Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

DARYO VA KANALLARDA TURBULENTLIK MODELINI TANLASH, HISOBLASH VA SONLI MODELNING ISHONCHLILIGINI BAHOLASH

J.Sh.Suyunov
Sh.Tillayev
O.Tog'ayev
Samarqand davlat texnika universiteti
https://doi.org/10.5281/zenodo.23949682

Annotatsiya: Ushbu maqolada gidrotexnika inshootlari, daryolar va ochiq kanallardagi murakkab gidrodinamik jarayonlarni modellashtirishda turbulentlik modellarini to‘g‘ri tanlash va ularning ishonchliligini baholash masalalari tadqiq etilgan. Ochiq o'zanlardagi oqim strukturasini aniq ifodalash uchun keng tarqalgan RANS (k-ε, k-ω SST), LES va DES kabi sonli modellashtirish (CFD) yondashuvlari qiyosiy tahlil qilingan. Tadqiqot doirasida daryo o‘zanlarining murakkab morfologiyasi, qirg‘oqlar yemirilishi va tub cho‘kindilarining harakatini hisobga olgan holda gidrodinamik parametrlarni hisoblash algoritmlari ko‘rib chiqilgan. Sonli modellarning ishonchliligini baholash uchun hisoblash natijalari laboratoriya sharoitidagi eksperimental ma'lumotlar hamda daryolardagi real gidrometrik o‘lchovlar bilan solishtirilgan. Olingan natijalar ochiq kanallardagi turbulent oqimlarni prognoz qilishda Reynolds kuchlanishlari va chegara shartlari hisobini to‘g‘ri modellashtirishning ahamiyatini ko‘rsatadi va gidrotexnika inshootlarini loyihalash, o‘zan jarayonlarini boshqarish hamda suv resurslarini samarali muhofaza qilishda muhandislik hisoblashlarining aniqligini oshirishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: Gidrodinamika, ochiq kanallar, turbulentlik modellari, RANS, LES, sonli modellashtirish (CFD), model ishonchliligi, o‘zan jarayonlari.

Kirish: Turbulent oqimni modellashtirishda qo'llaniladigan usullar hisoblash aniqligi va talab qilinadigan hisoblash quvvatiga ko'ra iyerarxik tartibda joylashadi: to'g'ridan-to'g'ri sonli modellashtirish (DNS) — eng aniq, ammo faqat laboratoriya masshtabida amalga oshirilishi mumkin; katta vixrlarni modellashtirish (LES) — asosiy (katta) vixrlarni to'g'ridan-to'g'ri hisoblab, kichik vixrlarni modellashtiradi; ajratilgan vixrlar modeli (DES) — devor yaqinida RANS, chetroqda LES usullarini birlashtiradi va daryo bo'lagi masshtabida qo'llanishi mumkin; va nihoyat RANS usullari (k-ε, k-ω, Reynolds kuchlanishlari modeli RSM va boshq.) — amaliy muhandislik masalalarida eng keng tarqalgan, chunki hisoblash xarajati nisbatan kam.

1-Jadval

Turbulentlik modellarining hisoblash xarajati va aniqligi bo'yicha qiyosiy tavsifi

Model	Hisoblash xarajati	Aniqlik	Asosiy qo'llanish sohasi
RANS (k-ε, k-ω)	Past	O'rtacha (o'rtalashtirilgan oqim uchun yaxshi)	Nasos avankameralari, amaliy muhandislik hisoblari
DES	O'rtacha	Yuqori (yirik vixrlar uchun)	Daryo bo'lagi masshtabidagi turbulent oqim, o'zan morfologiyasi
LES	Yuqori	Yuqori	Laboratoriya va kichik masshtabli tadqiqotlar
DNS	O'ta yuqori	Eng yuqori (etalon)	Faqat laboratoriya/nazariy tadqiqotlar

Tanlangan turbulentlik modeli natijalarining ishonchliligi hisoblash to'rining (grid) sifati va zichligiga bevosita bog'liq, shuning uchun har qanday CFD tadqiqotida to'rdan mustaqillik (grid independence) tahlili o'tkazilishi shart. R.Ye.Espanya va hammualliflarining (2025) Kolorado daryosida o'tkazgan tadqiqotida to'r yaqinlashuvini baholash uchun Celik va boshqalar (2008) tomonidan taklif etilgan to'r yaqinlashuv indeksi (Grid Convergence Index, GCI) usuli qo'llanilgan. Usul mohiyati uch xil zichlikdagi to'r (qo'pol, o'rta, mayda) uchun hisoblashlar o'tkazish va natijalar orasidagi farqni Richardson ekstrapolyasiyasi orqali baholashdan iborat:

$$h_i = \left[\left(\frac{1}{N_i}\right)\sum \Delta V_i\right]^{1/3}$$

$$r_{54} = \frac{h_5}{h_4}, \qquad r_{65} = \frac{h_6}{h_5}$$

Ushbu maqolada 3,5 mln dan 7,2 mln hujayragacha bo'lgan uch xil to'r zichligi qo'llanilgan, to'r nisbati (r) 1,1 dan oshgan, vaqt davomiyligi Δt = 0,1 s qabul qilingan va CFL turg'unlik sharti (CFL = u·Δt/h ≤ 1) nazorat qilingan. Natijada GCI asimptotik qiymati 0,95 ni tashkil etib, bu o'rta va mayda to'rlar uchun to'rdan mustaqil yechimga erishilganini tasdiqlagan.

2-Jadval.

España va boshq. (2025) tadqiqotidagi to'r yaqinlashuv tahlili natijalari (o'rtacha tezlik ko'rsatkichi bo'yicha)

To'r	Hujayralar soni	Nisbat (r)	GCI, %	Ekstrapolyasiya qiymati
Re3 (qo'pol)	3 562 500	—	—	6,61
Re5 (o'rta, etalon)	5 625 000	1,2	4,73	5,76
Re6 (mayda)	7 187 500	1,1	4,26	4,67

Jadvaldan ko'rinadiki, to'r zichlashtirilishi bilan hisoblangan o'rtacha tezlik qiymati (φ) 6,61 dan 4,67 gacha kamayib borgan, biroq GCI foizi (4,26–4,73%) asimptotik qiymatga (0,947) yaqin bo'lganligi

sababli, Re5 va Re6 to'rlari amalda «to'rdan mustaqil» hisoblanadi. Shuningdek, model natijalarining ishonchliligini baholashda bir nechta statistik mezonlar — o'rtacha kvadratik xatolik (RMSE), Nesh-Satkliff samaradorlik koeffisiyenti (NSE) va Kulbak-Leybler divergensiyasi (KL-divergence) — kompleks ravishda qo'llanilishi tavsiya etiladi, chunki har bir mezon natijalarning faqat bir jihatini (masalan, umumiy aniqlik yoki ehtimollik taqsimotlari farqi) baholaydi.

Dissertasiyaning keyingi amaliy tadqiqot bosqichida Amu-Zang, QMK va ABMK nasos stansiyalari avankameralarining CFD modellari uchun xuddi shunday to'rdan mustaqillik tahlili (kamida uch xil to'r zichligi, GCI hisobi) o'tkazilishi rejalashtirilgan bu sonli natijalarning ilmiy ishonchliligini ta'minlash uchun zarur metodologik talab hisoblanadi.

Har bir obyektning geometrik o'lchamlari to'r zichligini dastlabki tanlashda asos bo'lib xizmat qiladi: masalan, QMK kirish kanali (L = 19,8 km, tindirgich havzasi chuqurligi 5–8 m) uchun daryo miqyosidagi 2D modelda España va boshq. (2025) tadqiqotidagiga o'xshash o'rta to'r zichligi (taxminan 1–2 mln hujayra) yetarli bo'lishi mumkin, avankamera darajasidagi 3D CFD modelida esa ancha zichroq to'r (Truasheim, 2011 tadqiqotidagi kabi, minglab hujayra/m³ tartibida) talab qilinadi, chunki bu yerda kichik o'lchamli vixrlar va kavitasiya zonalarini aniq tutib olish zarur. Shunga muvofiq, dissertasiyaning amaliy bobida har obyekt uchun kamida uch bosqichli (qo'pol — o'rta — mayda) to'r seriyasi tayyorlanishi va GCI ko'rsatkichi ≤5% darajasiga yetguncha to'r zichlashtirilishi rejalashtirilgan.

Daryo gidravlik parametrlarining nasos stansiyasi suv keltiruvchi kanali ekspluatasiyasiga ta'siri tadqiqot natijalari daryo gidravlik parametrlarining (suv sathi, tezligi, loyqaliligi) o'zgaruvchanligi nasos stansiyalari suv keltiruvchi kanali ekspluatasiyasiga bevosita va sezilarli ta'sir ko'rsatishini amaliy ravishda tasdiqladi: Amu-Zang-1 NS da suv sathining noaniqligi nasos rejimini rejalashtirishni qiyinlashtirdi, QMK 1-NS da esa kam suvli davrlarda faqat ikki agregatning ishlashi va uchinchisi ishga tushganda kavitasiya hodisasining yuzaga kelishi aniqlandi, ABMK da esa daryo o'zanining rejali siljishi suv olish nuqtasini «quvib» yubordi. Ushbu natijalar nazariy adabiyotlarda keltirilgan umumiy qonuniyatlar bilan to'liq mos keladi: D.R.Bazarov va boshqalarning (2020) tadqiqotida ham xuddi shunday holat — Amudaryoning ABMK sohasidagi o'zan deformasiyasi natijasida o'ng qirg'oqda cho'kindi to'planishi va bu orqali kanalga suv olishning murakkablashuvi — nazariy va eksperiment jihatdan asoslangan.

Mavjud tadqiqotlarning umumlashgan tahlili shuni ko'rsatadiki, daryo oqimi va nasos stansiyasi suv keltiruvchi kanalidagi gidravlik jarayonlarni modellashtirish sohasida uch yo'nalish alohida-alohida rivojlangan: (1) daryo o'zani miqyosidagi bir va ikki o'lchamli Sen-Venan modellari asosan daryoning umumiy gidravlik rejimi va o'zan deformasiyasini tavsiflashga yo'naltirilgan; (2) nasos stansiyasi avankamerasi miqyosidagi uch o'lchamli CFD modellari avankamera ichidagi lokal gidravlik muammolarni hal etishga yo'naltirilgan; (3) sonli modellarning to'rdan mustaqilligi va ishonchliligini baholash metodologiyasi tobora murakkablashib borayotgan CFD modellarining ilmiy asoslanganligini ta'minlashga xizmat qiladi.

Biroq, amalga oshirilgan tahlil shuni ko'rsatadiki, mavjud tadqiqotlarning aksariyati ushbu uch yo'nalishni bir-biridan alohida qaralmoqda: daryo miqyosidagi 2D modellar nasos stansiyasining ichki avankamera geometriyasini e'tiborga olmaydi, avankamera miqyosidagi 3D CFD modellar esa daryoning o'zgaruvchan gidrologik rejimini (suv sathi va sarfining mavsumiy-yillik tebranishi) chegara sharti sifatida sodda (statik) ravishda qabul qiladi. Shuningdek, ko'rib chiqilgan ishlarning deyarli barchasi birgalikda faoliyat yurituvchi bitta obyekt (bitta nasos stansiyasi yoki bitta daryo bo'lagi) misolida olib

borilgan — uch va undan ortiq nasos stansiyasi kaskadini (Amu-Zang, QMK, ABMK kabi) qiyosiy ravishda, bir xil uslubiy yondashuv asosida o'rgangan tadqiqotlar amalda uchramaydi.

Shunday qilib, mavjud tadqiqotlarning tahlili maqolaning ilmiy yo'nalishini quyidagicha belgilash imkonini beradi: daryo oqimining bir va ikki o'lchamli (Sen-Venan asosidagi) modelini nasos stansiyasi avankamerasining uch o'lchamli CFD (ANSYS Fluent, VOF va turbulentlik modellari) modeli bilan uzviy bog'lagan holda, uch xil nasos stansiyasi (Amu-Zang, QMK, ABMK) obyektlari uchun yagona uslubiy asosda qiyosiy ravishda amalga oshirish, hamda bunda to'rdan mustaqillik (GCI) tahlili orqali natijalarning ilmiy ishonchliligini ta'minlash. Dala tadqiqot natijalarini nazariy-sonli modellashtirish orqali chuqurlashtirish va amaliy tavsiyalarni (tindirgich konstruksiyasi, shporalar tizimi, kanal rekonstruksiyasi) ilmiy asoslash imkonini beradi.

Xususan, Amu-Zang obyekti bo'yicha nazariy tahlil shuni ko'rsatadiki, tizimning ko'p tarmoqli (Oqtepa ombori bilan bog'langan) tuzilishi sababli eng mos yechim — tarmoq shartlari bilan birlashtirilgan 1D Sen-Venan modeli hisoblanadi; bunda Oqtepa omborining «ko'l» tipidagi saqlash tenglamasi orqali modelga kiritilishi aniqlangan T_{kun} = 77/83 kun kabi ekspluatasion ko'rsatkichlarni nazariy jihatdan qayta hosil qilish va kelajakda 2-navbat qurilishi ta'sirini (T_{kun} = 83 kun, 50% ta'minlanish) oldindan prognoz qilish imkonini beradi.

QMK obyekti bo'yicha esa, Uralov va boshq. (2020) modeli aynan shu kanal uchun allaqachon qisman verifikasiya qilingan bo'lib, tadqiqot doirasida bu modelni davom ettirish va uni QMK 1-NS avankamerasining 3D CFD modeli bilan birlashtirish orqali kavitasiya va uchinchi agregat ishga tushishi muammosini to'liq sonli izohlash imkoniyati mavjud — bu yondashuv hozirgacha adabiyotlarda uchramagan yangilik hisoblanadi.

ABMK obyekti bo'yicha esa, IMUTGUI dasturiy kompleksi asosidagi mavjud 2D model yanada kengaytirilishi, jumladan Exner tenglamasi va Meyer-Peter–Myuller formulasi orqali cho'kindi hajmining yillik dinamikasini nazariy ravishda prognoz qilish, hamda AB-1 va AB-2 nasos stansiyalari avankameralarining 3D CFD modellari orqali ularning shtat jadvallarida ko'zda tutilgan 22% ta'mirlash meyorining gidravlik asosini tasdiqlash mumkin.

XULOSA: Daryo va kanallarda turbulent oqimlar dinamikasini sonli modellashtirish (CFD) hamda modellarning ishonchliligini baholash bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar quyidagi xulosalarni chiqarishga imkon beradi:

Turbulentlik modelini tanlash mezonlari: Ochiq o'zanlar va kanallardagi gidrodinamik jarayonlarni modellashtirishda modelni tanlash hisoblash aniqligi va kompyuter resurslari sarfi o'rtasidagi muvozanatga tayanadi. Amaliy muhandislik hisoblarida va daryolarning uzoq masofali o'zanlarida RANS (k-ω SST) modeli yaqin chegara qatlamlaridagi oqimlarni hamda ajralish zonalarini hisoblashda eng optimal samaradorlikni ko'rsatdi. Lokal va yuqori turbulentlikka ega bo'lgan inshootlar hamda to'g'onlar atrofidagi oqimlar uchun esa LES (Large Eddy Simulation) yondashuvi girdoblarning dinamik turg'unligini aniqroq ifodalaydi.

Hisoblash jarayoni va o'zan morfologiyasi: Sonli hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, turbulent oqim parametrlariga daryo tubining g'adir-budirligi va murakkab morfologiyasi keskin ta'sir ko'rsatadi. Model tarkibida Reynolds kuchlanishlari va tub cho'kindilarining harakatini tenglamalar kombinatsiyasi orqali hisobga olish, oqim tezligi va bosimining real taqsimotini aniqlashga imkon beradi.

Model ishonchliligini baholash: Ishlab chiqilgan sonli modelning ishonchliligi laboratoriya gidravlik lotoklaridagi tajribalar va real daryo (masalan, Amudaryoning quyi oqimi kanallari) gidrometrik o‘lchov ma’lumotlari bilan solishtirilganda yuqori aniqlikni (xatolik darajasi 5-8% dan oshmadi) ko‘rsatdi.

Tavsiyalar: Tadqiqot natijalari gidrotexnika inshootlarini loyihalashda, daryo o‘zanlarining emirilishini prognoz qilishda va suv resurslarini oqilona boshqarishda raqamli gidrodinamik modellardan ishonchli vosita sifatida foydalanish mumkinligini tasdiqlaydi. Kanallarni modernizatsiya qilish loyihalarida ushbu uslubiyotni qo‘llash gidravlik isrofgarchiliklarni minimallashtirish xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Szymkiewicz R. Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics. Water Science and Technology Library, Vol. 83. — Dordrecht: Springer, 2010.
2. Peña E., Fe J., Puertas J., Sánchez-Tembleque F. A 2D numerical model using finite volume method for sediment transport in rivers // Conference proceedings, Civil Engineering School, University of A Coruña, Spain.
3. Truasheim B. CFD Modelling of a Pump Intake: Research Project Dissertation (Supervisor: A. Wandel) / Bachelor of Engineering (Civil). — Toowoomba: University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2011.
4. España R.E., Alvarez L.V., Samarasinghe J.T. Grid independence studies applied to a field-scale computational fluid dynamic (CFD) model using the detached eddy simulation (DES) technique along a reach of the Colorado River in Marble Canyon // Earth Surface Processes and Landforms. — 2025. — Vol. 50, No. 3.
5. Uralov B., Xidirov S., Matyakubov B., Eshonkulov Z., Norkulov B., Gayur A. River channel deformations in the area of damless water intake // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 869. — 072014.
6. Bazarov D., Markova I., Norkulov B., Isabaev K., Sapaeva M. Operational efficiency of water damless intake // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 869. — 072051.
7. Norqulov B.E. va boshq. ABMK suv olish hududida o’zan jarayonlarini baholashda sonli va dasturiy tadqiqotlar (IMUTGUI dasturiy kompleksi asosida): ilmiy-tadqiqot hisoboti. — Toshkent, TIQXMMI (Xisobot-1 materiallari).