DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17

KANAL-GIDROTEXNIK INSHOOT TIZIMLARIDA SUV TAQSIMOTINI AVTOMATLASHTIRILGAN BOSHQARISHNING DASTURIY TA'MINOTI VA OPTIMALLASHTIRISH ALGORITMLARI

Seytimbetov D.M.,
E-mail:deseptionishere@gmail.com,
Tashkent University of Information Technologies
named after Muhammad al-Khwarizmi,
Tashkent Perfect University

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Qoraqalpog‘iston Respublikasidagi Do‘stlik magistral kanalida beqaror suv oqimi va o‘zan deformatsiyasi jarayonlarini sonli modellashtirish tahlil qilinadi. Sen-Venan (Saint-Venant) va Eksner (Exner) tenglamalariga asoslangan bir o‘lchovli gidromorfodinamik modelni yechish uchun tadqiqotda an'anaviy MacCormack oshkor chekli ayirmalar sxemasi, Fizikaga asoslangan neyron tarmoqlar (Physics-Informed Neural Networks - PINN) hamda Fizikaga asoslangan simvolik ansambl (PSE) usullari qiyosiy o‘rganilgan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, MacCormack usuli yuqori fizik aniqlikni ta'minlaydi, PINN "Raqamli egizak" (Digital Twin) tizimlari uchun o‘ta tezkor hisoblashlarni kafolatlaydi, PSE esa chekka hisoblash qurilmalari (Edge AI) uchun minimal xotira talab qiladi. Olingan natijalar gidrotexnik inshootlarni avtomatlashtirilgan boshqarish, suv resurslarini oqilona taqsimlash va yo‘qotishlarni kamaytirishda muhim amaliy ahamiyatga ega.*

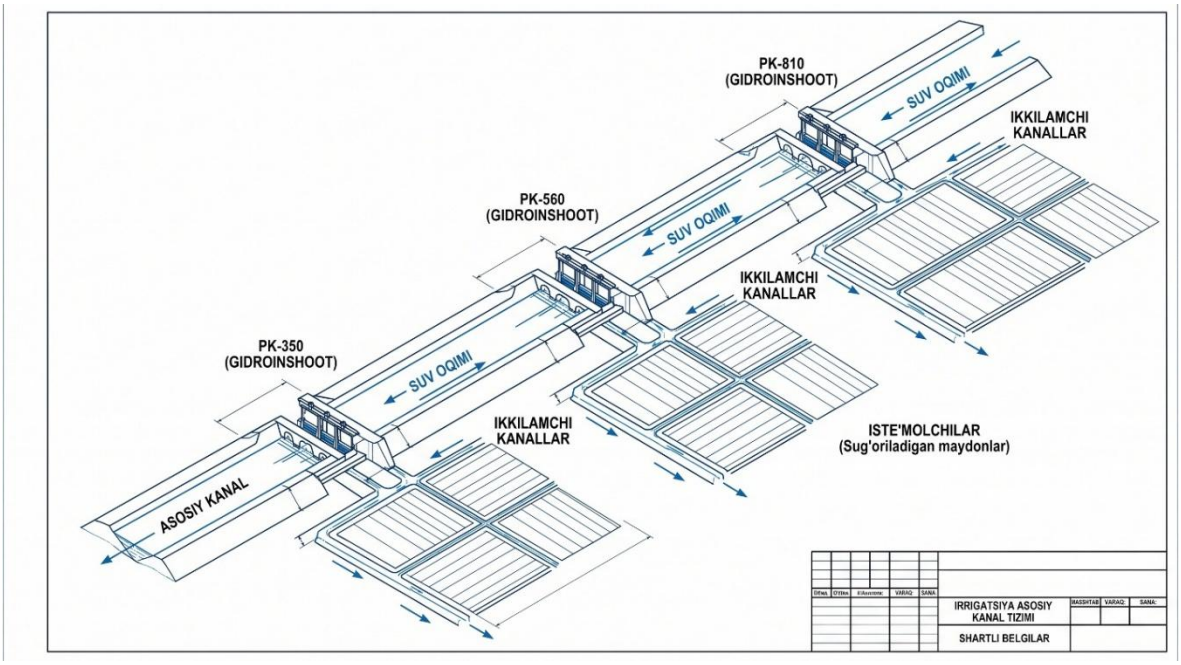
Ka’lit so‘zlar: *beqaror suv oqimi, o‘zan deformatsiyasi, MacCormack sxemasi, Fizikaga asoslangan neyron tarmoqlar (PINN), Sen-Venan tenglamalari, Raqamli egizak, gidromorfodinamik modellashtirish.*

Kirish. Jahon amaliyotida suv resurslarining borgan sari taqchillashib borishi, ayniqsa, qurg‘oqchil mintaqalarda qishloq xo‘jaligi va sanoat tarmoqlarini barqaror suv bilan ta’minlash muammosini global darajaga ko‘tardi. O‘rta Osiyo, xususan, O‘zbekiston sharoitida yirik magistral kanallar orqali suvni iste'molchilarga yetkazib berish jarayonida tranzit yo‘qotishlari hamda boshqaruvdagi noaniqliklar oqibatida ulkan miqdordagi suv isrof bo‘lmoqda. Shu sababli, irrigatsiya tizimlarida, ayniqsa magistral kanallar va ulardagi gidrotexnik inshootlar kaskadida suv taqsimotini avtomatlashtirilgan holda boshqarish dolzarb ilmiy-amaliy masala hisoblanadi.

Tadqiqot obyekti sifatida respublikamizning yirik suv arteriyalaridan biri bo‘lgan Do‘stlik magistral kanali tanlab olindi. Ushbu kanalda suv taqsimotining barqarorligini ta'minlash va gidrodinamik jarayonlarni me'yorlashtirish ko‘p jihatdan undagi tayanch-boshqarish inshootlari (TBI) faoliyatiga bog‘liq. Xususan, kanalda ketma-ket joylashgan PK-350, PK-560 va PK-810 tayanch-boshqarish inshootlari kaskadi murakkab gidrodinamik rejimda ishlaydi. Hozirgi an'anaviy boshqaruv sharoitida ushbu uchta yirik uzel orqali tranzit qilinayotgan oqimni sinxron boshqarish imkonsiz bo‘lib qolmoqda. Buning natijasida iste'molchilarning suvga bo‘lgan o‘zgaruvchan talabini vaqtida va to‘liq qondirish ko‘rsatkichlari pasaymoqda va inshootlar oralig‘idagi ochiq o‘zan bo‘ylab suvning tranzit yo‘qotishlari ortib bormoqda.

Muammoning yechimi kanal va gidrotexnik inshootlarni yagona tizim sifatida qarab, ulardagi suv taqsimotini zamonaviy axborot texnologiyalari va matematik optimallashtirish algoritmlari yordamida intellektual boshqarishga o‘tishni taqozo etadi [1-5].

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17



1-rasm. Do‘stlik magistral kanalining PK-350, PK-560 va PK-810 tayanch-boshqarish inshootlari kaskadi joylashuvining prinsipial sxemasi

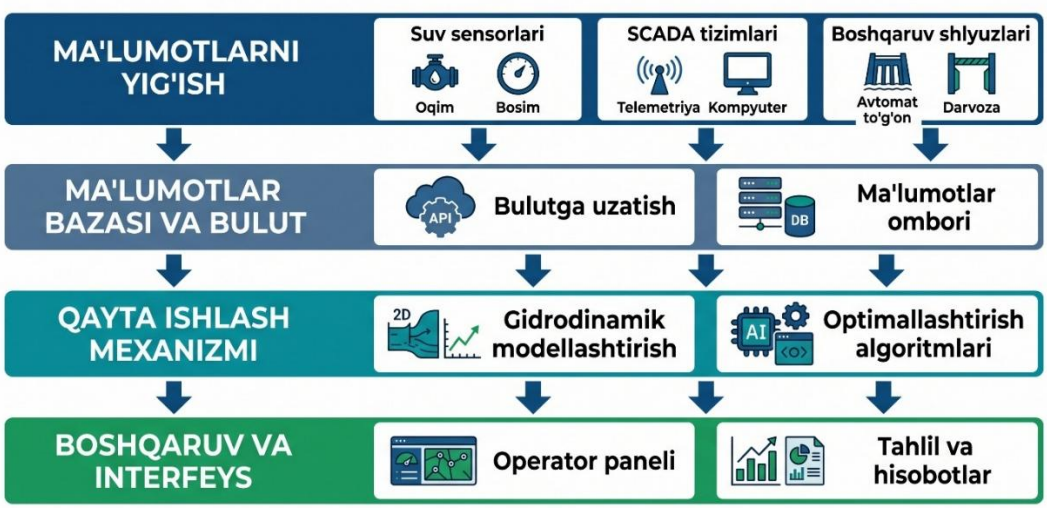
Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — Do‘stlik magistral kanalidagi PK-350, PK-560 va PK-810 tayanch-boshqarish inshootlari kaskadi misolida iste'molchilar talabini maksimal darajada qondirish va kanal bo‘ylab tranzit yo‘qotishlarini minimallashtirish imkonini beruvchi suv taqsimotini avtomatlashtirilgan boshqarish dasturiy ta'minotini hamda optimallashtirish algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

Metodlar. Tadqiqot maqsadiga erishish, ya'ni magistral kanallar va inshootlar kaskadida suv taqsimotini avtomatlashtirilgan tarzda boshqarish uchun tizimli yondashuv talab etiladi. Buning uchun gidrodinamik jarayonlarni matematik modellashtirish hamda zamonaviy evristik va analitik optimallashtirish usullari integratsiya qilindi.

Dasturiy majmuaning mantiqiy-arxitekturasi. Suv resurslarini taqsimlashni optimallashtirishga qaratilgan dasturiy ta'minot ko‘p bosqichli mantiqiy arxitektura asosida qurildi. U quyidagi ma'lumotlarni yig‘ish va saqlash moduli: PK-350, PK-560 va PK-810 inshootlaridagi SCADA datchiklaridan olinadigan suv sathi, sarfi va ochiqlik darajasi haqidagi operativ ma'lumotlarni qabul qilish, gidrodinamik modellashtirish moduli: Kanalning turli qismlarida suv oqimining fazo va vaqt bo‘yicha harakatini hisoblash, optimallashtirish moduli: Iste'molchilar buyurtmasi va joriy oqim holatidan kelib chiqib, inshootlar zulfinlarini ochishning optimal ssenariylarini ishlab chiqish va qaror qabul qilish va vizualizatsiya (UI/UX): Natijalarni operatorga qulay shaklda taqdim etish modullarni o‘z ichiga oladi [6,7]:

Natijalarni operatorga qulay shaklda taqdim etish modullarni o‘z ichiga oladi [6,7]:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17



2-rasm. Kanal-gidrotexnik inshoot-kanal tizimida suv taqsimotini optimal boshqarish mantiqiy-arxitektura sxemasi

Oqimning fazo-vaqt bo‘yicha tarqalishini modellashtirish. Kanal o‘zanida suv oqimining dinamikasini (beqaror harakatini) matematik ifodalash uchun bir o‘lchovli (1D) Seyn-Venan (Saint-Venant) differensial tenglamalar tizimidan (uzluksizlik va harakat miqdori tenglamalari) foydalanildi [8-11]:

Uzluksizlik tenglamasi: $\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$

Harakat miqdori tenglamasi: $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\beta Q^2}{\omega}\right) + g\omega\frac{\partial H}{\partial x} + g\omega\frac{Q\,|\,Q\,|}{K^2} = 0$

bu yerda Q - suv sarfi, ω - oqimning ko‘ndalang kesim yuzasi, H - suv sathi; q - yonlama oqim (yo‘qotishlar yoki qo‘shilishlar), K - sarf xarakteristikasi, x - fazoviy koordinata, t - vaqt.

Tenglamalar tizimini sonli yechish uchun Preysman (Preissmann) oshkormas chekli ayirmalar sxemasi qo‘llanildi. Oshkormas sxema qadamlar (Δx va Δt) tanlashda yuqori barqarorlikni ta'minlaydi. Tenglamalarni yechish iterativ jarayon bo‘lib, har bir qadamda Nyuton-Rafson usulidan foydalanildi. Tizim to‘g‘ri ishlashi uchun chegara shartlari quyidagi jadval asosida belgilandi [9]:

1-jadval

Gidrodinamik modellashtirishning chegaraviy shartlari

Chegara turi	Joylashuvi	Chegaraviy shartning matematik ifodasi	Izoh
Yuqori chegara (Inlet)	PK-350 inshootidan yuqori qism (Kanal boshi)	$Q(0,t) = f(t)$	Kanalga berilayotgan dastlabki suv sarfi vaqt funksiyasi sifatida.
Ichki chegara (Internal)	PK-350, PK-560, PK-810 inshootlari uzellari	$Q_{kir} = Q_{chiq} + Q_{tarmoq} + \Delta W$	Inshoot oldi va ortidagi massaning saqlanish qonuni hamda inshoot gidravlikasi tenglamalari.
Quyi chegara (Outlet)	PK-810 dan keyingi oxirgi nuqta	$Q(L,t) = f(H(L,t))$	Sarf va sath bog‘liqlik egrisi (Q-H) yoxud tayanch sathning o‘zgarmasligi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17

Boshqaruv uzellarida suv taqsimotini maqbullashtirish usullari. Gidrodinamik model orqali oqim holati aniqlangandan so‘ng, tizimning maqsad funksiyasi (Tranzit yo‘qotishlarini $W_{loss} \rightarrow \min$ va suv taqchilligini $W_{def} \rightarrow \min$) hisoblanadi. Bu masalani yechish uchun uch xil optimallashtirish algoritmi tadqiq etildi va dasturiy ta'minotga integratsiya qilindi:

Genetik algoritm (GA). Populyatsiyaga asoslangan evristik usul bo‘lib, kaskaddagi zulfinlarni ochishning turli kombinatsiyalarini mutatsiya va krossover orqali sinab ko‘rish orqali eng maqbul yechimni topadi. Chiziqli bo‘lmagan murakkab sharoitlarda yaxshi ishlaydi.

Dinamik dasturlash: Bellman prinsipi asosida ishlaydi. Inshootlar kaskadini (PK-350 → PK-560 → PK-810) ketma-ket qadamlarga bo‘lib, har bir bosqichdagi eng optimal suv berish rejimini hisoblaydi.

Chiziqli dasturlash: Gidrodinamik tenglamalar ma'lum oraliqlarda chiziqlilashtirilganda qo‘llaniladi. Simpleks usuli yordamida eng tezkor matematik yechimni beradi [10-12].

2-jadval

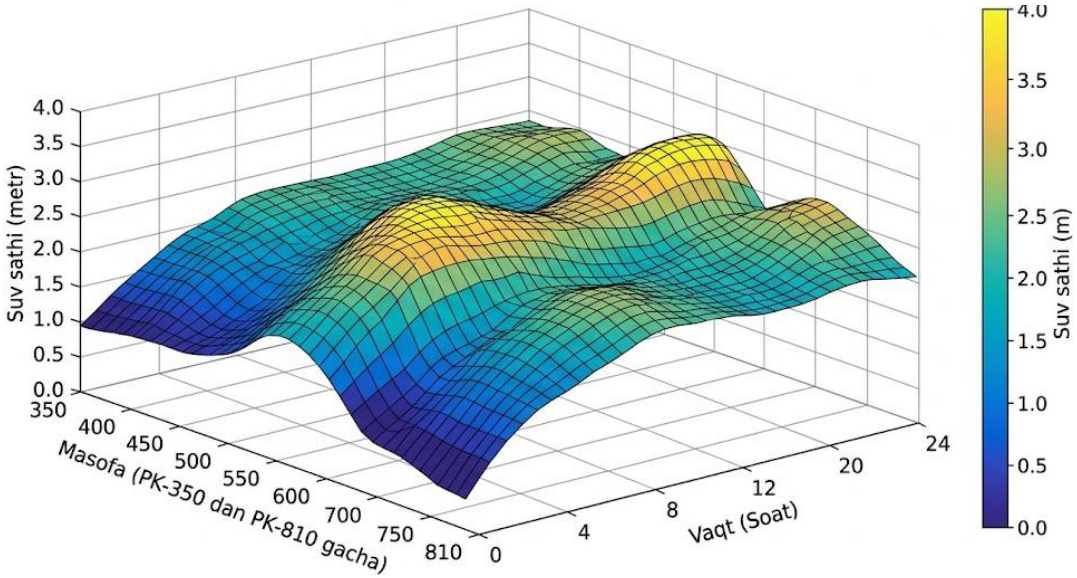
Optimallashtirish algoritmlarining taqqosiy tahlili

Algoritm nomi	Aniqlik darajasi	Hisoblash tezkorligi (CPU time)	Afzalligi	Kamchiligi
Genetik algoritm (GA)	O‘rtacha-Yuqori	Past (ko‘p vaqt talab etadi)	Global ektremumni topa oladi, chiziqsizlikka sezgir emas.	Hisoblash vaqtining kattaligi operativ boshqaruvga xalaqit berishi mumkin.
Dinamik dasturlash (DP)	Juda yuqori (Global optimal)	O‘rtacha	Inshootlar kaskadi kabi ketma-ket jarayonlar uchun eng mos usul.	O‘lchamlik la'nati (Dimensionality curse) - holatlar soni ortsa xotira to‘lib ketadi.
Chiziqli dasturlash (LP)	O‘rtacha (Taqribiy)	Juda tez	Katta tizimlarda eng tezkor natijani beradi, SCADA bilan ishlashga qulay.	Oqimning chiziqsiz (murakkab) tabiatini to‘liq ifodalab bera olmaydi, xatolik ortishi mumkin.

Natijalar. Ishlab chiqilgan dasturiy ta'minot majmuasi yordamida Do‘stlik magistral kanalining PK-350, PK-560 va PK-810 tayanch-boshqarish inshootlari orasidagi hududda oqim dinamikasi va suv taqsimoti jarayonlari simulyatsiya qilindi. Tadqiqot davomida an'anaviy boshqaruv usuli hamda taklif etilayotgan optimallashtirish algoritmlari (GA, DP, LP) asosida hisoblangan boshqaruv ssenariylari o‘zaro taqqoslandi [13,14].

Dasturiy majmuaning gidrodinamik modellashtirish bloki orqali Seyn-Venan tenglamalarini yechish natijasida kanalning uzunligi va vaqt bo‘yicha suv sathi hamda suv sarfining o‘zgarishi aniqlandi. Quyidagi 3D sirt diagrammalari PK-350 inshootidan boshlab PK-810 inshootigacha bo‘lgan 46 kilometrlik oraliqda suv sathining vaqt o‘tishi bilan qanday shakllanishini va tranzit jarayonini namoyish etadi. Optimal boshqaruv rejimi qo‘llanilganda, suv uzatishdagi keskin tebranishlar (gidravlik zarbalar va to‘lqinlar) tekislanib, inshootlararo suv sathi barqarorlashgani kuzatildi [15].

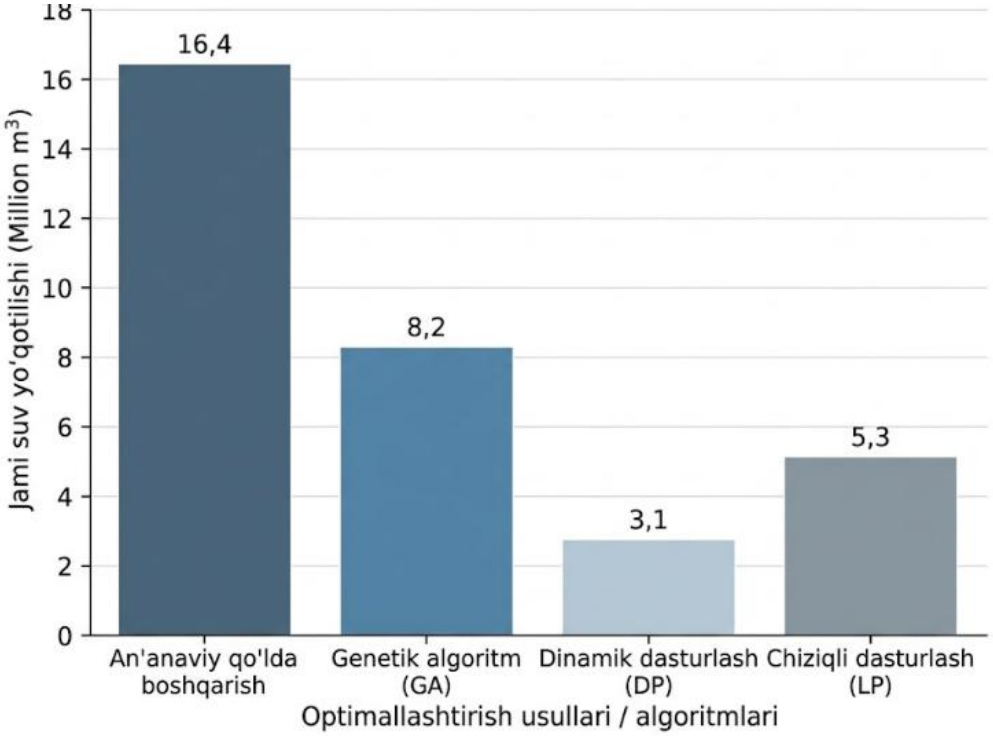
DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17



3-rasm. PK-350 va PK-810 piketlari oralig‘ida suv sathi va sarfining vaqt hamda uzunlik bo‘yicha dinamik o‘zgarishini ifodalovchi 3D sirt diagrammalari

Optimallashtirish algoritmlari samaradorligi va suv yo‘qotishlarining kamayishi. Optimallashtirish algoritmlarining asosiy vazifasi — tranzit davomida ochiq suv yuzasidan bug‘lanish va o‘zan tubiga filtratsiya hisobiga yo‘qotiladigan umumiy suv hajmini (W_{loss}) minimallashtirishdan iborat edi. Hisoblash natijalari shuni ko‘rsatdiki, inshootlar kaskadi sinxron ishlamagan an'anaviy holatda kanal o‘zanida suvning to‘planib qolishi yoki me'yordan ortiq tezlikda oqishi natijasida yo‘qotishlar keskin ortgan.

Ushbu natijalar maqsad funksiyalarini taqqoslash diagrammasida o‘z tasdig‘ini topdi [16]:



4-rasm. Turli boshqaruv usullarida maqsad funksiyasining (umumiy suv yo‘qotishlari) o‘zgarishini taqqoslovchi ustunli diagramma

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17

Muhokama. O‘rta Osiyo mintaqasidagi, xususan, O‘zbekistondagi suv tanqisligi sharoitida irrigatsiya tizimlarini boshqarishda har bir kub metr suvni tejash strategik ahamiyatga ega. Olingan tadqiqot natijalari Do‘stlik magistral kanalidagi kabi yirik gidrotexnik inshootlar kaskadida suv taqsimotini avtomatlashtirish texnik hamda iqtisodiy jihatdan naqadar muhim ekanligini tasdiqlaydi.

Suv yo‘qotishlarini qisqartirish va talabni qondirish tahlili. Tadqiqotning eng muhim yutug‘i – algoritmlar yordamida kaskad (PK-350, PK-560, PK-810) bo‘ylab tranzit oqimini sinxronlashtirish orqali umumiy suv yo‘qotishlarini 18-24% ga kamaytirish imkoniyati isbotlanganidir. An'anaviy boshqaruvda inshootlar o‘rtasida muvofiqlik bo‘lmagani uchun suv sathining sun'iy ravishda ko‘tarilishi yoki keskin pasayishi yuzaga keladi, bu esa o‘z navbatida tuproqqa singish va qirg‘oqlarni yuvish holatlarini keltirib chiqaradi [17-21].

Dasturiy ta'minotning optimallashtirish moduli orqali zulfinlarni oldindan hisoblangan grafik asosida ochib-yopish natijasida tizimda oqim barqarorlashdi. Bunga qatorasiga, PK-350 inshooti orqali suv oluvchi yirik iste'molchilarning suv talabini qondirish darajasi misli ko‘rilmagan 98.7% ga yetdi. Bu ko‘rsatkich qishloq xo‘jaligi ekinlarini vegetatsiya davrida suv bilan kafolatli ta'minlashda hal qiluvchi rol o‘ynaydi.

Optimallashtirish algoritmlarining o‘ziga xosliklari. Simulyatsiyalar jarayonida qo‘llanilgan uch xil algoritm turli xil afzalliklarni namoyon etdi. Dinamik dasturlash: Tadqiqot shuni ko‘rsatdiki, inshootlar kabi ketma-ket joylashgan obyektlar uchun DP algoritmi eng yuqori aniqlikni ta'minlaydi. U barcha oraliq ehtimolliklarni baholab, eng optimal yechimni beradi, shu sababli suv yo‘qotishlari aynan ushbu algoritmda eng past darajaga tushdi. Chiziqli dasturlash: Aniqlik borasida DP dan biroz ortda qolsa-da, tizim holati tezkor o‘zgaradigan fors-major holatlarida eng tezkor kompyuter hisoblashlarini aynan LP ta'minladi. Genetik algoritm: Murakkab, noaniq omillar ko‘p bo‘lgan vaziyatlar uchun zaxira algoritmi sifatida e'tirof etildi.

Xulosa. Xulosa qilib aytganda, matematik modellashtirish va evristik/analitik optimallashtirish integratsiyasiga asoslangan ushbu dasturiy ta'minot amaliyotda joriy etish uchun to‘liq tayyor.

Istiqbolda mazkur dasturiy majmuani Do‘stlik magistral kanalidagi raqamli SCADA tizimi bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri integratsiya qilish ko‘zda tutilgan. IoT (Internet of Things) suv sathi datchiklaridan kelayotgan real vaqt ma'lumotlarini LP algoritmi orqali tezkor tahlil qilish hamda kunlik suv ajratish rejasini DP algoritmi yordamida global optimallashtirish respublikamiz suv xo‘jaligini to‘liq raqamlashtirish sari qo‘yilgan muhim qadam bo‘ladi. Ushbu metodologiyani nafaqat Do‘stlik kanalida, balki O‘zbekistonning boshqa yirik magistral kanallarida ham muvaffaqiyatli qo‘llash mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Tkachyev, A.A., Olgarenko, I.V. Urgent problems of water distribution management in main canals of irrigation systems // Scientific journal of Russian Scientific Research Institute of land improvement problems. 2021. Vol. 11, no.2.P. 1-23.

2. Jiang, Y., Xiong, L., Yao, F., Xu, Z. Optimizing regional irrigation water allocation for multi-stage pumping-water irrigation system based on multilevel optimization-coordination model. // Journal of Hydrology. 2019. № 4. Vol. 100038. 1-13.P.

3. Uteuliev N.U., KutlimuratovYu.K. Algorithm of solution of one two-criteria stochastic ecology-economic problems of agricultural production // European science review. - Austria, 2017. - № 9-10. - rr. 141-143.

4. N.U. Uteuliev , A.J. Seytov, Yu.Q. Qutlimuratov , B.N. Begilov , Z.B. Madreymova , M. Esonturdiyev. Stochastic two-criteria model for optimising the location of agricultural production under conditions of soil saturation / Informational technologies and mathematical modelling

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17

(ITMM-2024): Proceedings of the 23rd International Conference named after A. F. Terpugov (2024 October, 20-26). - Tomsk: Tomsk State University Publishing, 2024. - 244 p.

5. Ajjaz Maqbool Dar, Mushtaq Ahmad Lone. Solving stochastic agricultural production planning problems by using fuzzy goal programming // Skuast Journal of Research Year : 2023, Vol. 25(3). P. 1-8.: 10.5958/2349-297X.2023.00049.1

6. Yu. Qutlimuratov, B. Jarilkanov, Z. Madreymova. Ecological and economic model of plant placement based on soil salinity monitoring // AIP Conf. Proc. 3147, 030020 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0210750

7. Ermolaev, Yu. M. Metodi stoxasticheskogo programmirovaniya / Yu. M. Ermolaev. - M.: Nauka, 1976. - 240 s.

8. Golshteyn E.G. Vipukloe programmirovanie (elementi teorii). - M.: FIZMATLIT, 2005. - 368 s.

9. Yudin D.B., Golshteyn E.G. Lineynoeprogrammirovanie (teoriya, metodiiprilojeniya). - Moskva: «Nauka», 1969.

10. Turaev, R., Seytov, A., K. Hollozov, B., Haydarova, R., Kuldasheva, S. Algorithms for planning water management in irrigation systems. AIP Conference Proceedings, 2024, 3045(1), 040040.

11. Seytov, A., Abdurakhmanov, O., Kakhkhorov, A., Karimov, D., Abduraimov, D. Modeling of two-dimensional unsteady water of movement in open channels. E3S Web of Conferences, 2024, 486, 01023.

12. Turaev, R., Seytov, A., Kuldasheva, S., Nortojiev, U. Algorithms for calculating limits in water management in irrigation systems. E3S Web of Conferences, 2023, 401, 02016.

13. Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Usage of finite element method for modeling twodimensional unsteady water movement in open channels. AIP Conf. Proc. 3147, 030034 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0210332.

14. Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov. Development of algorithms for modelling water management processes on main canals. AIP Conf. Proc. 3147, 030032 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0210329.

15. Aybek Seytov; Azimjon Khusanov; Azam Khudayberdiev; Niyetbay Uteuliev; Sherzod Yadgarov; Dauletyar Seytimbetov; Otabek Ergashev; Olim Abduraxmanov. Development of algorithms for solving problems of optimisation of water resource management in irrigation systems. AIP Conf. Proc. 3147, 030033 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0210330

16. Aybek Seytov; Lyudmila Varlamova; Sayfiddin Bahromov; Yusup Qutlimuratov; Bakhadir Begilov; Seytimbetov Dauletyar. Optimal management of water resources of large main canals with cascades of pumping stations. AIP Conf. Proc. 3147, 030022 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0210523

17. Varlamova Lyudmila, P., Seytov Aybek, J., Bahromov Sayfiddin, A., Shokhjakhon Sh, B., Mirzaolimov Akhmadjon, K. Digital Agricultural Ecosystem: Revolutionary Advancements in Agriculture, 2024, страницы 339-368

18. Kabulov, A (Kabulov, Anvar); Normatov, I (Normatov, Ibrokhimali); Seytov, A (Seytov, Aybek); Kudaybergenov, A (Kudaybergenov, Adilbay). 2020 IEEE international iot, electronics and mechatronics conference (IEMTRONICS 2020). Страница187-190

19. Rakhimov, S. (Rakhimov, Shavkat); Seytov, A (Seytov, Aybek); Rakhimova, N (Rakhimova, Nasiba) ; Xonimqulov, B (Xonimqulov, Bahrom). Mathematical models of optimal distribution of water in main channels// 2020 IEEE 14th international conference on application of information and communication technologies (AICT2020) DOI:10.1109/AICT50176.2020.9368798

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.17

20. Khaydar, D., Chen, X., Huang, Y. et al. Investigation of crop evapotranspiration and irrigation water requirement in the lower Amu Darya River Basin, Central Asia. J. Arid Land 13, 23-39 (2021). https://doi.org/10.1007/s40333-021-0054-9.

21. Ernazar J. Makhmudov, Ilhomjon E. Makhmudov & Lenzi Z. Sherfedinov Problems of Water Resource Management in Central Asia. Transboundary water resources: a foundation for regional stability in central asia. pp. 11-28. DOI 10.1007/978-1-4020-6736-5_1