# TUPROQDAGI KUCHSIZ SUV-TUZ QAYTA TA’SIRINING AMALIY IDENTIFIKATSIYALANUVCHANLIGI: MODEL SEZGIRLIGI VA KUZATUV DIZAYNI

*Mo‘minov Soxibjan Yunusovich[1], Sobirov Asadbek Umidbekovich[1], Bekpulatov Javlonbek Xamid o'g'li[1]*

*[1]Ma’mun universiteti, Xiva 220900, O‘zbekiston*
*E-mail: sokhibjan.muminov@mamunedu.uz, sobirov.a@mamunedu.uz, bekpulatov.j@mamunedu.uz*

*K E Y W O R D S*

amaliy identifikatsiyalanuvchanlik; suv-tuz transporti; Richards tenglamasi; model sezgirligi; kuzatuv dizayni; profil ehtimollik; elektr o‘tkazuvchanlik

*A B S T R A C T*

Tuproqdagi suv-tuz qayta ta’sirini kuzatuvlardan aniqlash imkoniyati model sezgirligi va o‘lchash usuliga bog‘liq. Ishda ushbu bog‘liqlik 0,60 m chuqurlikdagi bir jinsli, o‘simliksiz tuproq ustuni uchun tekshirildi. Richards va adveksiya-dispersiya tenglamalariga konsentratsiya gradientidan kelib chiqadigan sinov hadi qo‘shildi. Hisoblarda Orolbo‘yining 2018-yil yozgi meteorologik qatori va Kelvin tenglamasidan olingan kritik sirt bosim balandligi ishlatildi. Chekli hajmlar yechimining to‘r, vaqt integratori va ichki o‘tkazuvchanlikni o‘rtachalash usuliga sezgirligi baholandi. Asosiy ssenariyda 320 katakli to‘rda o‘rtacha konsentratsiya 6,97% ga ortdi; uning logarifmik o‘zgarishining 69,7% i suv zaxirasining kamayishi bilan bog‘liq. Tuz zaxirasi 0-60 sm ustunda 2,06%, 0-30 sm qatlamda 7,03% ga ortdi. Parametrni baholash uchun 160 katakli model asosida har bir dizaynda 500 tadan, jami 20 000 ta sintetik baholash bajarildi. Uchastka xatosi sanalar bo‘yicha o‘zgarmas va yordamchi fizik parametrlar ma’lum bo‘lgan sharoitda EC proksisi s = 0 gipotezasini tegishli qatlamlarda 14,2% va 76,6% hollarda rad etdi; ustun bo‘yicha konsentratsiya va suv zaxirasi birgalikda kuzatilganda bu ulush 79,2% bo‘ldi. Biroq profil intervallari qayta ta’sir kattaligini aniq baholash uchun kengligicha qoldi. Natijalar tanlangan model va xato tuzilishiga shartlangan; ular dala validatsiyasi yoki optimal namuna chuqurligining isboti emas.

## 1. Kirish

Orolbo‘yi sug‘oriladigan tuproqlaridagi sho‘rlanishni tahlil qilishda suv oqimi, tuz tashilishi va kuzatuv usulini birgalikda ko‘rib chiqish zarur. Forkutsa va hammualliflar Xorazmdagi g‘o‘za dalalari uchun HYDRUS-1D yordamida suv va tuz dinamikasini modellashtirib, sayoz sizot suvlarining mavsumiy balansdagi rolini ko‘rsatgan [1, 2]. Ushbu ishda esa dala balansini qayta tiklash emas, modelga kiritilgan kuchsiz qo‘shimcha bog‘lanishni cheklangan kuzatuvlardan aniqlash masalasi o‘rganiladi.

Mintaqaviy kuzatuvlar mualliflarning avvalgi ishlarida ham ko‘rib chiqilgan. Ellikqal’a tumani bo‘yicha tadqiqotda sho‘rlanish va iqlim ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi bog‘lanish tahlil qilingan [5]; GAT asosidagi boshqa ishda NDVI, yog‘in, harorat va tuproq namligi birgalikda qaralgan [9]. Sentinel-2 hamda Random Forest va XGBoost orqali sho‘rlanishni kuzatish yondashuvi alohida tezisda taklif etilgan [20]. Bu ishlar hududiy monitoring masalasini belgilaydi, lekin ular mazkur modeldagi s parametrining kalibratsiyasi yoki hozirgi sintetik natijalarning dala tasdig‘i emas.

Tuzning suv harakatiga ta’siri bir xil mexanizm bilan cheklanmaydi. Suv faolligining pasayishi va sirt tuz qobig‘i bug‘lanishni kamaytirishi mumkin [3, 4]. Kimyoviy osmos esa membrana xossasiga ega zichlangan gillarda o‘rganilgan [5]. Mazkur hisobiy qumoq tuproq uchun membrana samaradorligi o‘lchanmagan. Shu sababli konsentratsiya gradientiga bog‘liq had tekshiriladigan sinov ta’siri sifatida kiritiladi; uning mavjudligi yoki tanlangan kattaligi dala sharoiti uchun tasdiqlangan deb olinmaydi.

Divergent kross-diffuziya sistemasining avtomodel yechimlari va kompakt tayanchi mualliflarning nazariy tezisida o‘rganilgan [12]. U yerdagi degeneratsiyalangan sistema bilan bu yerda qo‘llangan Richards-adveksiya-dispersiya modeli bir xil emas. Shu sababli avtomodel va

(cc) BY 

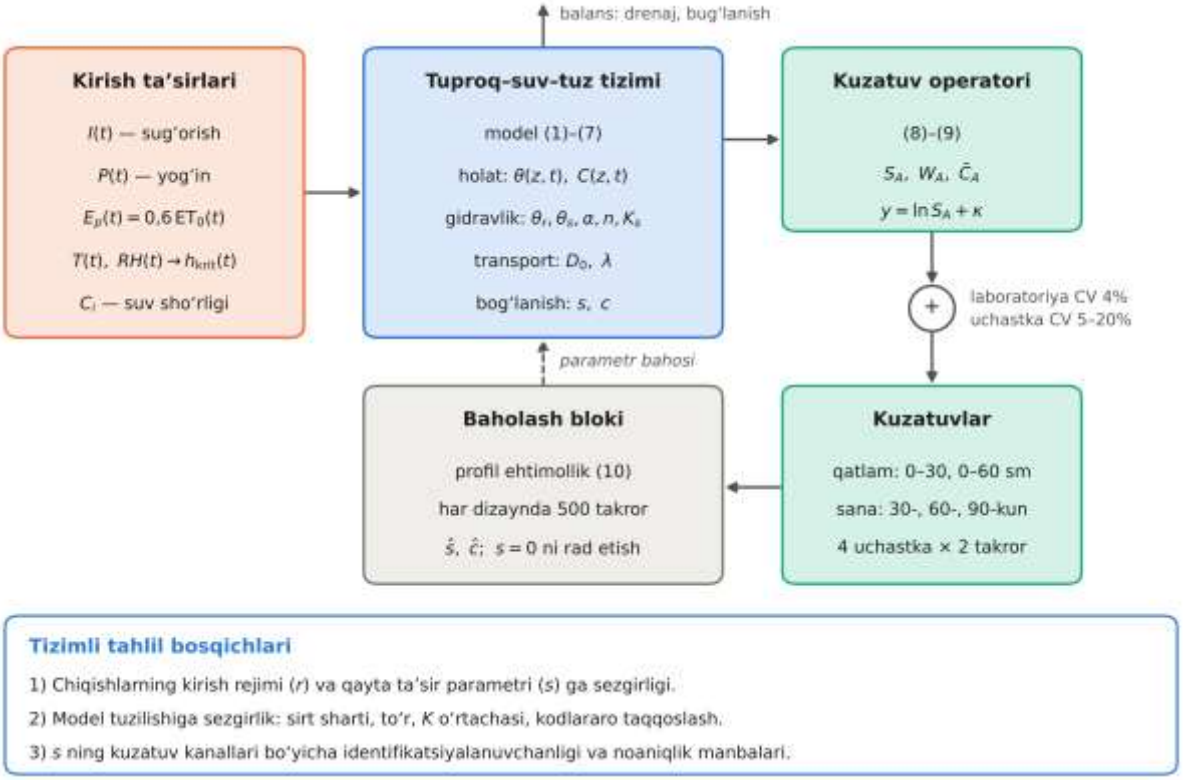
kompakt tayanch xossalari ushbu hisobiy ustun uchun dalil sifatida ishlatilmaydi; bu ishning predmeti oldindan belgilangan qo‘shimcha hadni kuzatuvlardan ajratishdir.

Standart ekstraktning elektr o‘tkazuvchanligi (EC) bilan g‘ovak suvi konsentratsiyasi bir xil kuzatuv emas. Bir xil quruq massa, ekstraksiya va kalibratsiya sharoitida EC proksisi tuz zaxirasiga bog‘lanadi, g‘ovak suvi konsentratsiyasi esa suv kamayganda ham ortadi. Ishning maqsadi - shu farqni hisobga olib, qayta ta’sir parametrining cheklangan va xatoli kuzatuvlardan baholanish imkoniyatini aniqlash. Bu yerda amaliy identifikatsiyalanuvchanlik profil intervallari orqali baholanadi [15]; strukturaviy identifikatsiyalanuvchanlik haqida teorema isbotlanmaydi. Qayta ta’sir yo‘qligi gipotezasini rad etish va parametr kattaligini aniq baholash alohida natijalar sifatida ko‘rib chiqiladi.

## 2. Materiallar va usullar

### 2.1. Tizimning tuzilishi

Modelga sug‘orish I(t), yog‘in P(t), potensial bug‘lanish $E_p(t)$, havo harorati va nisbiy namligi hamda sug‘orish suvi konsentratsiyasi $C_i$ kirish ta’sirlari sifatida beriladi (1-rasm). Holat $\theta(z, t)$ namlik va C(z, t) konsentratsiya profillari bilan ifodalanadi. Gidravlik parametrlar $\theta_r$, $\theta_s$, α, n, $K_s$ va l, transport parametrlari $D_0$ va λ, tekshiriladigan parametrlar esa s va c dan iborat. Kuzatuv operatori profillardan qatlam tuz zaxirasi $S_A$, suv zaxirasi $W_A$, namlik bilan vaznlangan o‘rtacha konsentratsiya $\bar{C}_A$ va EC proksisini hosil qiladi. Xatolar qo‘shilgan chiqishlar bo‘yicha s va c baholanadi; ularning aniqlanish darajasi profil intervallari bilan tekshiriladi.




***1-rasm.*** *Tuproq-suv-tuz modelining kirishlari, holati va kuzatuvlari: transport modeli (1)-(7), qatlam operatorlari (8)-(9), kuzatuv xatolari va parametrlarni baholash mezoni (10).*

### 2.2. Hisobiy ustun va kirish ta’sirlari

Hisoblashlar bir jinsli, o‘simliksiz va sirti ochiq, chuqurligi 0,60 m bo‘lgan tuproq ustuni uchun bajarildi. z koordinatasi pastga yo‘nalgan, pastki chegarada erkin drenaj sharti qo‘yildi. Boshlang‘ich namlik $\theta$ = 0,25 va konsentratsiya $C$ = 2 g/l barcha hisoblarda bir xil olindi. Sug‘orish har hafta 18$r$ mm miqdorida 13 marta beriladi; sug‘orish suvining sho‘rligi $C_i$ = 1 g/l, yog‘in suvi tuzsiz deb qabul qilindi. Sug‘orish miqyosi $r$ = 0; 0,33; 0,67 va 1 qiymatlarni oladi; $r$ = 1 holati

(cc) BY 

hisobiy ssenariy bo‘lib, agronomik sug‘orish me’yoriga mos kelishi shart emas.

Hisoblash davri 2018-yil 1-iyundan 29-avgustgacha bo‘lgan 90 kunni o‘z ichiga oladi. Meteorologik ma’lumotlar 42,304175° sh.k. va 61,550443° sh.u. nuqtasi uchun NASA POWER kunlik qatoridan olindi [10]. Havo harorati, nisbiy namlik, shamol tezligi, atmosfera bosimi va quyosh radiatsiyasi asosida FAO-56 usulida etalon evapotranspiratsiya $ET_0$ hisoblandi [19]; potensial bug‘lanish $E_p$ = 0,6 $ET_0$ ko‘rinishida olindi. Davr mobaynida $ET_0$ yig‘indisi 832,6 mm (o‘rtacha 9,25 mm/kun, eng katta qiymati 13,84 mm/kun), yog‘in miqdori 4,72 mm ni tashkil etdi. $r$ = 1 bo‘lganda sug‘orish hajmi 234 mm, ya’ni $ET_0$ ning 28,1% iga teng. Bu kattaliklar muayyan dala balansini emas, hisobiy ssenariyni tavsiflaydi. Tuproqning gidravlik va transport parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval.**

Modelning asosiy parametrlari

| Kattalik | Qiymat | Izoh |
|---|---|---|
| $\theta_r$; $\theta_s$ | 0,078; 0,430 | Carsel-Parrish [8], qumoq tuproq |
| α; n | 3,6 $m^{-1}$; 1,56 | Carsel-Parrish [8], qumoq tuproq |
| $K_s$; l | 0,2496 m/kun; 0,5 | Qumoq tuproq; Mualem modeli |
| $D_0$; λ | $10^{-4}$ $m^2$/kun; 0,01 m | Dispersiya ssenariysi |
| s (nazorat / sinov) | 0 / 0,01 | Juft hisoblar |
| N: asosiy / sintetik; tekshiruv | 320 / 160; 80-640 | To‘r va vaqt tekshiruvi |

Izoh: gidravlik parametrlar tuproq sinfi bo‘yicha o‘rtacha qiymatlar bo‘lib, mahalliy tuproq bo‘yicha kalibrlanmagan.

### 2.3. Tizimning matematik modeli

Bir o‘lchamli suv va tuz transporti saqlanish tenglamalari hamda oqim ifodalari bilan beriladi:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial z}=0,\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial J}{\partial z}=0,M=\theta C \quad (1)$$

$$q=K(h)\left(1-\frac{\partial h}{\partial z}+\beta\frac{\partial C}{\partial z}\right),J=qC-\theta D\frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

$$D=D_0+\frac{\lambda|q|}{\theta},\beta=s\frac{2RT}{M_{NaCl}\rho_w g} \quad (3)$$

Bu yerda θ - hajmiy namlik; h - matrik bosim balandligi (m); q - suv oqimi; M = θC - tuproq hajm birligidagi tuz massasi; C - eritma konsentratsiyasi (kg/$m^3$ va g/l son jihatdan teng); J - tuz oqimi; D - gidrodinamik dispersiya koeffitsiyenti. R - universal gaz doimiysi, T - absolyut harorat, $M_{NaCl}$ - NaCl molyar massasi, $\rho_w$ - suv zichligi, g - erkin tushish tezlanishi. Ideal suyultirilgan NaCl eritmasi uchun T = 298,15 K da β ≈ 8,651s m/(g/l). s o‘lchovsiz sinov koeffitsiyentidir: s = 0 odatiy Richards-transport modeliga, s = 0,01 esa tekshiriladigan qo‘shimcha ta’sirga mos keladi. s tuproqning o‘lchangan membrana yoki qaytarish koeffitsiyenti sifatida talqin qilinmaydi. Osmotik had ichki oqimlarga kiritilgan, sirtning yarim katagida esa hisobga olinmagan.

Namlik-bosim va gidravlik o‘tkazuvchanlik bog‘lanishlari van Genuchten-Mualem modeli bilan ifodalanadi [6, 7]:

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r},m=1-\frac{1}{n},h=-\frac{1}{\alpha}\left(S_e^{-1/m}-1\right)^{1/n} \quad (4)$$

Juft hisoblarda bir xil kirishlar, parametrlar va sonli sxema saqlanib, faqat s o‘zgartiriladi. Shu model doirasidagi farq qo‘shimcha hadning ta’sirini ajratadi.

### *2.4. Sirt chegarasi va sonli algoritm*

Bug‘lanishni cheklovchi kritik sirt bosim balandligi kunlik meteorologik qator va Kelvin tenglamasi orqali berildi [11]:

$$h_{krit}(t)=c\frac{RT_{havo}(t)}{M_w g}\ln\frac{RH(t)}{100} \quad (6)$$

Bu yerda $T_{havo}$ - havo harorati (K), $M_w$ - suv molyar massasi, RH - havoning nisbiy namligi (%), c - kritik bosim balandligini o‘zgartiruvchi o‘lchovsiz koeffitsiyent. Asosiy hisobda c = 1, sezgirlik tahlilida c ∈ [0,5; 2]. Kunlik $h_{krit}$ qiymatlari -31 691 m dan -8 718 m gacha o‘zgardi.

(cc) BY 

Kelvin munosabati fazalar potensiallarining muvozanatiga asoslangan; bu hisobda u sirtning o‘lchangan matrik bosimi sifatida emas, suyuq fazali oqimni cheklovchi shart sifatida ishlatiladi [21]. N = 160 to‘rda barcha r qiymatlari uchun -50, -500 va -5000 m doimiy chegaralar ham tekshirildi.

Quruq sirtda bug‘lanish oqimi *E* sirtdagi yarim katakda statsionar Darcy oqimi shartidan topiladi:

$$\frac{\Delta z}{2} = \int_{h_{krit}}^{h_i} \frac{K(h)}{K(h)+E}\,dh,\quad q_{quruq} = -E \qquad (7)$$

Bu yerda $h_i$ - sirtga eng yaqin katak bosim balandligi, Δz - katak qalinligi. Musbat E yechimi $h_i - h_{krit} > \Delta z/2$ bo‘lganda mavjud; aks holda E = 0 olinadi. Ho‘l sirtda h = 0 sharti qo‘llanadi. Atmosferadan berilgan P + I - $E_p$ oqimi tuproqning oqim o‘tkazish imkoniyati bilan cheklanadi. Haqiqiy infiltratsiya, bug‘lanish va tuz kirimi balansda hisoblanadi. Tuz sirt orqali sug‘orish suvi bilan kiradi va bug‘lanish oqimi bilan chiqib ketmaydi.

Ichki yuzalardagi o‘tkazuvchanlik garmonik o‘rtacha, advektiv tuz oqimi oqimga qarshi (upwind) sxema, dispersiv oqim esa markaziy ayirma orqali diskretlandi. Vaqt bo‘yicha adaptiv qadamli oshkor sxema ishlatildi. Tekshirilgan 40 ta asosiy hisobda θ va M uchun cheklagichlar faollashmadi. (3) ga ko‘ra, to‘r Peklet soni $Pe_\Delta = |q|\Delta z/(\theta D) \le \Delta z/\lambda$; N = 160 va 320 uchun 0,375 va 0,1875 qiymatlar uning yuqori chegaralaridir. Vaqt bo‘yicha tekshiruv bir xil fazoviy diskretlashni BDF integratori bilan N = 80, 160, 320 va 640 da yechish orqali bajarildi. Juft hisoblardagi skalyar ta’sir uchun Richardson ekstrapolyatsiyasi va GCI bahosi [14], ichki oqimlar uchun esa Kirchhoff integral o‘rtachasi bilan sezgirlik tekshiruvi [13] qo‘llandi.

### 2.5. Kuzatuv operatori va identifikatsiyalash tajribasi

A qatlamdagi tuz va suv zaxiralari hamda o‘rtacha konsentratsiya quyidagicha aniqlanadi:

$$S_A = \int_A M\,dz,\; W_A = \int_A \theta\,dz,\quad \bar{C}_A = \frac{S_A}{W_A} \qquad (8)$$

$$\Delta \ln \hat{C}_A = \Delta \ln S_A - \Delta \ln W_A \qquad (9)$$

Operatorlar A = 0-60 sm va A = 0-30 sm uchun alohida hisoblandi. (9) - konsentratsiyaning logarifmik o‘zgarishini tuz va suv zaxiralari hissalariga ajratuvchi algebraik ayniyat. $\bar{C}_A$ qatlam bo‘yicha namlik bilan vaznlangan kattalik; bitta chuqurlikdagi g‘ovak suvi namunasi uni to‘g‘ridan-to‘g‘ri ifodalamaydi.

Standart ekstrakt EC si uchun y = ln $S_A$ + κ proksi-operatori olindi. U bir xil quruq tuproq massasi, tuzning to‘liq ekstraksiyasi va ma’lum EC-tuz kalibratsiyasiga shartlangan. Logarifmlar tanlangan birliklardagi sonli qiymatlarga tegishli; EC kanalidagi o‘zgarmas normallashtirish κ ga singdiriladi. Operator o‘lchangan $EC_e$ yoki $EC_{1:5}$ qatorini almashtirmaydi. Ikki muqobil sintetik dizayn - ln $\bar{C}$ va ln $\bar{C}$ bilan ln W ning birgalikdagi kuzatuvi - ham tekshirildi.

Sintetik kuzatuvlar N = 160, r = 1, s = 0,01 va c = 1 hisobidan 30-, 60- va 90-kunlar uchun yaratildi. Dizaynda to‘rtta mustaqil uchastka va har bir sana hamda uchastka uchun ikkita laboratoriya takrori bor. Laboratoriya xatosining variatsiya koeffitsiyenti CV = 4%, uchastkalararo CV esa 5, 10 yoki 20% deb olindi. Logarifmik standart chetlanish $\sigma = [\ln(1 + CV^2)]^{1/2}$ orqali hisoblandi; formulaga CV kasr shaklida kiritiladi. Har bir uchastkaning ln S va ln W siljishlari uchala sanada o‘zgarmaydi; bu ikki siljish orasidagi korrelatsiya 0,5. ln $\bar{C}$ siljishi ularning ayirmasidan hosil qilinadi. Laboratoriya xatolari takror va kanallar bo‘yicha mustaqil deb olindi. Baholashda shu farazlardan kelib chiqadigan kovariatsiya matritsasi qo‘llandi:

$$\chi^2(s,c,\kappa) = \left[\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}(s,c) - \kappa\mathbf{1}\right]^T \mathbf{V}^{-1} \left[\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}(s,c) - \kappa\mathbf{1}\right] \qquad (10)$$

Bu yerda y - kuzatuvlar vektori, μ(s, c) - model javobi, V - qabul qilingan xato modelining ma’lum kovariatsiya matritsasi, 1 - birlar vektori. κ EC kalibratsiyasining umumiy siljishini ifodalaydi.

s ∈ [0; 0,02] va c ∈ [0,5; 2] birgalikda baholandi. Asosiy EC variantida κ ma’lum, alohida sezgirlik variantida esa noma’lum deb olindi. Har bir dizayn 500 marta takrorlandi; s = 0 nol nazoratlari bilan birga 40 ta dizayn bo‘yicha

(cc) BY dtai.uz

jami 20 000 ta baholash bajarildi. Model javobi 15 ta parametr nuqtasida tuzilgan jadvaldan interpolyatsiya qilindi va uchta qo‘shimcha nuqtada to‘g‘ridan-to‘g‘ri hisob bilan solishtirildi. Asosiy fizik hisoblar N = 320, statistik tajriba esa N = 160 da bajarildi.

s uchun nominal 95% profil intervali $\Delta\chi^2 = 3{,}84$ chegarasi bilan olindi [15]. Standart muntazamlik shartlarida bitta chegaraviy parametr uchun nol gipotezadagi statistikaning asimptotik taqsimoti $\chi^2_0$ va $\chi^2_1$ ning teng aralashmasidir [16]; bunda 3,84 chegara taxminan 2,5% bir tomonlama ahamiyatlilikka mos. c ning sust aniqlanishi va chekli kuzatuv hajmi sabab bu yaqinlashuvni avtomatik kafolat deb qabul qilmaymiz. Test xatti-harakati nol nazoratidagi rad etish ulushi va empirik qamrov bilan tavsiflanadi.

Parametr xatosi $\mathrm{RMSE}(s) = [(1/B)\,\Sigma_{b=1}^{B}(\hat{s}_b - s_{haq})^2]^{1/2}$ bilan ifodalanadi, bu yerda B = 500. Nolni rad etish ulushi aniqlik foizi emas, belgilangan $s_{haq}$ va xato modelidagi empirik test quvvatidir. Profil intervalining qidiruv chegaralarida to‘xtashi ma’lumotlar bilan aniqlangan statistik chegaradan farqlanadi.

### 2.6. Taqqoslash va sezgirlik mezonlari

Qayta ta’sirga sezgirlik r = 0; 0,33; 0,67; 1 rejimlarida s = 0 va s = 0,01 juft hisoblari bilan baholandi. Bu chekli farqlar tahlili bo‘lib, barcha parametrlarning global sezgirlik tahlili emas. Konsentratsiya farqi (9) yordamida zaxiralar hissalariga ajratildi. Chegaraviy shart va o‘tkazuvchanlikni o‘rtachalash variantlari model hamda diskretlashga sezgirlikni, to‘r va integrator taqqoslashlari esa sonli yechimning yaqinlashishi va usullar mosligini tekshirish uchun ishlatildi. Kuzatuv dizaynlari nol gipotezani rad etish ulushi, parametr xatosi va profil intervalining eni bo‘yicha solishtirildi.

## 3. Natijalar

### *3.1. Tizim chiqishlarining qayta ta’sirga sezgirligi*

90-kundagi juft hisoblar 2-jadvalda keltirilgan. Sinovdan o‘tgan to‘rtta sug‘orish rejimida qo‘shimcha hadning ta’siri r ortishi bilan kuchaydi.

**2-jadval.**

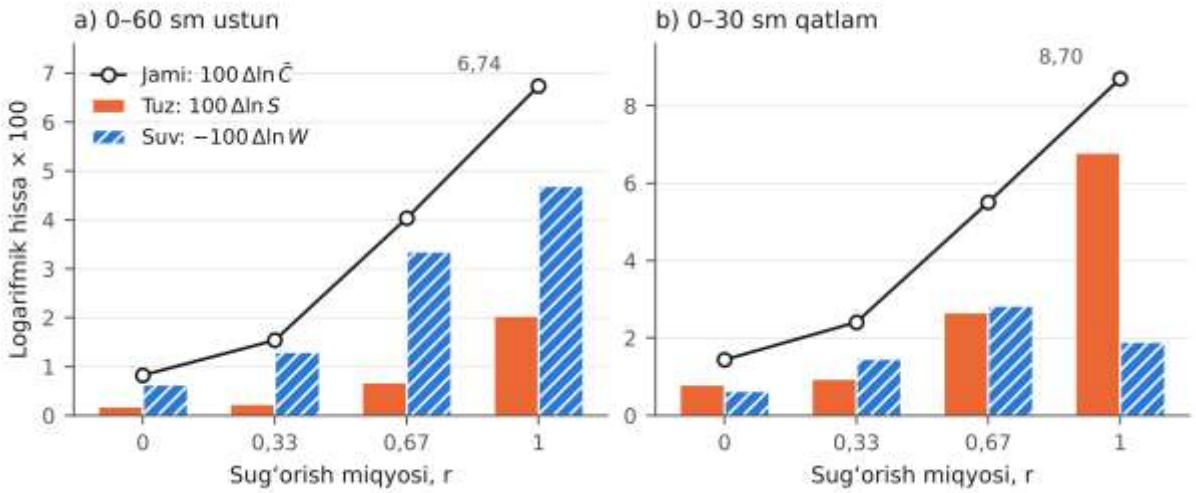
Qo‘shimcha hadning 90-kundagi ta’siri (kunlik Kelvin chegarasi, $N = 320$)

| r | $\bar{C}$, g/l (s = 0 → 0,01) | $\Delta\bar{C}$, % (0-60 sm) | $\Delta S$, % (0-60 sm) | $\Delta W$, % (0-60 sm) | $\Delta S$, % (0-30 sm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2,497 → 2,518 | 0,83 | 0,19 | -0,63 | 0,80 |
| 0,33 | 3,145 → 3,194 | 1,55 | 0,24 | -1,29 | 0,95 |
| 0,67 | 3,422 → 3,563 | 4,12 | 0,68 | -3,30 | 2,70 |
| 1 | 3,432 → 3,671 | 6,97 | 2,06 | -4,59 | 7,03 |

Izoh: $\Delta X = 100(X_{s=0,01}/X_{s=0} - 1)$.

r = 1 da W 140,22 mm dan 133,79 mm gacha kamaydi, S esa 0,4812 dan 0,4912 kg/m$^2$ gacha ortdi. (9) bo‘yicha butun ustundagi ln $\bar{C}$ o‘zgarishining 69,7% i suv kamayishiga to‘g‘ri keladi; tekshirilgan r qiymatlari bo‘yicha bu ulush taxminan 70-84% (2-rasm, a). 0-30 sm qatlamda, aksincha, r = 1 uchun logarifmik o‘zgarishning 78,1% i tuz zaxirasining ortishi bilan bog‘liq (2-rasm, b). Bu hisobiy ajratish alohida fizik mexanizmlarning mustaqil tajribada o‘lchangan sababiy hissalarini anglatmaydi.

(cc) BY 




***2-rasm.*** *Konsentratsiya o‘zgarishining tuz va suv hissalariga ajralishi (N = 320, 90-kun): a) 0-60 sm ustun; b) 0-30 sm qatlam. Logarifmik hissalar qo‘shiluvchan: 100Δln C̄ = 100Δln S - 100Δln W.*

r = 1 da qo‘shimcha had bug‘lanishni 11,39 mm ga oshirdi va drenajni 4,95 mm ga kamaytirdi. Suv zaxirasidagi -6,43 mm o‘zgarish ushbu oqim farqlariga yaxlitlash aniqligida mos keladi. Drenajdagi 4,95 mm farqni taxminiy 2 g/l konsentratsiyaga ko‘paytirish 0,0099 kg/m$^2$ ni beradi; bu S dagi qariyb 0,010 kg/m$^2$ farqning balans izohidir. Bug‘lanishning ortishi ushbu modelning ichki oqim hadiga tegishli; suv faolligi va tuz qobig‘ining bug‘lanishni kamaytiruvchi ta’siri [3, 4] modelga kiritilmagan. Davr bo‘yicha lokal C maksimumlari s = 0 va 0,01 da 18,06 va 23,56 g/l, 90-kundagi profil maksimumlari esa 13,05 va 15,03 g/l bo‘ldi.

### *3.2. Chegaraviy shartlar va diskretlashga sezgirlik*

**3-jadval.**

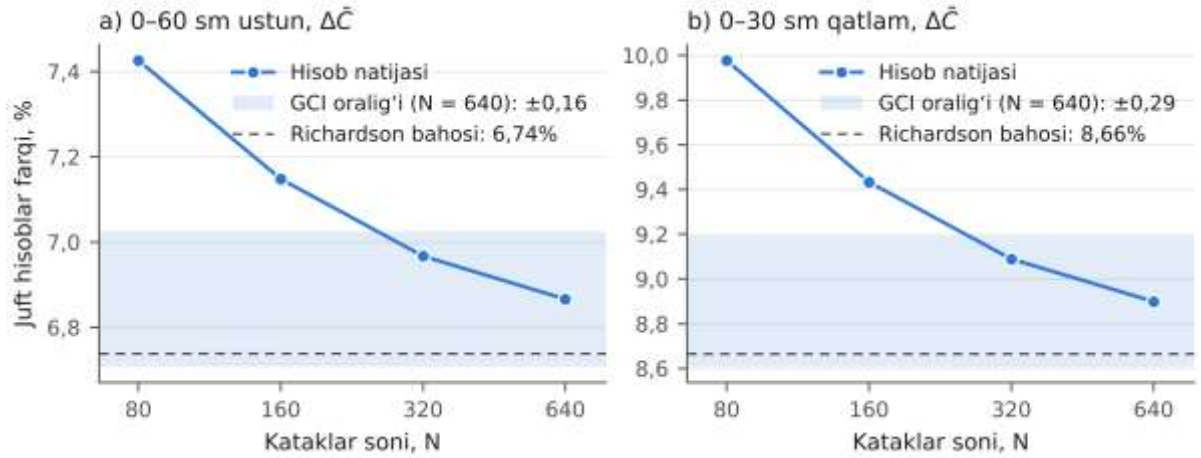
Kritik sirt bosim balandligiga sezgirlik (r = 1, N = 160)

| **Sirt sharti** | **C̄, g/l (s = 0)** | **ΔC̄, %** | **ΔS, % (0-60 sm)** | **ΔS, % (0-30 sm)** |
|---|---|---|---|---|
| h = -50 m | 3,416 | 7,141 | 2,140 | 7,269 |
| h = -500 m | 3,416 | 7,146 | 2,142 | 7,274 |
| h = -5000 m | 3,416 | 7,146 | 2,142 | 7,274 |
| Kunlik Kelvin bosimi | 3,416 | 7,146 | 2,142 | 7,274 |

-50 m doimiy chegaradan kunlik Kelvin chegarasiga o‘tish yakuniy ko‘rsatkichlarni deyarli o‘zgartirmadi (3-jadval). c ∈ [0,5; 2] dagi o‘zgarishlar ham kichik bo‘ldi. Buni (7) integrali izohlaydi: berilgan parametrlar uchun K(-50 m) ≈ $7\cdot10^{-10}$ m/kun va undan quruqroq bosimlar integralga juda kam hissa qo‘shadi. Ushbu suyuq fazali modelda sirt oqimining cheklanishi tanlangan keskin manfiy $h_{krit}$ dan ko‘ra, asosan -1…-50 m oralig‘idagi K(h) ga sezgir. Bu xulosa bug‘ transporti va sirt qarshiligi kiritilgan modelga avtomatik ko‘chmaydi.

Bir xil BDF integratorida N = 80, 160, 320 va 640 uchun ustun bo‘yicha ΔC̄ 7,43; 7,15; 6,97 va 6,87% bo‘ldi (3-rasm). Oxirgi uch to‘r bo‘yicha kuzatilgan yaqinlashish tartibi p = 0,84, Richardson bahosi 6,74%, eng nozik to‘rning GCI bahosi ±0,16 foiz punkt. 0-30 sm qatlamdagi ΔC̄ uchun Richardson bahosi taxminan 8,7%. Bu sonlar asimptotik yaqinlashish faraziga bog‘liq sonli diagnostikalardir; ular modelning fizik to‘g‘riligini yoki statistik tajribadagi rad etish ulushlarining to‘r bo‘yicha yaqinlashishini isbotlamaydi.

(cc) BY 




***3-rasm.*** *Juft hisoblardagi $\Delta\bar{C}$ ning to‘r bo‘yicha yaqinlashishi (bir xil BDF usuli): a) 0-60 sm ustun; b) 0-30 sm qatlam. Soyali soha - N = 640 qiymati atrofidagi GCI oralig‘i, punktir chiziq - Richardson ekstrapolyatsiyasi.*

N ≥ 160 da oshkor va BDF integratorlari bo‘yicha yakuniy $\bar{C}$ farqi 0,0026% dan kichik bo‘ldi. Bu bir xil fazoviy sxemadagi vaqt integratorlari mosligini ko‘rsatadi. Suv va tuz balanslarining eng katta qoldiqlari $7{,}2\cdot10^{-15}$ m va $5{,}1\cdot10^{-15}$ kg/m$^2$ bo‘lib, ular diskret balansning saqlanishini ifodalaydi, vaqt aniqligining alohida isboti emas. Kirchhoff integral o‘rtachasi ishlatilganda (N = 320, BDF) $\Delta\bar{C}$ 6,97% dan 6,73% gacha, ustun bo‘yicha ΔS 2,06% dan 1,95% gacha kamaydi. Sinov ta’sirining yo‘nalishi saqlangan, kattaligi esa oqimni diskretlash usuliga sezgir. Sintetik baholashlar garmonik o‘rtacha bilan bajarilgan.

s = 0 hisoblari HYDRUS-1D ning 2009-yilgi manba kodidan [17] kompilyatsiya qilingan dastur bilan solishtirildi. Manba kodiga tizimga moslashtirish va Pe = 0 holatidagi arifmetik tuzatish kiritilgan. Yopiq sirtli 10 kunlik transport sinovida C profillarining o‘rtacha mutlaq farqi N = 40 dan 160 ga o‘tganda 0,00092 dan 0,00026 g/l gacha kamaygan. -500 m atmosfera chegarasidagi 90 kunlik hisobda N = 320 va 640 uchun $\bar{C}$ farqi 2,41% va 1,26%, W farqi 2,39 va 1,23 mm bo‘lgan. To‘r maydalanganda tafovutning kamayishi yaqinlashishga mos, biroq ikki hisobning aynan bir limitga yaqinlashishini tasdiqlash uchun yetarli emas. Sirt va tuz kirimi operatorlarining farqi ham hisobga olinishi kerak. Bu rasmiy HYDRUS-1D 4.17 bilan validatsiya emas, modifikatsiya qilingan kod bilan qiyosdir; s > 0 hadi ushbu qiyosda mustaqil tekshirilmagan.

### *3.3. Aniqlash ulushi va parametrni baholash noaniqligi*

Uchastkalararo CV = 10% holatidagi sintetik baholashlar 4-jadvalda jamlangan.

**4-jadval.**

Sintetik baholash natijalari: uchastkalararo CV = 10%, laboratoriya CV = 4%, har bir dizaynda 500 ta takror

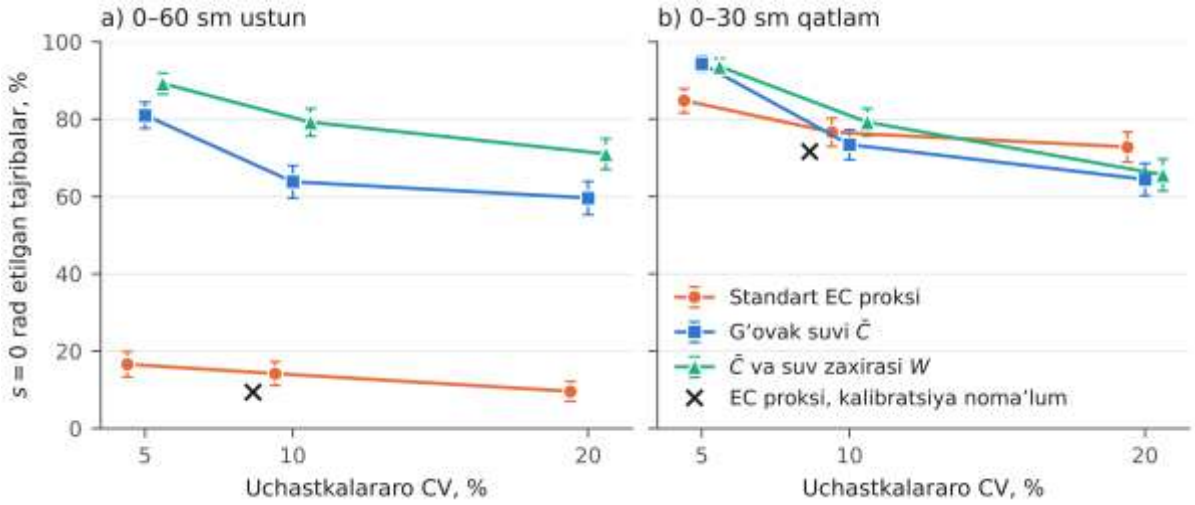
| Qatlam | Kuzatuv | s = 0 rad etildi, % | Nol nazoratida rad etish, % | RMSE(s) | Interval eni medianasi |
|---|---|---|---|---|---|
| 0-60 sm | EC proksi | 14,2 | 2,8 | 0,0081 | 0,0200 |
| 0-60 sm | EC proksi (κ noma’lum) | 9,4 | 1,2 | 0,0081 | 0,0200 |
| 0-60 sm | $\bar{C}$ | 63,8 | 1,4 | 0,0044 | 0,0155 |
| 0-60 sm | $\bar{C}$ va W | 79,2 | 2,4 | 0,0035 | 0,0142 |
| 0-30 sm | EC proksi | 76,6 | 3,0 | 0,0048 | 0,0156 |

(cc) BY 

| Qatlam | Kuzatuv | s = 0 rad etildi, % | Nol nazoratida rad etish, % | RMSE(s) | Interval eni medianasi |
|---|---|---|---|---|---|
| 0-30 sm | EC proksi (κ noma'lum) | 71,6 | 2,8 | 0,0050 | 0,0164 |
| 0-30 sm | C̄ | 73,4 | 3,4 | 0,0041 | 0,0147 |
| 0-30 sm | C̄ va W | 79,2 | 2,8 | 0,0040 | 0,0144 |

**Izoh.** Rad etish - s uchun nominal 95% profil intervali nolni qamramagan takrorlar ulushi; haqiqiy sinov qiymati s = 0,01. κ - EC kalibratsiyasining umumiy siljishi. RMSE - o‘rtacha kvadratik xatoning kvadrat ildizi; interval eni qidiruv chegaralari ichida hisoblangan. Nol nazoratida haqiqiy s = 0.

0-60 sm EC proksisida s profil intervalining median eni 0,0200, ya’ni butun qidiruv oralig‘iga teng bo‘ldi. Shu sababli intervalning chekli ko‘rinishi parametr yaxshi aniqlanganini bildirmaydi. RMSE = 0,0081; taqqoslash uchun, [0; 0,02] dan tekis tasodifiy tanlangan bahoning haqiqiy s = 0,01 ga nisbatan RMSE si taxminan 0,0058. κ noma’lum bo‘lganda nolni rad etish ulushi 9,4% gacha kamaydi. 0-30 sm dizaynlarida bu ulush 71,6-79,2% oralig‘ida bo‘ldi. Barcha dizaynlar orasidagi eng kichik median interval eni 0,0142 bo‘ldi. Demak, ayrim dizaynlar s = 0 ni tez-tez rad etadi, ammo qayta ta’sir kattaligini tor oraliqda baholamaydi (4-rasm).




***4-rasm.*** *Nol gipotezani rad etish ulushining uchastkalararo CV ga bog‘liqligi: a) 0-60 sm; b) 0-30 sm. Xato chiziqlari 500 ta takror uchun Monte-Karlo ±1,96 standart xatoni ko‘rsatadi; ular dala yoki model noaniqligining ishonch oralig‘i emas.*

c ning profil intervali barcha 20 000 baholashda [0,5; 2] ni to‘liq qamradi. Kuzatuvlar ushbu oraliqda c ni cheklay olmadi; bu model javobining c ga sust sezgirligiga mos. Shu bois s va c ni birgalikda baholashni noma’lum gidravlik yoki kirish parametrlari bilan umumiy identifikatsiyalashga tenglashtirib bo‘lmaydi.

Nol nazoratlarida empirik yolg‘on rad etish 1,0-3,8% bo‘ldi. s = 0,01 uchun nominal 95% profil intervallarining empirik qamrovi dizaynlar bo‘yicha 92,6-99,6% oralig‘ida o‘zgardi; demak, barcha dizaynlarda bir xil kalibrlangan qamrov olinmagan. Uchta qo‘shimcha tekshiruv nuqtasida interpolyatsiyaning eng katta logarifmik xatosi 0,00163, ya’ni taxminan 0,16% bo‘ldi. Bu tekshirilgan nuqtalar bo‘yicha maksimum, butun parametr sohasidagi kafolatlangan xato chegarasi emas.

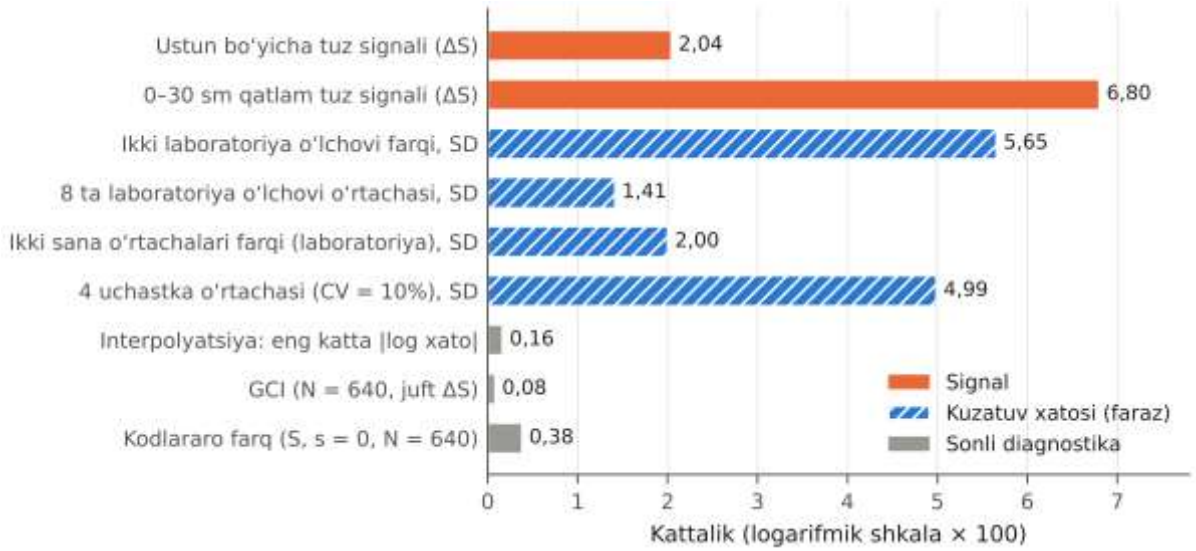
### *3.4. Signal va xato kattaliklarini taqqoslash*

5-rasmda logarifmik o‘zgarishlar va logarifmik standart chetlanishlar 100 ga ko‘paytirib ko‘rsatilgan. Ustun tuz signalining qiymati 2,04, yuqori qatlamniki 6,80; ularning oddiy foizdagi mos qiymatlari 2,06 va 7,03% dir.

(cc) BY 

To‘r GCI si 0,08, tekshiruv nuqtalaridagi interpolyatsiya xatosi 0,16, s = 0 dagi mutlaq tuz zaxirasining kodlararo farqi 0,38 sifatida berilgan. Bu ko‘rsatkichlar turli kattalik va xato manbalariga tegishli, shuning uchun ularni qo‘shib umumiy noaniqlik budjeti chiqarib bo‘lmaydi. To‘rtta uchastka o‘rtachasining faqat uchastkalararo komponenti uchun 100×SD = 4,99; laboratoriya komponenti bundan alohida. Kuzatuv shovqini tanlangan ssenariyda signal bilan bir tartibda, biroq noma’lum fizik parametrlarning to‘liq noaniqligi hisobga olinmagan.

Kirish noaniqligi uchun oddiy balans bahosi ham muhim. r = 1 da sug‘orish bilan 0,234 kg/m$^2$ tuz beriladi. $C_i$ ning 10% farqi kirimda 0,0234 kg/m$^2$ farq hosil qiladi; bu 0,4812 kg/m$^2$ yakuniy zaxiraning taxminan 4,9% iga teng. Biroq ushbu nisbat yakuniy S ham 4,9% ga o‘zgaradi degani emas: drenaj bilan chiqish o‘zgarishi ham hisoblanishi kerak. $C_i$ bilan s ni birgalikda baholash ushbu tajribaga kiritilmagan.




***5-rasm.*** *r = 1 uchun signal va diagnostik xato kattaliklari: 100Δln X yoki 100×SD(log X). Kodlararo farq s = 0 dagi S ga, GCI esa juft ΔS ga tegishli; interpolyatsiya maksimumi faqat uchta tekshiruv nuqtasidan olingan. 4,99 qiymat faqat uchastkalararo xato komponentidir. Turli diagnostikalar bir xil ehtimollik ma’nosiga ega emas va umumiy xato budjeti sifatida jamlanmaydi.*

## 4. Muhokama

Natijalar model sezgirligi bilan amaliy identifikatsiyalanuvchanlik orasidagi farqni ko‘rsatadi. Bir xil qo‘shimcha had holat profillarini o‘zgartiradi, lekin kuzatuv operatori shu o‘zgarishning turli qismlarini saqlab qoladi. Butun ustundagi $\bar{C}$ signalida suv kamayishining hissasi katta, yuqori qatlamda esa tuz zaxirasi hissasi ustun. Shuning uchun bir kuzatuv kanalidagi kuchli javobni boshqa kanalning ham kuchli javobi deb qabul qilish mumkin emas.

EC proksisi uchun 0-30 sm qatlam 0-60 sm ustunga qaraganda ko‘proq rad etish berdi. Bu faqat sinovdan o‘tgan ikki qatlam, tanlangan sug‘orish rejimi va xato modeliga tegishli; 0-30 sm chuqurlikning universal yoki optimal ekanini ko‘rsatmaydi. Konsentratsiya va W ni birgalikda kuzatish axborotni ko‘paytiradi, biroq qo‘shimcha o‘lchov talab qiladi. Dizaynlar bir xil xarajat sharoitida solishtirilmagan.

Xatoning vaqt bo‘yicha tuzilishi aniqlash natijasiga bevosita ta’sir qiladi. Ushbu tajribada uchastka siljishi uchala sanada bir xil; sanalararo ayirmada u bekor bo‘ladi va laboratoriya xatosi qoladi. Qabul qilingan dizaynda ikki sana o‘rtachalari farqining laboratoriya komponenti uchun 100×SD taxminan 2,0. Yangi nuqtalardan takror namuna olishda vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi fazoviy xato ham paydo bo‘lishi mumkin. Bunday komponent ushbu baholashlarga kiritilmagan. Shu sababli 4-jadvaldagi ulushlar optimistik shartli natijalar, matematik isbotlangan yuqori chegara emas. Sanalararo korrelatsiya o‘zgargandagi quvvat ushbu ishda aniqlanmagan.

(cc) BY 

Dala tajribasi uchun kuzatuv operatorini alohida tekshirish talab qilinadi. Ekstrakt usuli, quruq massa, harorat va EC-tuz bog‘lanishi standartlashtirilishi, $\bar{C}$ ni baholashda esa qatlam bo‘yicha namlik bilan vaznlash hisobga olinishi kerak. Bir xil namlik o‘lchovi $\bar{C}$ va W ni hisoblashda qatnashsa, kanallar xatolarining mustaqilligi farazi qayta ko‘riladi. $EC_{1:5}$ va boshqa ekstrakt usullari keyingi tekshiruv uchun nomzod kuzatuvlardir; ular bu hisobda alohida kalibrlanmagan. Uchastkalar soni realistik kovariatsiya va o‘lchash xarajatlari asosida rejalashtirilishi lozim.

### *4.1. Natijalarning qo‘llanish chegaralari*

Natijalar oldindan berilgan sinov ta’siri va sintetik kuzatuv dizaynining tahlilidir. Quyidagi chegaralar ularning dala talqinini cheklaydi.

**Fizik mexanizm.** s = 0,01 o‘lchangan tuproq xossasi emas. Kimyoviy osmos, suv faolligi va tuz qobig‘i turli mexanizmlardir. β ideal NaCl eritmasi uchun berilgan; to‘liq dissotsilangan ideal eritmalarni massa birligida solishtirganda $Na_2SO_4$ va $MgSO_4$ ta’siri NaCl nikining taxminan 0,62 va 0,49 qismiga teng. Yuqori konsentratsiyada ideal eritma yaqinlashuvining aniqligi alohida tekshirilishi kerak.

**Sirt jarayonlari.** Kritik bosim balandligi havo harorati va namligidan hisoblangan. Sirt harorati, suv faolligi, bug‘ va issiqlik transporti hamda tuz qobig‘i qarshiligi modelga kiritilmagan [21]. Sirtning yarim katagida osmotik hadni hisobga olmaslik ham tanlangan model chegarasidir.

**Sonli va model xatosi.** Garmonik o‘rtacha quruq gradientlarda oqim bahosiga ta’sir qilishi mumkin [13]. To‘r va vaqt tekshiruvlari fizik validatsiya o‘rnini bosmaydi. Sintetik ma’lumotlar bilan baholash jadvali bir xil sonli modeldan olingan, shuning uchun model nomuvofiqligiga chidamlilik tekshirilmagan. s > 0 hadi uchun mustaqil etalon va statistik dizaynlarning N = 320 dagi takrori keltirilmagan.

**Hisobiy ssenariy.** Sayoz sho‘r sizot suvi, qatlamli tuproq va ildizlarning suv so‘rishi hisobga olinmagan. Erkin drenajli 0,60 m ustun [1, 2] dagi kapillyar ko‘tarilishni takrorlamaydi. Meteorologik katak voha mikroiqlimini to‘liq ifodalashi kafolatlanmagan; FAO-56 dagi quruq sharoit tuzatishlari [19] bug‘lanish talabiga ta’sir qilishi mumkin. Sug‘orish miqyosi agronomik me’yor sifatida tavsiya etilmaydi.

**Parametr va kuzatuv noaniqligi.** Gidravlik hamda transport parametrlari, boshlang‘ich holat, $C_i$ va bug‘lanish miqyosi ma’lum deb olingan. Ularning s bilan birgalikdagi bahosi va sezgirliklarining o‘zaro o‘xshashligi tekshirilmagan. V ma’lum, uchastka xatosi esa vaqt bo‘yicha o‘zgarmas. Keng yoki qidiruv chegaralarida to‘xtagan profil intervallari parametr haqida axborot cheklanganini ko‘rsatadi; ularni muvaffaqiyatli identifikatsiyalash deb talqin qilish mumkin emas.

## 5. Xulosa

Richards-transport modelida kiritilgan sinov hadi uchun kuzatiladigan ta’sirning kattaligi o‘lchash operatoriga bog‘liq bo‘ldi. N = 320 va r = 1 da $\bar{C}$ 6,97%, butun ustundagi S 2,06%, 0-30 sm qatlamdagi S esa 7,03% ga ortdi. Ustun konsentratsiyasining logarifmik o‘zgarishida suv kamayishining hissasi 69,7% bo‘ldi.

Tanlangan sintetik xato modelida EC proksisi s = 0 ni 0-60 sm uchun 14,2%, 0-30 sm uchun 76,6% hollarda rad etdi. $\bar{C}$ va W birgalikda kuzatilganda ustun bo‘yicha ulush 79,2% bo‘ldi. Biroq eng kichik median profil intervali eni 0,0142 bo‘lib, haqiqiy s = 0,01 ga nisbatan kengligicha qoldi. Ta’sirni aniqlash parametr kattaligini aniq baholashga teng emas.

To‘r va o‘tkazuvchanlikni o‘rtachalash variantlari qo‘shimcha ta’sir yo‘nalishini saqladi, kattaligini esa o‘zgartirdi. s = 0 dagi modifikatsiya qilingan HYDRUS kodi bilan N = 640 uchun $\bar{C}$ tafovuti 1,26% bo‘lib qoldi. Kritik sirt bosimining kuchsiz ta’siri faqat shu suyuq fazali model va tanlangan parametrlar uchun olingan natijadir.

Kuzatuv chuqurligi va kanalini tanlashni parametr hamda xato modeli bilan birga baholash zarur. Natijalar ikki tekshirilgan qatlam orasidagi shartli farqni ko‘rsatadi; ular dala kalibratsiyasi, optimal chuqurlik yoki umumiy monitoring protokoli o‘rnini bosmaydi. Vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi xatolar, noma’lum kirish parametrlari va boshqa generativ modelda tekshiruv umumlashtirishdan oldin bajarilishi kerak.

(cc) BY 

**Ma’lumotlar mavjudligi.** Hisoblash dasturlari, model konfiguratsiyalari va natijalar mualliflardan asosli so‘rov bo‘yicha olinishi mumkin.

**Manfaatlar to‘qnashuvi.** Mualliflar manfaatlar to‘qnashuvi yo‘qligini ma’lum qiladi.

**Sun’iy intellekt vositalaridan foydalanish.** Qo‘lyozmaning dastlabki tahriri, ichki izchillik tekshiruvi va rasmlarni tayyorlashda Claude (Anthropic), ushbu matn va bibliografik tahrirda ChatGPT (OpenAI) vositalaridan foydalanildi. Ilmiy mazmun, natijalar va ularning talqini uchun mas’uliyat mualliflarga tegishli.

## Adabiyotlar

1. Forkutsa I., Sommer R., Shirokova Y.I., Lamers J.P.A., Kienzler K., Tischbein B., Martius C., Vlek P.L.G. (2009). Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: I. Water dynamics. Irrigation Science, 27, 331-346. https://doi.org/10.1007/s00271-009-0148-1
2. Forkutsa I., Sommer R., Shirokova Y.I., Lamers J.P.A., Kienzler K., Tischbein B., Martius C., Vlek P.L.G. (2009). Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics. Irrigation Science, 27, 319-330. https://doi.org/10.1007/s00271-009-0149-0
3. Fujimaki H., Shimano T., Inoue M., Nakane K. (2006). Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil. Vadose Zone Journal, 5, 1246-1256. https://doi.org/10.2136/vzj2005.0144
4. Nachshon U., Weisbrod N., Dragila M.I., Grader A. (2011). Combined evaporation and salt precipitation in homogeneous and heterogeneous porous media. Water Resources Research, 47, W03513. https://doi.org/10.1029/2010WR009677
5. Mo‘minov S.Yu., Sobirov A.U. (2026). Ellikqal’a tumani misolida 2018-2024-yillar oralig‘ida tuproq sho‘rlanishi va iqlim omillarining o‘zaro bog‘liqligini tahlil qilish. System Analysis and Modeling in Economy and International Relations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Toshkent, 15-yanvar 2026). Toshkent: University of World Economy and Diplomacy, 7-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.18217840
6. van Genuchten M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
7. Mualem Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12, 513-522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513
8. Carsel R.F., Parrish R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, 24, 755-769. https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755
9. Mo‘minov S.Yu., Sobirov A.U. (2026). GAT va mashinaviy o‘rganish usullari asosida Orolbo‘yi hududida qurg‘oqchilik riskini baholash. “Orolbo‘yi hududida iqlim o‘zgarishi va suv tanqisligi sharoitida qishloq xo‘jaligini rivojlantirishning innovatsion texnika va texnologiyalari” xalqaro ilmiy va ilmiy-texnik konferensiyasi materiallari, 443-449. https://doi.org/10.5281/zenodo.19435562
10. NASA POWER Project. Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER): Daily API. NASA Langley Research Center. https://power.larc.nasa.gov (murojaat sanasi: 11.10.2026).
11. Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M.Th. (2013). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.17. HYDRUS Software Series 3. Riverside: University of California Riverside.
12. Mo‘minov S.Yu., Sobirov A.U. (2026). Divergent shakldagi nochiziqli kross-diffuziya parabolik sistemasi uchun avtomodel yechimlar va kompakt tayanch xossalari. “Matematika, amaliy matematika va axborot texnologiyalarining dolzarb muammolari” respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari (Nukus, 1-2-may 2026). Nukus: Qoraqalpoq davlat universiteti, 1-tom, 271-273.

(cc) BY 

13. Szymkiewicz A. (2009). Approximation of internodal conductivities in numerical simulation of one-dimensional infiltration, drainage, and capillary rise in unsaturated soils. Water Resources Research, 45, W10403. https://doi.org/10.1029/2008WR007654
14. Celik I.B., Ghia U., Roache P.J., Freitas C.J., Coleman H., Raad P.E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130, 078001. https://doi.org/10.1115/1.2960953
15. Raue A., Kreutz C., Maiwald T., Bachmann J., Schilling M., Klingmüller U., Timmer J. (2009). Structural and practical identifiability analysis of partially observed dynamical models by exploiting the profile likelihood. Bioinformatics, 25, 1923-1929. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp358
16. Self S.G., Liang K.-Y. (1987). Asymptotic properties of maximum likelihood estimators and likelihood ratio tests under nonstandard conditions. Journal of the American Statistical Association, 82, 605-610. https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478472
17. PC-Progress. HYDRUS-1D source code (2009). https://www.pc-progress.com (murojaat sanasi: 12.10.2026).
18. Kemper W.D., Rollins J.B. (1966). Osmotic efficiency coefficients across compacted clays. Soil Science Society of America Journal, 30, 529-534. https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000050005x
19. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO.
20. Mo‘minov S.Yu., Sobirov A.U. (2026). Sun’iy intellekt va masofadan zondlash texnologiyalari asosida O‘zbekistondagi sug‘oriladigan hududlarda tuproq sho‘rlanishi dinamikasini baholash. “Raqamli texnologiyalar, tarmoqlar va kommunikatsiyalar” xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari (18-19-may 2026), 1283-1287.
21. Vanderborght J., Fetzer T., Mosthaf K., Smits K.M., Helmig R. (2017). Heat and water transport in soils and across the soil-atmosphere interface: 1. Theory and different model concepts. Water Resources Research, 53, 1057-1079. https://doi.org/10.1002/2016WR019982

(cc) BY *dtai.uz*