UO‘K (UDC): 621.311.24 621.224

PAST BOSIMLI SUV MUHITIDA MIKROGES QURILMALARINING TASNIFI VA ISHLASH PRINSIPLARI TAHLILI

Suvonov Jaxongir Xusniddin o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti doktaranti

Annotatsiya. Ushbu maqolada past bosimli va erkin oqimli suv manbalarida elektr energiyasi ishlab chiqarishga mo‘ljallangan mikro gidroelektr stansiyalari (mikroGES) qurilmalarining zamonaviy tasnifi, ularning energetik xususiyatlari hamda gidrodinamik ishlash prinsiplari atroflicha tahlil qilingan. O‘zbekiston Respublikasining irrigatsiya tarmoqlari, magistral va xo‘jaliklararo kanallari hamda tashlama gidrouzellaridagi oqim parametrlariga mos keluvchi turbina turlari o‘rganilgan. Bosimli hamda to‘g‘onsiz erkin oqimning kinetik energiyasidan foydalanuvchi gidrokinetik qurilmalarning qiyosiy ko‘rsatkichlari keltirilib, past tezlikli suv oqimlarida gidrodinamik samaradorlikni (FIK) oshiruvchi konfuzor-diffuzor qobiqlari va ko‘p qutbli past aylanmali generatorlarning ilmiy-texnik afzalliklari asoslab berilgan.

Kalit so‘zlar: mikroGES, kichik gidroenergetika, gidrokinetik turbina, past bosimli oqim, irrigatsiya kanallari, ishchi g‘ildirak, gidravlik FIK, Betts chegarasi, energetik samaradorlik.

Аннотация. В данной статье проведен детальный анализ современной классификации, энергетических параметров и гидродинамических принципов работы установок микрогидроэлектростанций (микроГЭС), предназначенных для генерации электроэнергии на низконапорных и свободнобезнапорных водотоках. Рассмотрены типы гидротурбин, адаптированные к гидрологическим условиям ирригационных сетей, магистральных каналов и водосбросных сооружений Республики Узбекистан. Приведены сравнительные показатели традиционных низконапорных и безнапорных гидрокинетических турбин. Научно обоснованы методы повышения гидродинамической эффективности установок в низкоскоростных потоках за счет применения концентраторов потока (конфузорно-диффузорных систем) и тихоходных многополюсных генераторов на постоянных магнитах.

Ключевые слова: микроГЭС, малая гидроэнергетика, гидрокинетическая турбина, низкий напор, ирригационные каналы, рабочее колесо, гидравлический КПД, предел Бетца, энергоэффективность.

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the modern classification, energy characteristics, and hydrodynamic operating principles of micro-hydroelectric power plants (micro-HPP) designed for electricity generation in low-head and free-flow open-channel watercourses. Turbine

technologies adapted to the hydrological conditions of irrigation networks, main canals, and water discharge structures of the Republic of Uzbekistan are thoroughly evaluated. A comparative assessment of conventional low-head turbines and hydrokinetic systems operating without dams is presented. Furthermore, engineering and theoretical solutions for enhancing hydrodynamic conversion efficiency in low-velocity streams—specifically through flow concentrators (convergent-divergent shrouds) and multi-pole direct-drive permanent magnet synchronous generators—are systematically established.

Keywords: micro-HPP, small hydropower, hydrokinetic turbine, low head, irrigation canals, runner, hydraulic efficiency, Betz limit, energy efficiency.

KIRISH.

Zamonaviy jahon energetikasining eng ustuvor vazifalaridan biri qazilma uglevodorod yoqilg‘ilariga bo‘lgan qaramlikni kamaytirish, atrof-muhitga tashlanayotgan issiqxona gazlarini qisqartirish hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan (QTEM) kompleks foydalanish darajasini oshirishdan iborat. Ushbu yo‘nalishda gidroenergetika eng barqaror, boshqariluvchan va yuqori resurs bazasiga ega bo‘lgan tarmoq hisoblanadi. Biroq yirik daryolarda ulkan gidroelektr stansiyalarni (GES) barpo etish katta maydonlarning suv ostida qolishiga, qishloq xo‘jaligi yerlarining qisqarishiga, murakkab ekologik siljishlarga hamda juda yuqori kapitallashuvga olib keladi. Shu munosabat bilan, atrof-muhitga minimal antropogen ta’sir ko‘rsatadigan, qisqa muddatlarda o‘zini oqlaydigan hamda markaziy energetika tizimidan uzoqda joylashgan iste’molchilarni mustaqil elektr bilan ta’minlay oladigan kichik, mikro va piko quvvatli GESlarga talab ortib bormoqda.

O‘zbekiston irrigatsiya tarmoqlarining gidroenergetik salohiyati. O‘zbekiston Respublikasi o‘ziga xos rivojlangan ulkan gidrotexnik va meliorativ infratuzilmaga ega. Mamlakat bo‘ylab umumiy uzunligi 170 000 km dan ortiq bo‘lgan magistral, xo‘jaliklararo va ichki sug‘orish kanallari, yuzlab suv taqsimlash to‘g‘onlari, nasos stansiyalarining tashlama inshootlari hamda kollektor-drenaj tizimlari mavjud. Ushbu suv oqimlarining qariyb 75–80 foizi quyidagi gidravlik parametrlar bilan xarakterlanadi:

Gidrostatik napor (bosim): past (H = 1.0 - 5.0 m) yoki amalda napor mavjud bo‘lmagan to‘g‘onsiz erkin oqim holatida (H $\approx$ 0 m);

Oqimning o‘rtacha tezligi: v = 1.0 - 2.5 m/s oralig‘ida (ayrim qiya o‘zanli uchastkalarda 3.0 m/s gacha);

ISSN 3030-3907

Suv oqimi barqarorligi: vegetatsiya davrida suv sarfi nisbatan barqaror va doimiy bo‘lib, bu esa gidroturbinalarning uzoq muddatli optimal yuklamada ishlashini ta’minlaydi.

Mavjud an’anaviy gidroenergetika yechimlari (yuqori bosimli radial o‘qli yoki kovshli turbinalar) bunday past bosimli va tezligi mo‘’tadil oqimlarda samarasizdir. Shuningdek, irrigatsiya kanallarida yirik to‘g‘onlar qurish gidrotexnik xavfsizlik qoidalariga zid bo‘lib, oqim o‘zanining loyqalanishiga va suv o‘tkazish qobiliyatining pasayishiga olib keladi. Shu sababli, past bosimli suv oqimlarining gidrodinamik tabiatiga to‘liq moslashtirilgan, oqim kinetikasidan to‘g‘ridan-to‘g‘ri foydalanuvchi mikroGESlarning konstruktiv turlarini tizimlashtirish, ularning ishlash mexanizmlarini ilmiy asoslash dolzarb ilmiy-texnik masala hisoblanadi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI VA NAZARIY ASOSLAR.

Tadqiqotda gidrodinamika, nazariy gidravlika va suyuqliklar mexanikasining fundamental qonuniyatlari (oqimning uzluksizlik tenglamasi, Bernulli tenglamasi hamda Eylerning gidromashinalar asosiy tenglamasi) qo‘llanildi.

Gidromuhit parametrlariga ko‘ra mikroGESlarning energiya ishlab chiqarish nazariyasi ikki asosiy toifaga ajratiladi:

Bosimli (gidrostatik-gravitatsion) oqimlar nazariyasi, agar suv oqimida minimal geodezik sathlar farqi yoki suv yig‘gich orqali napor (H) hosil qilish imkoniyati mavjud bo‘lsa, gidravlik quvvat suyuqlik massasining potensial gravitatsion energiyasiga tayanadi:

$$P_{bosim} = \eta_{umum} \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad [Vt] \quad (1)$$

Bu yerda:

ρ — suvning fizik zichligi ($\rho \approx 1000$ kg/m^3);

g — erkin tushish tezlanishi ($g = 9.81$ m/s^2);

Q — turbinadan o‘tayotgan hajmiy suv sarfi (m^3/s);

H — hisobiy gidravlik napor (bosim balandligi, m);

η_{umum} — agregatning to‘liq foydali ish koeffitsiyenti (FIK):$\eta_{umum} = \eta_{gidr} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{el}$ (2) bunda η_{gidr} — ishchi g‘ildirakning gidravlik FIKi (0.75 - 0.92), η_{mex} — val va podshipniklarning mexanik FIKi (0.95 - 0.98), η_{gen} — generatorning elektr FIKi (0.88 - 0.95), η_{el} — invertor va kuchlanish o‘zgartirgichlar samaradorligi (0.92 - 0.96).

Erkin oqimli (gidrokinetik) oqimlar va Betts chegarasi nazariyasi, suv sathi sun’iy ko‘tarilmaydigan, to‘g‘onsiz ochiq kanallarda quvvat manbai sifatida oqayotgan suv massasining kinetik energiyasi ($E_k = (1/2)\, m\, v^2$) qatnashadi. Vaqt birligi ichida A ko‘ndalang kesim yuzasidan oqib o‘tuvchi nazariy gidravlik quvvat:

ISSN 3030-3907

$$P_{oqim} = (1/2)\ \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [Vt] \quad (3)$$

Gidrokinetik turbina ushbu oqim ichiga joylashtirilganda, oqimning barcha energiyasini to‘liq tortib ololmaydi, chunki turbinadan chiqayotgan suyuqlik nolga teng bo‘lmagan tezlik bilan harakatlanishda davom etishi shart (uzluksizlik sharti). Turbina o‘zlashtirishi mumkin bo‘lgan real quvvat quvvat koeffitsiyenti (C_p — power coefficient) orqali ifodalanadi:

$$P_{erkin} = (1/2)\ C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [Vt] \quad (4)$$

Bu yerda:

$C_p = (P_{foydali}/P_{oqim})$ — turbinaning gidrodinamik samaradorlik koeffitsiyenti;

A — turbinaning oqimga perpendikulyar proyeksiyadagi ishchi yuzasi (m^2);

v — turbinaga yaqinlashayotgan suv oqimining tezligi (m/s).

Betts chegarasi (Betz limit). Ideal bir jinsli oqim shartida 1D impuls nazariyasiga muvofiq, turbinadan oldingi (v_1) va keyingi (v_2) tezliklar o‘rtasidagi optimal nisbat $v_2 = (1/3)\ v_1$ bo‘lganda, olinishi mumkin bo‘lgan maksimal quvvat koeffitsiyenti chegarasi hosil bo‘ladi:

$$C_{p,max} = (16/27) \approx 0.5926 \quad (59.3\%)$$

Ochiq o‘zanli gidromuhitda kuraklarning gidrodinamik ishqalanishi, radial oqishlar va chegaraviy qatlam qarshiliklari sababli amaldagi eng mukammal gidrokinetik turbinalar uchun C_p koeffitsiyenti 0.25 - 0.42 atrofida tebranadi.

ASOSIY NATIJALAR VA ULARNING TAHLILI.

Past bosimli mikroGESlarning tizimli tasnifi, o‘tkazilgan tahlillar natijasida past bosimli va erkin oqimli suv havzalarida qo‘llaniladigan mikroGES konstruksiyalari energetik o‘zgarish usuli hamda o‘q konfiguratsiyasiga ko‘ra tizimlashtirildi (1-jadval).

1-Jadval.

Past bosimli va erkin oqimli mikroGES turbinalarining qiyosiy texnik-gidravlik ko‘rsatkichlari

№	Turbina turi	Napor diapazoni, H (m)	Ishchi oqim tezligi, v (m/s)	O‘rtacha FIK, η yoki C_p	Konstruktiv murakkabligi	Irrigatsiya tarmoqlariga mosligi va asosiy xususiyati
1	**Arximed vinti**	1.0 - 5.0	0.6 - 2.2	η = 74 - 84%	O‘rtacha (uzun metall korpus)	**Juda yuqori.** Suv tarkibidagi qum, loyqa va xazonlarga

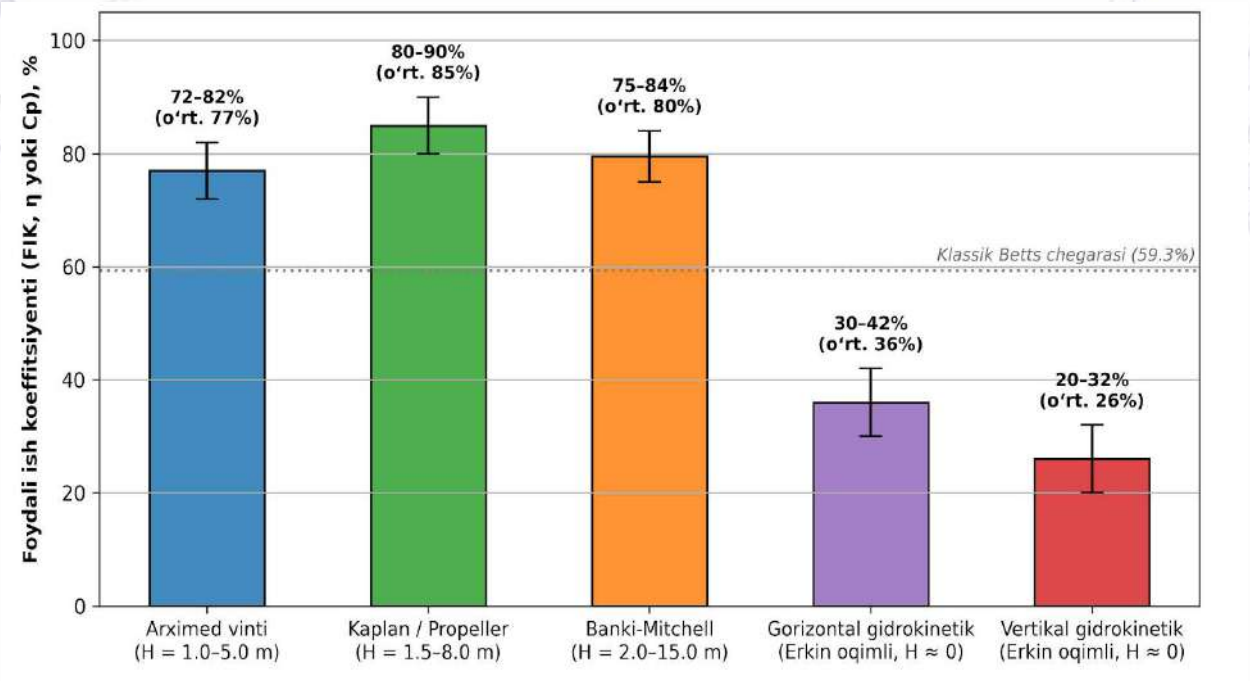
ISSN 3030-3907

						eng chidamli qurilma.
2	**Kaplan / Propellerli turbina**	1.5 - 8.0	1.5 - 3.5	η = 82 - 90%	Yuqori (podshipnik uzellari germetikligi)	**O‘rtacha.** Naporli quvurlar talab etadi, tozalovchi panjara o‘rnatilishi shart.
3	**Banki-Mitchell (Cross-flow)**	2.0 - 15.0	1.5 - 4.0	η = 75 - 82%	Past / O‘rtacha	**Yuqori.** Suv sarfi mavsumiy o‘zgaruvchan bo‘lgan kanallarda barqaror ishlaydi.
4	**Gorizontal o‘qli gidrokinetik (HATT)**	0 (erkin oqim)	1.2 - 3.0	C_p = 0.32 - 0.42	Yuqori (suvosti reduktori talab etiladi)	**O‘rtacha.** Oqim yo‘nalishiga sezgir, chuqur kanallarda yaxshi natija beradi.
5	**Vertikal o‘qli gidrokinetik (Darre / Gorlov)**	0 (erkin oqim)	1.0 - 2.5	C_p = 0.28 - 0.36	O‘rtacha (oddiy pichoq profili)	**Yuqori.** Oqim yo‘nalishiga bog‘liq emas, generator va uzatmalar suv ustida joylashadi.
6	**Qarshilikka asoslangan rotorlar (Savonius)**	0 (erkin oqim)	0.8 - 2.0	C_p = 0.15 - 0.22	Juda past	**Past.** FIKi past, biroq ishga tushish momenti (starting

ISSN 3030-3907

						torque) juda yuqori.

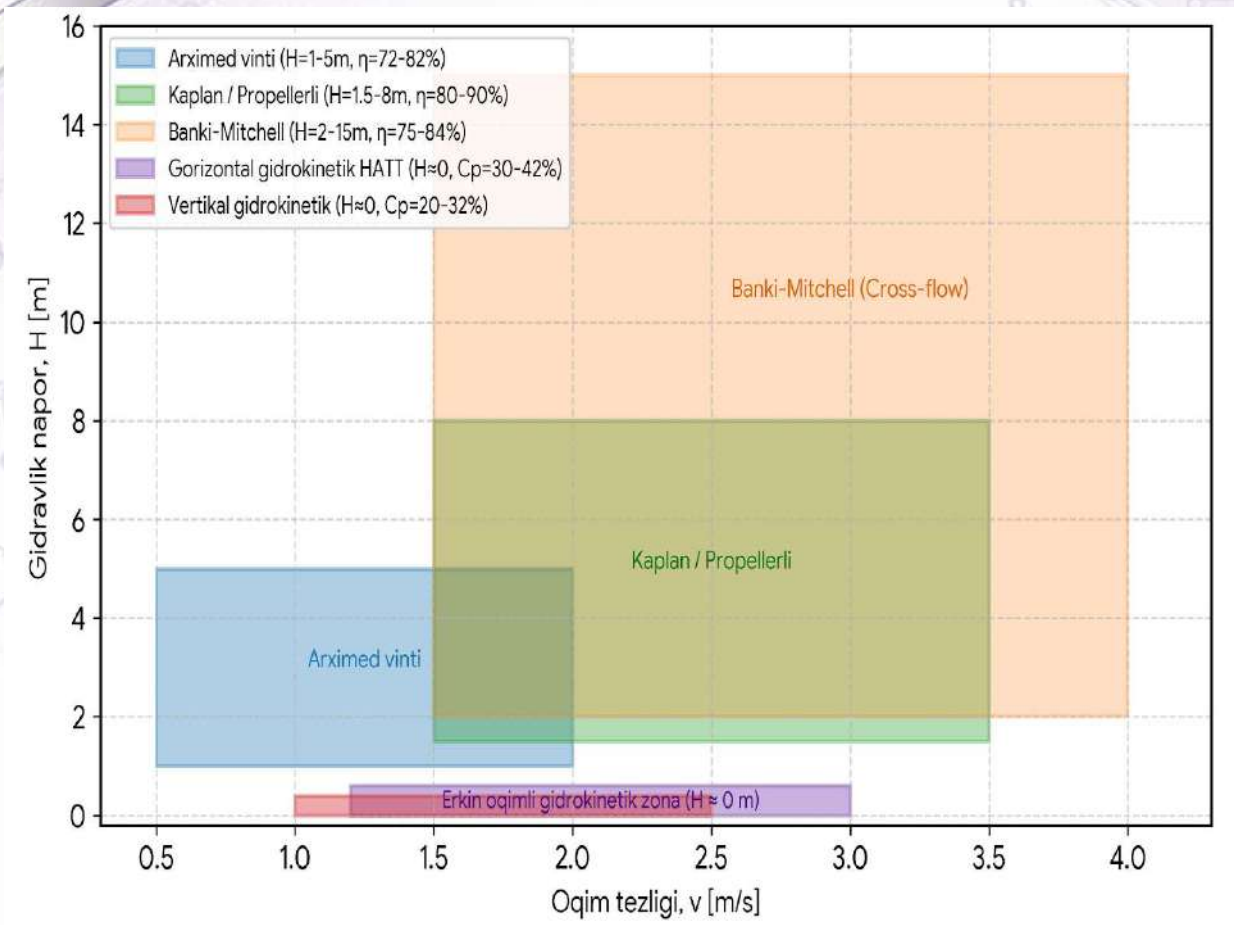
Jadval tahlilidan ko‘rinadiki, H = 1.0 - 5.0 m oraliqdagi gidrotoshqinlar va suv tushirgichlarda Arximed vinti gidromexanik jihatdan eng maqbul yechimdir. Napor hosil qilish imkoni bo‘lmagan kanallar o‘zanida esa gidrodinamik ko‘tarish kuchiga asoslangan vertikal o‘qli (Darre / Gorlov) hamda gorizontal o‘qli (HATT) gidrokinetik turbinalar optimal hisoblanadi. Mazkur turbinalarning kinematik sxemasi, suv oqimi ta’sir mexanizmi hamda asosiy texnik ko‘rsatkichlari 1-rasmda keltirilgan.



1-Rasm Past bosimli va erkin oqimli turbinalarning gidrodinamik samaradorligi (FIK)

Tahlil qilingan turbinalarning o‘rtacha foydali ish koeffitsiyentlari (FIK) va gidrokinetik quvvat koeffitsiyentlarining (C_p) taqqoslanishi 2-rasmda ifodalangan.

ISSN 3030-3907



2-Rasm Past bosimli turbinalarning napor (H) va oqim tezligi (v) bo‘yicha qo‘llanish sohalari

Gidrodinamik kuchlar taqsimoti va aylanish momenti mexanikasi, mikroGES ishchi g‘ildiraklarida gidravlik energiyaning mexanik energiyaga aylanishi ikki asosiy kuch komponenti ta’sirida kechadi:

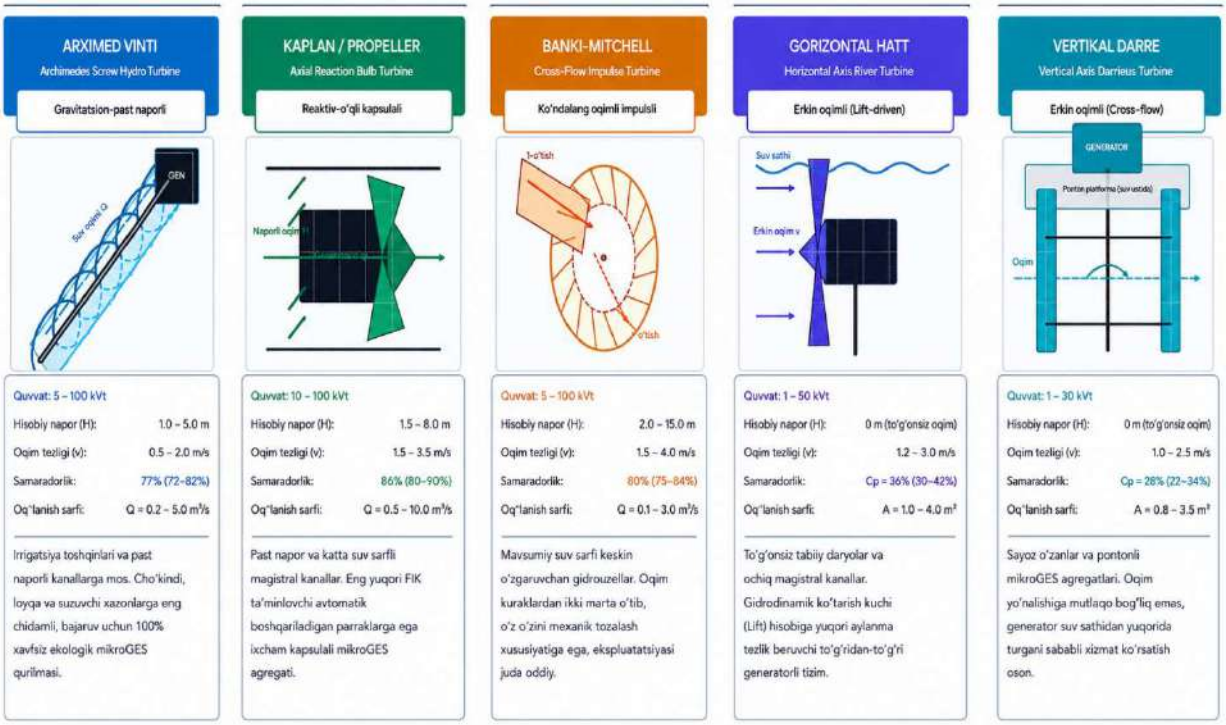
Frontal qarshilik kuchi (F_D — Drag force): Suv oqimi zarrachalari turbina parragining botiq tomoniga urilib, bosim kuchi hosil qiladi:$F_D = (1/2)\, C_D \cdot \rho \cdot A_p \cdot (v - u)^2$ (5) bu yerda C_D — frontal qarshilik koeffitsiyenti; A_p — kurak yuzasi; u — kurakning aylanma tezligi ($u = \omega \cdot R$). Bunday turbinalarda kurak tezligi hech qachon suv oqimi tezligidan oshishi mumkin emas ($u < v$, ya’ni tezlik koeffitsiyenti $\lambda = (u/v) < 1$). Shu sababli Savonius va suv charxlarining energetik FIKi 20 - 22% dan oshmaydi.

Gidrodinamik ko‘tarish kuchi (F_L — Lift force): Oqim maxsus aerogidrodinamik shaklga ega (NACA profillari) kurak atrofidan oqib o‘tganida, kurak ustki va ostki qismida bosimlar farqi paydo bo‘ladi (Bernulli effekti):$F_L = (1/2)\, C_L \cdot \rho \cdot A_p \cdot w^2$ (6)bu yerda w — nisbiy oqim tezligi vektori ($vecw = vecv - vecu$). Lift kuchiga asoslangan turbinalarda aylanma tezlik oqim tezligidan bir necha barobar yuqori bo‘lishi mumkin ($\lambda = 2.0 - 4.5$). Natijada hosil bo‘ladigan

ISSN 3030-3907

buralish momenti ($M = F \cdot R$) va mos ravishda quvvat koeffitsiyenti sezilarli darajada yuqori bo‘ladi ($C_p = 0.35 - 0.42$).

Past tezlikli oqimlarda samaradorlikni oshirish omillari, erkin oqimli mikroGESlarning eng zaif tomoni ishlab chiqariladigan quvvatning oqim tezligi kubiga (v^3) to‘g‘ridan-to‘g‘ri proporsional ekanligidir. Turbinalarning napor va oqim tezligiga bog‘liq optimal ishchi zonalari 3-rasmda aks ettirilgan.



3-Rasm Quvvat ko‘rsatkichlari (1-100kVt), gidravlik napor (H), oqim tezligi (v) va FIK paramertlari bo`yicha muhandislik diagrammasi

Tezlik ortishining solishtirma effekti:

$$(P_2/P_1) = ((v_2/v_1))^3 \quad (7)$$

Agar oqim tezligi 1.2 m/s dan mahalliy darajada 1.6 m/s gacha oshirilsa:

$$(P_2/P_1) = ((1.6/1.2))^3 \approx 1.333^3 \approx 2.37$$

ya’ni tezlikning atigi 33% ga ortishi quvvatning **2.37 barobarga (137% ga)** ko‘payishiga olib keladi.

Ushbu qonuniyatdan kelib chiqqan holda, past tezlikli irrigatsiya kanallarida mikroGES samaradorligini oshirish bo‘yicha quyidagi ilmiy-texnik yechimlar ishlab chiqildi:

Konfuzor-diffuzor (Shroud / Diffuser-Augmented) tizimlarini integratsiya qilish: Turbinani yopiq yoki ochiq oqim yo‘naltiruvchi konussimon korpus (kontsentrator) ichiga joylashtirish orqali ishchi g‘ildirak sohasida sun’iy vakuum (manfiy bosim gradiyenti) hosil qilinadi. Natijada ishchi sohadagi oqim tezligi 1.3 - 1.5 barobarga oshadi va Betts chegarasidan yuqori effektiv quvvat olish imkoniyati ($C_{p,eff} = 0.65 - 0.85$) vujudga keladi.

ISSN 3030-3907

Past aylanmali ko‘p qutbli generatorlardan (PMSG) foydalanish: Erkin oqimli turbinalarning ishchi g‘ildirak aylanishlar soni past (n = 40 - 150 ayl/min) bo‘ladi. Standart sanoat generatorlari esa 1500 ayl/min talab qiladi. An’anaviy tishli uzatmalar (multiplikator / reduktor) tizim umumiy FIKini 12 - 18% ga pasaytiradi va gidromuhitda doimiy moylash, zichlagichlar talab qiladi. Shu sababli ko‘p qutbli (2p = 36 - 72), neodimiy (NdFeB) doimiy magnitli sinxron generatorlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri valga ulash (Direct-Drive) orqali mexanik yo‘qotishlar bartaraf etiladi va umumiy tizim FIKi 10 - 12% ga oshiriladi.

Mavsumiy tebranishlarga moslashuvchi pontonli osma mexanizmlar: Sug‘orish kanallarida suv sathi yil fasllariga qarab o‘zgarib turadi. Turbina agregatini kanal tubiga mahkamlamasdan, pontonli suzuvchi platformaga joylashtirish va uni vertikal harakatlanuvchi yo‘naltirgichlar bilan ta’minlash turbinaning doimiy ravishda maksimal tezlikka ega yuqori qatlamda ishlashini ta’minlaydi.

Samaradorlikni yanada oshirish yuzasidan qo‘shimcha ilmiy-texnik yo‘nalishlar, yuqorida ko‘rib chiqilgan konfuzor-diffuzor, PMSG va pontonli yechimlardan tashqari, so‘nggi tadqiqotlarda quyidagi besh yo‘nalish orqali ham asoslanadi:

Gravitatsion vorteks turbinasi (GWVT): H < 3 m bo‘lgan ultra-past naporli suv inshootlari uchun so‘nggi yillarda faol o‘rganilmoqda. Umumlashtiruvchi tahlillarda uning o‘rtacha FIKi 53% atrofida ekanligi, konussimon havza va pichoq geometriyasini optimallashtirish orqali esa sonli tadqiqotlarda FIK 62% gacha yetkazilgani qayd etilgan [9, 10]. Loyqaga chidamliligi va sodda konstruksiyasi bois bu turbina turini 1-jadvalga qo‘shimcha (7-qator) sifatida kiritish maqsadga muvofiq.

Bundan tashqari, quvvat va tezlik koeffitsiyentlari orasidagi bog‘liqlik (C_p–λ) hozircha 1-jadvalda faqat statik diapazon ko‘rinishida berilgan. Gidrofoyl profilli uch pichoqli turbinalarda nominal tezlik koeffitsiyenti $\lambda = 5$ bo‘lganda $C_p \approx 0.45$ ga yetishi va bu ko‘rsatkichni diffuzorli (shroud) tizimlar yordamida yanada oshirish mumkinligi ko‘rsatilgan [11]. Bunday egri chiziqni eksperimental yoki CFD ma’lumotlar asosida keltirish optimal ishlash nuqtasini (λ_{opt}) aniqlashtiradi va maqolaning amaliy qiymatini oshiradi.

Texnik tahlilni iqtisodiy asos bilan mustahkamlash ham maqsadga muvofiq: rivojlanayotgan mamlakatlarda kichik GESlar uchun energiya narxining tekislangan qiymati (LCOE) 0.02–0.10 AQSh dollari/kVt·soat oralig‘ida ekanligi [12], Janubi-Sharqiy Osiyodagi piko-GES tizimlarida esa 0.04–0.11 dollar/kVt·soat bo‘lib, bu dizel mini-tarmoqlarning 0.25–0.60 dollariga nisbatan ancha arzon ekanligi aniqlangan [13]. Ushbu ko‘rsatkichlarni O‘zbekiston

ISSN 3030-3907

irrigatsiya tarmoqlari sharoitiga moslashtirib hisoblash maqolaning amaliy-iqtisodiy asosini kuchaytiradi.

Boshqaruv jihatidan, past aylanmali PMSG generatorlarda oqim tezligi vaqt bo‘yicha doimiy o‘zgarib turgani sababli quvvatning maksimal nuqtasini kuzatuvchi (MPPT) algoritmlar zarur bo‘ladi. Boost konverterda amalga oshirilgan Perturb & Observe (P&O) usuli eksperimental tasdiqlangan [14], shuningdek tezlik koeffitsiyenti (TSR) nazorati, quvvat signali fikr-mulohazasi (PSF) va tepalikka chiqish qidiruvi (HCS) kabi yana uchta strategiya ham qo‘llanilmoqda [15]. Ushbu algoritmlardan birini ko‘p qutbli PMSG bilan birlashtirish maqolada taklif etilgan direct-drive generatorning boshqaruv sxemasini to‘ldiradi.

Nihoyat, irrigatsiya kanallaridagi loyqa va xas-xashak muammosi ham alohida yechim talab qiladi: Koanda effektiga asoslangan, harakatlanuvchi qismlarga ega bo‘lmagan o‘z-o‘zini tozalovchi ekranlar an’anaviy panjaralarga qaraganda ancha kam texnik xizmatni talab qilishi ko‘rsatilgan [16]. Bunday ekranni mikroGES suv olish qurilmasi oldiga o‘rnatish agregatning uzoq muddatli barqaror ishlashini ta’minlaydi.

XULOSA.

1. O‘zbekistonning sug‘orish kanallari va past bosimli suv inshootlari yuqori gidroenergetik potensialga ega bo‘lib, unda to‘g‘onsiz va past naporli mikroGES qurilmalarini qo‘llash texnik, iqtisodiy hamda ekologik jihatdan eng maqbul yo‘nalish hisoblanadi.

2. Gidrostatik napor H = 1.0 - 5.0 m oralig‘ida bo‘lgan suv tushirgichlar uchun Arximed vinti o‘zining loyqaga chidamliligi, uzoq xizmat muddati va barqaror FIKi (75 - 84%) bilan ustunlikka ega.

3. Bosimsiz erkin oqimli kanallarda oqim kinetik energiyasidan foydalanuvchi gorizontal va vertikal o‘qli turbinalar maqsadga muvofiqdir. Bunda kuraklarda aerogidrodinamik ko‘tarish kuchini (F_L) hosil qiluvchi profillarni qo‘llash quvvat koeffitsiyentini C_p = 0.35 - 0.40 ga yetkazish imkonini beradi.

4. Past tezlikli (v < 2.0 m/s) gidromuhitda mikroGESlarning elektr ishlab chiqarish samaradorligini oshirishning eng samarali konstruktiv usullari bu — oqim tezligini oshiruvchi konfuzor-diffuzor qobiqlari hamda mexanik yo‘qotishlarni istisno qiluvchi past aylanmali doimiy magnitli generatorlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri valga integratsiya qilishdan iborat.

5. Gravitatsion vorteks turbinasi (GWVT) H < 3 m bo‘lgan ultra-past naporli sharoitlar uchun istiqbolli qo‘shimcha yechim bo‘lib, uning o‘rtacha FIKi 53–62% oralig‘ida ekanligi aniqlangan [9, 10]; uni tizimli tasnifga alohida tur sifatida kiritish tavsiya etiladi.

6. Taklif etilgan konstruktiv yechimlarning amaliy joriy etilishi energiya narxining tekislangan qiymati (LCOE) tahlili va MPPT asosidagi boshqaruv

ISSN 3030-3907

algoritmlari bilan iqtisodiy hamda funksional jihatdan asoslanishi lozim [12–15], sedimentatsiyaga qarshi o‘z-o‘zini tozalovchi Koanda ekranlari esa agregatning uzoq muddatli barqaror ishlashini ta’minlaydi [16].

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., & Guan, X. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis hydrokinetic turbines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. — Vol. 13(8). — pp. 1665–1675.
2. Pelz, P. F., Leise, P., & Meingast, M. Efficient, flexible, robust, and cost-effective: A review of Archimedes screw turbines for low-head hydropower // *Renewable Energy*, 2021. — Vol. 176. — pp. 785–802.
3. Kumar, A., & Singal, S. K. Selection of best fit turbine for hydrokinetic energy conversion: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. — Vol. 50. — pp. 467–481.
4. Ramos, H. M., Borga, A., & Simão, M. New design solutions for low-head energy exploitation // *Water Resources Management*, 2009. — Vol. 23(4). — pp. 691–708.
5. Kirke, B. K. Developments in ducted and bare-flow tidal and river turbines // *Energy Conversion and Management*, 2011. — Vol. 52(2). — pp. 984–997.
6. Berdiev U.T., Boboev A.A. Kichik va mikro gidroelektr stansiyalari: Darslik. — Toshkent: Fan va texnologiya, 2018. — 240 b.
7. Abduaziz uulu Abdurauf, Suvonov J.X., Abduxalilov N.S. Yo‘nalishga kirish: Darslik. — Namangan: NamDTI, 2025. — 388 b.
8. O‘zbekiston Respublikasining 2019-yil 21-maydagi «Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish to‘g‘risida»gi O‘RQ-539-son Qonuni.
9. Maika, N., Lin, W., Khatamifar, M. A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation // *Energies*, 2023. — Vol. 16(14). — Art. 5394.
10. Handoko, R., Hadi, S., Danardono Dwi P.T., D., Prasetyo, A. The gravitational water vortex turbine: A review and application development // *AIP Conference Proceedings*, 2023. — Vol. 2674(1). — Art. 030018.
11. Puertas-Frías, C. M., Willson, C. S., García-Salaberri, P. A. Design and economic analysis of a hydrokinetic turbine for household applications // *Renewable Energy*, 2022. — Vol. 199. — pp. 587–598.
12. Haghighi, A. T., et al. Levelized Cost of Electricity Generation by Small Hydropower Projects under Clean Development Mechanism in India // *Energies*, 2022. — Vol. 15(4). — Art. 1473.
13. Zulkarnain, I. A., Basar, M. F., Sopian, K. Techno-Economic Feasibility of Pico-Hydropower in Southeast Asia: An Analysis of LCOE and Carbon Emission

ISSN 3030-3907

Reduction // *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 2026. — Vol. 21(1). — pp. 48–60.

14. Chihaia, R.-A., Vasile, I., Cîrciumaru, G., Nicolaie, S., Tudor, E., Dumitru, C. Improving the Energy Conversion Efficiency for Hydrokinetic Turbines Using MPPT Controller // *Applied Sciences*, 2020. — Vol. 10(21). — Art. 7560.

15. Khan, J., Iqbal, T., Quaicoe, J. E. Evaluation of maximum power point tracking in hydrokinetic energy conversion systems // *The Journal of Engineering (IET)*, 2015. DOI: 10.1049/joe.2015.0157.

16. U.S. Bureau of Reclamation. Coanda-effect self-cleaning screens for irrigation canal debris and fish exclusion // *Water Operation and Maintenance Bulletin*, 2004. — Vol. 208.

ISSN 3030-3907