

YER OSTI SUVLARI DINAMIKASINING SUG'ORISH JARAYONLARI TA'SIRIDA MATEMATIK MODELLASHTIRILISHI VA SONLI TAHLILI

Baxtiyor Murodullayev^{1,2}, Dilobar Haqnazarova², Jahongir To'raqulov^{1,2},
Tadjixodjayeva Elvira Rashidovna¹

¹ Toshkent xalqaro ta'lim universiteti, 100207, Tuzel-2, 17A, Toshkent, O'zbekiston.

² Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti, 100125, Bo'z-2, 17A, Toshkent, O'zbekiston.

Bmurodullayev1114@gmail.com

DOI: 10.61587/mmit.tiue.uz.v1i1.386

Annotatsiya. Mazkur maqolada matematik modellashtirish usullari asosida sug'orish jarayonlari ta'sirida yer osti suvlari holatida yuz beradigan dinamik o'zgarishlar tadqiq etilgan. Taklif qilingan model suv oqimlarining konvektiv va diffuzion harakatlarini inobatga olgan holda sizot suvlarining tezlik maydonlari hamda konsentratsiya taqsimotini aniqlash imkoniyatini yaratadi. Modelni shakllantirish jarayonida suvning sho'rlanish darajasi, harorat o'zgarishlari va tuproqning namlik bilan to'yinganlik holati kabi asosiy fizik omillarning o'zaro bog'liqligi ham hisobga olingan. Shu asosda muhitning suv o'tkazuvchanlik koeffitsiyentini aniqlash mexanizmi yanada takomillashtirilib, modelning aniqlik darajasi va hisoblash barqarorligi oshirilgan. Bundan tashqari, ishlab chiqilgan matematik modelning sonli yechimlari sug'orish tizimlarini samarali boshqarish, suv resurslaridan unumli foydalanish hamda ularni optimal ravishda taqsimlash uchun muhim amaliy ahamiyat kasb etadi. Tadqiqot natijalari meliorativ holatni yaxshilash, ekologik muvozanatni saqlash va agrotexnik tadbirlarni samarali rejalashtirish jarayonlarida qo'llanishi mumkinligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: yer osti suvlari sathi, sug'orish suvlari, adveksiya-diffuziya tenglamasi, diskretlash, iteratsiya

MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER DYNAMICS UNDER THE INFLUENCE OF IRRIGATION PROCESSES

Baxtiyor Murodullayev^{1,2}[0000-0001-9796-7522], Dilobar Haqnazarova²[0000-0002-0546-2285], Jahongir To'raqulov^{1,2}[0000-0002-6184-0340], Tadjixodjayeva Elvira Rashidovna¹

¹ Tashkent International University of Education, 17A Tuzel-2, Tashkent 100207, Uzbekistan.

² Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence, 17A Bo'z-2, Tashkent 100125, Uzbekistan.
Bmurodullayev1114@gmail.com

Abstract. This article investigates dynamic changes in groundwater conditions under the influence of irrigation processes using mathematical modeling methods. The proposed model makes it possible to determine groundwater velocity fields and concentration distributions while taking into account convective and diffusive water transport. During model development, the interrelationship of key physical factors, including water salinity, temperature variations, and the degree of soil moisture saturation, was also considered. On this basis, the mechanism for determining the hydraulic conductivity coefficient of the medium was improved, thereby increasing the accuracy and computational stability of the model. In addition, the numerical solutions of the developed mathematical model have important practical significance for the efficient management of irrigation systems, rational use of water resources, and their optimal allocation. The results show that the model can be applied to improve land reclamation conditions, maintain ecological balance, and effectively plan agrotechnical measures.

Keywords: groundwater level, irrigation water, advection-diffusion equation, discretization, iteration

Kirish

So'nggi yillarda qishloq xo'jaligida suv resurslari tanqisligi va ularni boshqarish global miqyosdagi dolzarb muammolardan biriga aylandi. Sug'oriladigan maydonlarda suvdan samarali foydalanish nafaqat qishloq xo'jaligi ekinlari hosildorligini belgilashda, balki yer osti suvlarining holatini va ularning tabiiy muvozanatini saqlashda ham muhim rol o'ynaydi. Yer osti suvlarining sathi, oqim yo'nalishi va tarkibining o'zgarishi ko'p jihatdan sug'orish tizimi rejimiga, geofiltratsiya xususiyatlariga hamda tabiiy iqlim sharoitlariga bog'liq. Sug'orish natijasida tuproq qatlamlarida suvning harakati, namlikning to'yinish darajasi va sho'rlanish jarayonlari o'zaro murakkab bog'liqlikda kechadi. Matematik modellash tirish yondashuvi ushbu jarayonlarni aniqlash, ularning vaqt va makonda o'zgarish qonuniyatlarini tahlil qilishda samarali vosita bo'lib xizmat qiladi. Bunday modellar yordamida suv oqimining konveksiya va diffuziya jarayonlarini hisobga olgan holda yer osti suvlari dinamikasini aniqlash, ularning sathidagi o'zgarishlarni bashorat qilish va boshqarish jarayonlarini optimallashtirish mumkin bo'ladi.

Mazkur tadqiqotda Eronning Xuziston viloyatida joylashgan sug'oriladigan maydonlarning sho'rlanish muammosi tahlil qilingan. Tadqiqotda sug'orish va yer osti suvlarini drenajlash natijasida hosil bo'lgan tuproq va suv sho'rlanishining suv resurslarini boshqarishga ta'siri o'rganildi. Jumladan, sho'rlanish va bug'lanish havzalarining suv balansiga (oqim va oqim chegaralari) ta'siri baholandi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, suv resurslarini boshqarish samaradorligining pastligi, drenaj tizimlarini loyihalashning sifatsizligi, baliqchilik xo'jaliklarining jadal sur'atlar bilan kengayishi asosiy muammolar sifatida qayd etilgan. Mualliflar sho'rlanishni nazorat qilish, baliqchilikda suv almashinuvining qat'iy me'yorlarini joriy etish va yer osti suvlarini boshqarishni takomillashtirish zarurligini ta'kidladilar [1-2].

Ushbu tadqiqotda turli sug'orish me'yorlari va yer osti drenajlarining tuproq namligi, sho'rlanishi, sizot suvlari sathi va hosildorlikka ta'siri o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, drenajli maydonlarda sizot suvlari sathi nazorat maydonlariga nisbatan 0,15-0,25 m chuqurlikda bo'lgan. SD tizimi yer osti suvlarini tezda tartibga soldi va tuproq namligini barqarorlashtirdi. Ekishdan oldin sug'orish va drenajlashning birgalikdagi ta'siri kungaboqar yetishtirish uchun eng qulay namlik va sho'rlanish sharoitlarini yaratdi [3-4].

Ushbu maqolada intensiv sug'orma dehqonchilikning gidrologik siklga ta'siri va uning uzoq muddatli ekologik oqibatlarini tahlil qilingan. Asosiy e'tibor sizot suvlarining sug'oriladigan suv o'tkazuvchan tuproqlardan to'yinishi jarayonida sho'rlanishning asta-sekin ortib borishiga qaratiladi. Tadqiqotda ta'kidlanishicha, ushbu hodisa suv resurslarini boshqarish va qishloq xo'jaligi fanlari sohasida yetarli darajada o'rganilmagan. Mualliflar yer osti suvlari sho'rlanishining shakllanishini ilmiy tahlil qilib, ushbu jarayonning keskinligiga ta'sir etuvchi asosiy omillarni aniqladilar. Ta'kidlanishicha, bu jarayon nazoratsiz qoldirilsa, oxir-oqibatda sug'orish uchun ishlatiladigan quduq suvining sho'rlanishiga, qishloq xo'jaligi mahsuldorligining pasayishiga va hatto ekin maydonlarining tashlab ketilishiga olib kelishi mumkin [5].

Ushbu tadqiqot yer osti suvlariga bog'liq bo'lgan hududlarda suv ta'minoti va talabi o'rtasidagi nomutanosiblikni bartaraf etishda boshqariladigan drenaj va yer osti sug'orish tizimlarining samaradorligini o'rganadi. Model yordamida drenaj va yer osti sug'orish tizimidagi suv oqimi tezligi, shuningdek, nazorat qudug'idagi suv sathi dinamik modellash tirildi - bu avvalgi modellash tirish usullariga nisbatan sezilarli yutuqdir. Modellash tirishlar shuni ko'rsatdiki, qurg'oqchil yillarda o'simliklarning transpiratsiyasi pastki qatlamlarning gidravlik qarshiligiga qarab 38-206 mm ga oshgan. Bundan tashqari, talab qilinadigan suv hajmi ham katta bo'lishi, ya'ni 664 dan 728 mm gacha bo'lishi mumkinligi ko'rsatildi [6].

Ushbu tadqiqotda sug'orish manbai (yer usti yoki yer osti suvlari) va sug'orish usuli (tomchilatib, yomg'irlatib yoki bostirib sug'orish) hisobga olingan yangi sug'orish moduli

ACME yer modeli (ALM) tizimiga kiritildi. Ushbu modifikatsiyadan foydalangan holda dunyo miqyosida sug'orishning yer usti suv balansi, suv tanqisligi va suvdan foydalanish samaradorligiga ta'sirini o'rganish bo'yicha raqamli tajribalar o'tkazildi. Barcha simulyatsiyalar bir xil tuproq namligi maqsadi bilan belgilangan bo'lib, ma'lumotlar global sug'orish statistikasi bilan cheklangan [7-8].

Ushbu maqolada ta'kidlanishicha, XX asr davomida suvdan foydalanish aholining o'sish sur'atlarini ikki barobarga oshirdi va hozirda ko'plab hududlarda suvga bo'lgan umumiy talab mavjud resurslardan yuqori. FAO ekspertlar maslahati asosida suv tanqisligi sharoitida oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlashga yordam beradigan konseptual modelni ishlab chiqdi. Maqolada suv resurslarini boshqarishning siyosiy va texnik yechimlari tahlil qilingan hamda suv tanqisligi sharoitida oziq-ovqat xavfsizligi bo'yicha samarali siyosatni shakllantirishning asosiy tamoyillari belgilangan ushbu model taqdim etilgan [9-10].

Yuqorida keltirilgan ilmiy ishlarda suv resurslarini boshqarish, sho'rlanish jarayonlari, irrigatsiya va drenaj tizimlarining samaradorligi, shuningdek, dunyo miqyosida suv tanqisligi va oziq-ovqat xavfsizligi masalalari turli nuqtayi nazardan chuqur tahlil qilingan. Biroq, ushbu tadqiqotlarda sug'oriladigan maydonlarda sug'orish rejimi va zovur suv olishining o'zgarishi natijasida yer osti suvlari sathi va meliorativ holatining dinamik o'zgarishlari to'liq o'rganilmagan.

Masalaning qo'yilishi va sonli yechimi

Sug'oriladigan maydonlar uchun tuproq xossalari, yog'in-sochin, infiltratsiya, harorat va sho'rlanish darajasi to'g'risidagi ma'lumotlarni to'plovchi va avtomatik yangilash imkonini beruvchi axborot tizimi ishlab chiqildi. Ushbu ma'lumotlar asosida muhitning o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti aniqlandi va Darsi qonuni yordamida oqim tezligi hisoblandi. So'ngra sug'orish suvlarining yer osti harakati va suv sathining o'zgarishi konveksiya-diffuziya tenglamasi yordamida modellashtirildi. Hisoblashlarda aniq chekli ayirmali sxema va CFL turg'unlik sharti qo'llanilib, vaqtning o'zgaruvchan qadamlari yordamida natijalarning turg'unligi ta'minlandi. Shu asosda sug'oriladigan yerlarda geofiltratsiya jarayonini ifodalovchi matematik model va sonli yechim taklif etildi.

Muhitdagi suv harakati va to'yingan qatlamdagi suv sathini aniqlash uchun Darsi qonuniga asoslangan adveksiya-diffuziya va bosim taqsimoti tenglamalaridan foydalaniladi, ular quyidagi ko'rinishda taqdim etiladi [11]:

$$\left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) (1-H) + \delta Q = \frac{\partial C}{\partial t} + \left(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) (1-H),$$

(1)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho g} + z \right) \right) = \frac{\partial P}{\partial t} \frac{S_{save}}{\rho g}. \quad (2)$$

Sug'oriladigan maydonlarda aeratsiya zonasining fizik-meliorativ xususiyatlarini hisobga olgan holda geofiltratsiya jarayoni matematik modelining sonli yechimi keltirilgan. (1) tenglama vaqt va fazoviy koordinatalar bo'yicha oshkor chekli ayirmali sxema yordamida diskretlangan. Umumiy adveksiya-diffuziya tenglamasining diskretlanish jarayoni quyidagicha ifodalanadi [11-12]:

$$\begin{aligned} & \left(-u_{i,j,k}^n \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} - v_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} - \right. \\ & \left. -w_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} + D_x \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \right. \\ & \left. + D_y \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + D_z \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \\ & = \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t^n}, \end{aligned} \quad (1 - H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n)) + Q_{C_{i,j,k}}^n = (3)$$

(3) tenglama yordamida umumiy diskretlangan tenglamani ma'lum va noma'lum hadlarga ajratib, uning iteratsion yechimini olamiz.

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^n + \\ + \Delta t^n \left(H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n) - 1 \right) \left(u_{i,j,k}^n \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} + w_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} - \right. \\ \left. - D \left(\frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \right) + Q_{C_{i,j,k}}^n. \end{aligned}$$

(2) tenglamadan foydalanib, bosimning har bir komponentini vaqt va fazo bo'yicha diskretlangan tenglamaga kiritamiz.

$$\begin{aligned} & \frac{S_{save}}{\rho g} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t^n} = \frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left(\frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} - \\ & - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left(\frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + \\ & + Q_{C_{i,j,k}}^n + Q_{Lz_{i,j,k}}^n. \end{aligned} \quad (4)$$

Yangi qadamdagi $P_{i,j,k}^{n+1}$ bosimni topish uchun (4) tenglamani qayta-qayta yozamiz:

$$\begin{aligned} P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t^n \rho g}{S_{save}} \left[\frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left(\frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left(\frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} + \right. \\ + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} - \\ - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \\ \left. - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left(\frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + W_{C_{i,j,k}}^n + W_{Lz_{i,j,k}}^n \right] \end{aligned}$$

Taklif etilgan masala uchun iteratsiya usuli yordamida approksimatsiyalash quyidagi shart bo'yicha tekshiriladi.

$$\max |C^{r+1} - C^r| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = 0.001$$

bu yerda: r - iteratsiyalar soni, ε - iteratsion jarayonning aniqligi (0,001).

Natijalar va muhokama

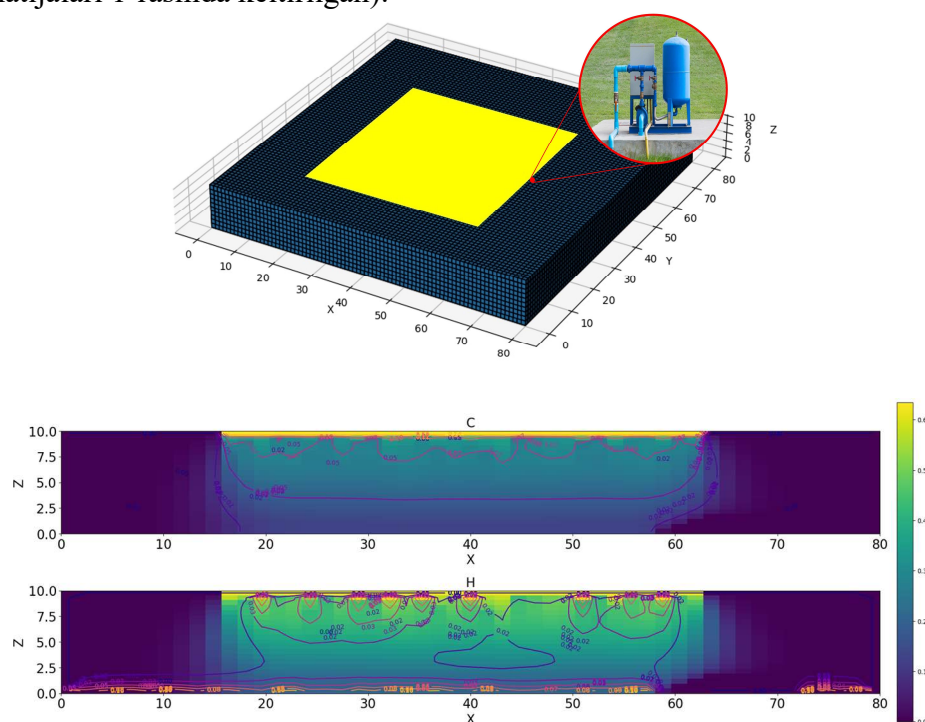
Hisoblash jarayonida geofiltratsiya jarayonlarini modellashtirishda yuqori samaradorlik va soddalikni ta'minlovchi aniq chekli ayirmali sxemadan foydalanildi. Ushbu yondashuvning afzalligi shundaki, u hisoblash algoritmini soddalashtiradi, ammo natijalarning aniqligini saqlab qoladi. Ayniqsa, takroriy ekin maydonlarida aeratsiya zonasida vaqt bo'yicha suvning harakatini modellashtirishda ushbu sxema barqaror va moslashuvchan yechimlarni ta'minlaydi.

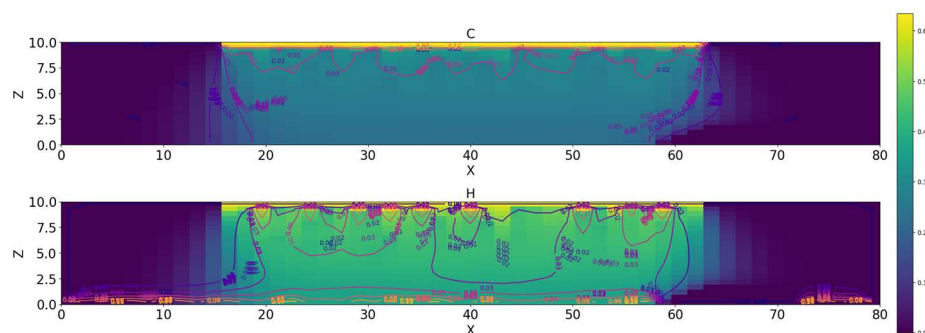
Modelning ishonchliligini ta'minlash uchun sxemaning barqaror ishlashi muhimdir. Shuning uchun hisoblash jarayonida Kurant-Fridrix-Li shartiga (KFL) qat'iy rioya qilinadi. Bu shart vaqt qadami va fazoviy o'lchamning mos kelishini ta'minlaydi, bu esa pirovard natijada yechimlarning barqarorligi va fizik haqiqiylikni kafolatlaydi.

Bundan tashqari, modellashtirishda o'zgaruvchan vaqt qadamlaridan foydalanish jarayon dinamikasini to'liqroq aks ettirish imkonini beradi. Bu esa suv oqimi tezligi, to'yinish darajasi va filtratsiya yo'nalishlarining o'zgarishini aniqroq hisobga olish imkonini beradi. Natijada hisoblash samaradorligi oshadi, model natijalari ishonchli va barqaror bo'ladi.

Umuman olganda, ushbu yondashuv takroriy ekinlar yetishtiriladigan hududlarda yer osti suvlari sathining o'zgarishini bashorat qilishda, shuningdek, geofiltratsiya jarayonlarini matematik tahlil qilishda yuqori aniqlik va barqarorlikni ta'minlaydi.

Yer osti suvlari harakati dinamikasini tahlil qilish, suv sathining o'zgarishini kuzatish va ularni bashorat qilish uchun ishlab chiqilgan matematik model va dasturiy ta'minotdan foydalangan holda zamonaviy elektron hisoblash tizimlarida sonli eksperimental hisob-kitoblar o'tkazildi[13]. Hisoblash natijalari H - suv sathi funksiyasi va C - konsentratsiya qiymatlari orasidagi bog'liqlikni aniqlash imkonini berdi. Bundan tashqari, modelning aniqligi amaliy konsentratsiya $C_{\max}$ qiymati bilan taqqoslash orqali baholandi. Sug'oriladigan maydonlarda yer osti suvlari harakatining takomillashtirilgan matematik modeli bo'yicha o'tkazilgan sonli tajribalar natijalari 1-rasmda keltirilgan):





1-rasm. Maydonga qisman sug'orish suvi berish va drenaj (nasos) orqali suv chiqarish.

Bu jarayon yer osti suvlarining sug'orish davridagi harakatini va ularning atrof-muhitda taqsimlanish dinamikasini aks ettiradi, bunda $Q_d = 0.05$ va $Q_c = 0.05$ kirish parametrlari sifatida qaraladi. Shu bilan birga, muhitga suv yutilishi va diffuziya jarayonlarining ta'siri tufayli vaqt o'tishi bilan konsentratsiya va to'yinish darajasi o'zgaradi.

Xulosa

Yuqoridagi tadqiqot natijalari asosida sug'orish jarayonlari ta'sirida yer osti suvlarining dinamik o'zgarishlarini modellashtirishning taklif etilgan matematik modeli samarali natijalar berishi aniqlandi. Suv oqimining konveksiya va diffuziya jarayonlari, shuningdek, sho'rlanish, harorat va tuproq namligi kabi fizik omillar hisobga olinganligi sababli modelning aniqligi va hisoblash barqarorligi oshdi. Raqamli yechimlar suv sathi va konsentratsiyasining taqsimlanishidagi vaqt bo'yicha o'zgarishlarni ishonchli aks ettiradi, bu esa sug'orish tizimlarini samarali boshqarish va suv resurslaridan oqilona foydalanish imkonini beradi. Shuningdek, model yerlarning meliorativ holatini yaxshilash, ekologik barqarorlikni ta'minlash, agrotexnik tadbirlarni samarali rejalashtirishda ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

Adabiyotlar

1. Mao, D., Riesbeck, F., Khodabakhshi, H.R., Mahjoobi, A.: The impacts of irrigation and groundwater drainage induced salinity and overflooding of evaporation ponds in Khuzestan, Iran. *Frontiers in Water* 7, 1266089 (2025).
2. Karimov, R.S., Rustamov, H.Sh., Atoev, D.D., Shirinov, Z.Z.: Construction of an optimal explicit difference formula in the Hilbert space. *International Journal of Analysis and Applications* 23, 335 (2025).
3. Liu, J., Huang, Q., Hou, Z., Zhu, X., Xue, F., Huang, G.: Effects of subsurface drainage and year-round irrigation on crop water-salt stress and yield in an arid region. *Agricultural Water Management* 312, 109406 (2025). doi: 10.1016/J.AGWAT.2025.109406.
4. Babaev, S.S., Olimov, N., Imomova, Sh., Kuvvatov, B.: Construction of natural spline in space. In: *AIP Conference Proceedings*, vol. 3004, 060021. AIP Publishing (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0199595>.
5. Foster, S., Pulido-Bosch, A., Vallejos, Á., Molina, L., Llop, A., MacDonald, A.M.: Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions. *Hydrogeology Journal* 26(8), 2781–2791 (2018).
6. de Wit, J.A., et al.: Hydrological consequences of controlled drainage with subirrigation. *Journal of Hydrology* 628, 130432 (2024), doi: 10.1016/J.JHYDROL.2023.130432.
7. Leng, G., Leung, L.R., Huang, M.: Significant impacts of irrigation water sources and methods on modeling irrigation effects in the ACME land model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 9(3), 1665–1683 (2017).

8. Jalolov, I.I., Jalolov, O.I.: An algorithm for constructing the Fourier transform of the function to determine a discrete analog of a differential operator. *Russian Mathematics* 68(12), 45–56 (2024).
9. FAO: Coping with Water Scarcity: An Action Framework for Agriculture and Food Security. FAO Water Report No. 38. FAO, Rome (2012).
10. Khayatov, Kh.U.: On finding the norm of the error functional of interpolation formulas in the Sobolev space of periodic functions. In: *AIP Conference Proceedings*, vol. 3004, 060047. AIP Publishing (2024)., <https://doi.org/10.1063/5.0199928>
11. Kurbonov, N.M., Khaknazarova, D.O., Murodullaev, B.T.: Mathematical modeling of groundwater filtration processes for monitoring and forecasting salt concentration in irrigated areas. *Problems of Computational and Applied Mathematics* 2/2(66), 109–118 (2025).
12. Shafiev, T., et al.: Creation of an information and analytical database based on an intelligent analysis system from online services for monitoring and forecasting the environmental condition of industrial areas. In: *Fourth International Conference on Optics, Computer Applications, and Materials Science (CMSD-IV 2024)*, SPIE Proceedings, vol. 13651, pp. 216–221. SPIE, Bellingham (2025).
13. Eshankulov, K., Shafiev, T., Bakaev, I., Nazarov, S.: Architecture and data structures of the information monitoring and decision-making software suite for business intelligence. In: *Proceedings of SPIE*, vol. 13651, 1365107. SPIE, Bellingham (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3061943>