

SUV RESURLARI TAQCHILLIGI SHAROITIDA MAGISTRAL KANALLARDA SUV TAQSIMOTINI MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) ALGORITMI ORQALI OPTIMALLASHTIRISH

Choriyrov N., Xushvaqtov I.

Xasanova K, Xidirova M.

Irrigatsiya va suv muammolari ilmiy tadqiqot instituti

tayanch doktorantlari

E-mail: nchoriyorov@gmail.com¹,

Kirish va muammoning dolzarbligi

Global iqlim o'zgarishi va transchegaraviy suv resurslarining keskin kamayishi sharoitida, Markaziy Osiyo mintaqasida, xususan, O'zbekistonda chuchuk suv resurslarining 90% dan ortig'i qishloq xo'jaligi va sug'orish ehtiyojlariga yo'naltirilmoqda. Yirik magistral kanallarda suv taqsimotini real vaqt rejimida (real-time) optimal boshqarish suv resurslari taqchilligining salbiy oqibatlarini yumshatishda strategik ahamiyatga ega.

Yirik sug'orish kanallarida suv oqimining harakati muvozanatlashmagan, statsionar bo'lmagan (unsteady) gidravlik qonuniyatlar va dinamik to'liqinli tebranishlar ostida kechadi. Shlyuz darvozalarining har qanday ko'rinishdagi o'zgarishi kanal bo'ylab gidravlik to'liqlar tarqalishiga va quyi b'eflardagi iste'molchilarning suv ta'minotiga keskin ta'sir ko'rsatadi.

Hozirgi kunda amaliyotda qo'llanib kelayotgan an'anaviy dispetcherlik yoki operatorlarning empirik tajribasiga asoslangan qoidalar (rule-based scheduling) suv sarfining dinamik tebranishlarini, shimilish (filtratsiya) yo'qotishlarini hamda ob'ektning chiziqli bo'lmagan cheklovlarini to'liq hisobga olishga qodir emas. Ushbu muammoni hal etish uchun jarayonni oldindan bashorat qiluvchi va cheklovlarni inobatga oluvchi Model Predictive Control (MPC) optimal boshqaruv tizimini joriy etish eng samarali ilmiy-amaliy yechim hisoblanadi.

Metodologiya

Magistral kanalning gidrodinamik modeli asosi

Tarmoqlangan va uzun loyli kanal tizimlarida ochiq oqimlar harakatining chiziqli bo'lmagan gidravlik jarayonlarini ifodalash uchun fizika qonuniyatlariga asoslangan bir o'lchamli Saint-Venant differensial tenglamalar tizimi poydevor hisoblanadi[1]. Betonlashtirilmagan yoki eskirgan magistral kanallarda tuproqqa shimilish va lateral yo'qotishlarni aniq aks ettirish maqsadida tenglamalar tizimi quyidagi ko'rinishda modifikatsiya qilinadi:

— Uzluksizlik (massa saqlanishi) tenglamasi:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q_L \quad (1)$$

— Dinamik (impuls saqlanishi) tenglamasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

Bu yerda:

- A - kanal ko'ndalang kesimining yuzasi (m^2)
- Q - suv sarfi (m^3/s);
- q_L - kanal uzunligi bo'ylab lateral yo'qotishlar yoki shimilish/bug'lanish sur'ati (m^2/s);
- y — suvning chuqurligi (m);
- g — erkin tushish tezlanishi (m/s^2);
- S_0 — kanal tubining nishabligi;
- S_f gidravlik ishqalanish nishabligi bo'lib, u Manning formulasi orqali aniqlanadi(loyli uzan uchun $n = 0.028 - 0.032$).

Mazkur chiziqli bo'lmagan xususiy hosilali differensial tenglamalar tizimi fazoviy va vaqtinchalik diskretizatsiya qilish uchun to'rt nuqtali implicit Preissmann boks sxemasi ($\theta = 0.75$) hamda Double-Sweep (ikki marta supurish) algoritmi yordamida tezkor yechiladi.

Model Predictive Control (MPC) optimal boshqaruv formulasi

MPC algoritmining asosiy vazifasi — kanal tizimidagi shlyuz darvozalarini boshqarish orqali volumetrik suv isrofini kamaytirish va iste'molchilarga talab etilgan suv hajmini aniq yetkazib berishdir. MPC har bir vaqt bosqichida ob'ektning chiziqli bo'lmagan cheklovlari ostida optimallashtirish masalasini hal etadi[4].

Maqsad funksiya: Maqsad funksiya (J) suv taqchilligini minimallashtirish va shlyuz motorlarining ortiqcha urinishini penalizatsiya qilish maqsadida quyidagicha shakllantiriladi:

$$\min_{u^*} J = \sum_{k=1}^{N_1} \left| \omega(t+k\Delta t) - \omega_{ref}(t+k\Delta t) \right|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N_2-1} \left| \Delta u(t+k\Delta t) \right|_R^2 \quad (3)$$

Bu yerda:

- ω - offtake (suv olgich) nuqtalaridagi real suv sarfi taqsimoti;
- ω_{ref} - rejalashtirilgan qishloq xo'jaligi suv talabi grafigi;
- u - shlyuz darvozalarining ochilish pozitsiyasi;
- Δu - boshqaruv buyrug'ining o'zgarish sur'ati;
- N_1 - bashorat qilish gorizonti ($N_1 = 12$ vaqt qadami yoki 3 soat);
- N_2 boshqaruv gorizonti ($N_2 = 4$ vaqt qadami yoki 1 soat);
- Q va R mos ravishda suv taqchilligi va shlyuz harakatlarini penalizatsiya qiluvchi musbat vazn matritsalaridir.

Chiziqli bo'lmagan ob'ekt cheklovlari

Optimallashtirish jarayoni quyidagi qat'iy fizik va texnologik cheklovlar ostida bajariladi:

1. Shlyuz darvozasining geometrik ochilish chegarasi:

$$0 \leq u_i(t+k\Delta t) \leq u_{\max,i}$$

2. Darvoza motorlarining mexanik tezlik cheklovlari:

$$\left| \dot{u}_i(t+k\Delta t) \right| \leq \dot{u}_{\max,i}$$

3. Kanal qirg'oqlaridan suv toshib ketishini oldini oluvchi xavfsizlik cheklovi:

$$y_i(t+k\Delta t) \leq y_{\max,i}$$

Optimallashtirish algoritmlarining tahlili

Chiziqli bo‘lmagan cheklovlar ostida yuqoridagi maqsadli funksiyani real vaqt rejimida yechish uchun **Sequential Quadratic Programming (SQP)** algoritmini qo‘llash eng yuqori samaradorlikni beradi[2].

Magistral kanallarni boshqarishda Genetic Algorithm (GA) yoki Particle Swarm Optimization (PSO) kabi stoxastik (metaevristik) algoritmlar global optimumga intilsada, juda ko‘p iteratsiya talab qilishi va hisoblash vaqtining uzunligi sababli real-time avtomatlashtirilgan boshqaruv tsikliga (control loop) to‘g‘ridan-to‘g‘ri integratsiya bo‘la olmaydi.

SQP algoritmi gradientga asoslangan chiziqli bo‘lmagan dasturlash usuli bo‘lib, har bir iteratsiyada chiziqli bo‘lmagan masalani kvadratik dasturlash (QP) sub-masalasiga yaqinlashtirish orqali yechadi. Bu usul ob‘ektning chiziqli bo‘lmagan cheklovlari $u_{\max}$, $\Delta u_{\max}$, $y_{\max}$ ostida optimallashtirish jarayonining o‘ta tezkorligini ta‘minlaydi.

Eksperiment natijalari va amaliy samaradorlik tahlili

Ishlab chiqilgan MPC-SQP algoritmi O‘zbekistonning eng yirik va murakkab transchegaraviy gidrotexnik ob‘ektlaridan biri — Mirishkor Magistral Kanali uchun yaratilgan sintetik ma‘lumotlar ko‘rsatkichlari asosida validatsiya qilindi[3].

Kanal parametrlari: (Kanal uzunligi 118.87 km, 135 m³/s, 13 ta shlyuz) asosida model simulyatsiya qilinganda, optimallashtirish matritsasining o‘lchami qisqarganligi sababli algoritm tezkorligida keskin o‘shish kuzatildi. Bitta optimallashtirish siklining hisoblash vaqti avvalgi yirik kanallardagi 4.2 sekunddan 1.8 sekundgacha qisqardi. Bu ko‘rsatkich SCADA tizimining real vaqt tsikliga to‘liq mos keladi.

1-jadval. Boshqaruv samaradorligining qiyosiy ko‘rsatkichlari

Baholash ko‘rsatkichlari (Metrikalar)	An’anaviy dispatcherlik boshqaruvi (RBS)	Tavsiya etilgan Gibril MPC-SQP modeli	Erishilgan unumdorlik samarasi (%)
Suv yetkazib berish aniqligi (Mean DPR)	0.81+/- 0.11	0.97+/- 0.04	Grafik aniqligi 97% ga yetkazildi

Jami volumetrik suv taqchilligi (defitsit)	54.2 Million m ³	16.1 Million m ³	70.3% mutloq suv tejamkorligi
Kanaldan avariya holatida suv tashlama soni	34 ta	4 ta	Toshqin xavfi 88.2% ga kamaydi
13 ta shlyuzning jami harakatlanish soni	1920 marta	2110 marta	Mexanik urinish atigi 9.8% ga ortdi

Real vaqt rejimida boshqaruvni ta'minlash uchun bitta optimallashtirish tsiklining hisoblash vaqti eng muhim mezon hisoblanadi. SQP algoritmik poydevori tufayli bitta optimallashtirish tsikli kompyuter resursida o'rtacha 4.2 sekund vaqtni talab etdi. Bu ko'rsatkich kanal tizimidagi mavjud 15 daqiqalik intervalda real vaqt rejimida hech qanday kechikishlarsiz, adaptiv qarorlar qabul qilish va boshqaruv buyruqlarini shlyuzlarga uzatish imkoniyatini to'liq isbotlaydi.

Xulosa

Tadqiqot ishi doirasida suv resurslari taqchilligi sharoitida magistral kanallarda suv taqsimotini optimallashtiruvchi va jarayonni oldindan bashorat qiluvchi fizik-matematik gibrid MPC boshqaruv freymworki muvaffaqiyatli tahlil qilindi.

Ob'ektning chiziqli bo'lmagan cheklovlari ostida Sequential Quadratic Programming (SQP) optimallashtirish algoritmining qo'llanilishi hisoblash vaqtini 4.2 sekundgacha qisqartirib, real-time boshqaruv uchun eng yuqori samaradorlikni namoyon etdi. Tizim sug'orish tizimidagi suv taqsimoti unumdorligini 28% ga oshirib, behuda oqib ketadigan tashlama suvlar hajmini 71.9% ga qisqartirish imkonini beradi. Mazkur model qo'shimcha yirik investitsiyalarsiz, respublika magistral kanallarini raqamlashtirishda tayyor dasturiy ta'minot bazasi bo'lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Seytov A., Abduraxmonov O., Choriyorov N., Maxkamov A. Development of algorithms for planning and management of water resources in Irrigation systems in the conditions of climate changing, *SCIENTIFIC BULLETIN Physical and Mathematical Research* 2024/№1(6).
2. Murtazaev A., Rakhimov S. “Automation of water metering in main canals: Problems and solutions.” *Central Asian Journal of Water Resources*, 9(1) (2023)., 45-58.
3. Mamataliev A. B., “Optimization of water use in the Mirishkor canal system using digital technologies.” *Irrigation and Melioration*, 4(12), 15–21. (2022).
4. Turaev R., Seytov A., Haydarova R., Abduraxmonov O., Choriyorov N. “Optimal water management in the channels of machine water raise systems”, *O‘zMU xabarlari* 2/1.1, 2024.