametrlar fazoviy taqsimoti Kriging interpolyatsiyasi yordamida butun hududga kengaytiriladi [5, 6].

Kriging jarayoni uch bosqichdan iborat. Birinchi bosqich — empirik variogrammani hisoblash: $\hat{\gamma}(h) = 1/(2N(h)) \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$, bu yerda h — ikki nuqta oralig'ining lag masofasi, N(h) — shu lagdagi juftlar soni. Ikkinchi bosqich — nazariy model (sferik, eksponensial yoki Gauss) tanlash va uning parametrlarini (nugget c_0 , sill c, range a) eng kichik kvadratlar usulida sozlash. Uchinchi bosqich — har interpolyatsiya nuqtasi uchun og'irlik vektorini yechish va prognoz qiymati hamda Kriging variansini hisoblash [4, 5, 6]. Krigingning muhim afzalligi shundaki, u nafaqat prognoz qiymatini, balki uning ishonchlilik intervalini ham beradi — bu kuzatuv tarmog'ining keyingi kengayishi bo'yicha qaror qabul qilishda muhim, chunki yuqori Kriging variansli zonalar qo'shimcha kuzatuv nuqtalarini talab qiluvchi hududlar sifatida aniqlanishi mumkin [5].

3.5. Modelning samaradorligini baholash mezonlari

Kalibrlangan modelning ishonchliligi xalqaro amaliyotda qabul qilingan uch asosiy statistik mezon yordamida baholanadi [7]. Birinchi mezon — normallashtirilgan kvadratik o'rtacha xatolik (NRMSE):

$$NRMSE = \sqrt{((1/N) \sum (h_obs - h_mod)^2) / (h_max - h_min)};$$

NRMSE < 10% qoniqarli, < 5% yaxshi sifatli kalibrlashni bildiradi. Ikkinchi mezon — determinatsiya koeffitsienti (R^2), u kuzatuv va model qiymatlari o'rtasidagi chiziqli

bog'liqlikning kuchini ifodalaydi, 0,85 dan yuqori qiymatlar qoniqarli hisoblanadi. Uchinchi mezon — Nash–Sutcliffe samaradorligi (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum(h_{obs} - h_{mod})^2}{\sum(h_{obs} - \bar{h}_{obs})^2};$$

NSE > 0,75 juda yaxshi, 0,65–0,75 qoniqarli, < 0,50 qoniqarsiz natija deb baholanadi [7]. Bu uch mezonning birgalikda qo'llanilishi modelning statistik, kvantitativ va dispersion tavsiflarini to'liq qamrab oladi.

4. Muhokama va metodologik xulosalar

Taklif etilayotgan yondashuvning nazariy afzalligi uch jihatda ko'rinadi. Birinchidan, uch xil chegaraviy shartni (Dirichlet, Neumann, Cauchy) GIS qatlamlari bilan avtomatik bog'lash an'anaviy qo'lda tayinlashda uchraydigan ishchi xatoliklarni kamaytiradi va uslubiy izchillikni ta'minlaydi [3]. An'anaviy amaliyotda chegaraviy shartlar mutaxassis tomonidan qo'lda tanlanadi, bu esa ko'p vaqt talab qiladi va loyihadan loyihaga farqlarga olib keladi. Avtomatlashtirish bu jarayonni bir necha minutga qisqartiradi, biroq natijaning ekspert tomonidan tekshirilishi zarurligicha qolmoqda.

Ikkinchidan, inverse-masalani Levenberg–Marquardt usuli bilan yechishda kalibrlangan parametrlarning global minimumga emas, balki lokal minimumga yaqinlashishi xavfi mavjud. Shu sababli boshlang'ich qiymatlarni tanlashda ekspert bahosi va adabiyotdagi analog hududlar uchun e'lon qilingan parametr diapazonlariga tayanish tavsiya etiladi [1, 3]. Parametrlarning fazoviy taqsimotini qayta tuzishda Kriging standart usul hisoblansa-da, u fazoviy statsionarlik farazini talab qiladi; Amudaryo quyi oqimi kabi keskin gidrogeologik gradientga ega bo'lgan hududlarda [9] bu faraz to'liq bajarilmasligi mumkin — bunday holatlarda universal kriging yoki cokriging variantlarini qo'llash uslubiy jihatdan mos keladi [5, 6].

Uchinchidan, modelni baholash mezonlari (NRMSE, R², NSE) [7] ning birgalikda qo'llanilishi modelning turli jihatlarini qamrab oladi: NRMSE umumiy xatolik darajasini, R² chiziqli bog'liqlik kuchini, NSE esa model dispersion xususiyatlarini baholaydi. Bir mezonning o'zi kam axborotli bo'lishi mumkin — masalan, yuqori R² yuqori NSE ni kafolatlamaydi, shuning uchun mezonlar majmuasidan foydalanish uslubiy talab sifatida qaraladi.

Yondashuvning uslubiy cheklovlari ham qayd etilishi lozim. Cheklangan ayirmalar usuli murakkab geometriya yoki keskin parametrik o'zgarishlarga ega hududlarda cheklangan elementlar usulidan ustun ko'rsatkichlar bermaydi. Kriging faqat fazoviy, ammo vaqt qatori komponentini qamrab olmaydi — vaqt-fazoviy Kriging yoki aralash yondashuvlar ko'proq ahamiyat kasb etmoqda. Shuningdek, inverse-masala yechimi bir qiymatli emas va turli parametr kombinatsiyalari o'xshash natijaga olib kelishi mumkin (ekvivalentlik muammosi), bu esa qo'shimcha dala tekshiruv va nasos sinovlari orqali tasdiqlashni talab qiladi [1, 3].

5. Xulosa

Ushbu maqolada kuzatuv tarmog'ida yer osti suvlari monitoringini yuritishning geoaxborot-matematik modellashtirish asosidagi metodologiyasining nazariy asoslari tahlil etildi. Darsi qonuni va yer osti suvlari oqimining differensial tenglamasi cheklangan ayirmalar usulida diskretlashtirilishi, Dirichlet, Neumann va Cauchy chegaraviy shartlarini GIS qatlamlari asosida avtomatik tayinlash tamoyillari, filtratsiya koeffitsienti va zahira koeffitsientini Levenberg–Marquardt usuli bilan kalibrlash yondashuvi, fazoviy ekstrapolyatsiyaning Kriging interpolyatsiyasi bilan amalga oshirilishi va modellar ishonchliligining NRMSE, R^2 , NSE mezonlari orqali baholanishi batafsil tavsiflandi. Yondashuvning uslubiy afzalliklari va chegaralari aniqlandi. Tahlil arid iqlimli mintaqalar uchun uslubiy asos sifatida xizmat qilishi mumkin; keyingi tadqiqotlarda cokriging, cheklangan elementlar usuli hamda mashinani o'rganish asosidagi surrogat-modellar bilan metodologiyani kengaytirish maqsadga muvofiq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1]. Freeze R.A., Cherry J.A. Groundwater. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1979. — 604 p.
- [2]. McDonald M.G., Harbaugh A.W. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. — Reston, VA: USGS, 1988. — 586 p.
- [3]. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. — 2nd ed. — London: Academic Press, 2015. — 564 p.
- [4]. Krige D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. — 1951. — Vol. 52. — P. 119–139.
- [5]. Cressie N. Statistics for Spatial Data. — Revised ed. — New York: Wiley, 1993. — 900 p.
- [6]. Isaaks E.H., Srivastava R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. — New York: Oxford University Press, 1989. — 561 p.
- [7]. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. — 2007. — Vol. 50, No. 3. — P. 885–900.
- [8]. Loáiciga H.A., Charbeneau R.J., Everett L.G., Fogg G.E., Hobbs B.F., Rouhani S. Review of ground-water quality monitoring network design // Journal of Hydraulic Engineering. — 1992. — Vol. 118, No. 1. — P. 11–37.
- [9]. Rakhmatullaev S., Huneau F., Kazbekov J., Le Coustumer P., Jumanov J., El Oifi B., Motelica-Heino M., Hrkal Z. Groundwater resources use and management in the Amu Darya River Basin (Central Asia) // Environmental Earth Sciences. — 2010. — Vol. 59, No. 6. — P. 1183–1193.
- [10]. Fitts C.R. Groundwater Science. — 2nd ed. — Amsterdam: Academic Press, 2012. — 672 p.