



UO‘K 621.224:532.5

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.4](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.4)

O‘ZGARUVCHAN SUV OQIMI REJIMLARIDA GIDROTURBINANING GIDRODINAMIK PARAMETRLARINI OPTIMALLASHTIRISH VA GIDRAVLIK SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Safarov Alisher Bekmurodovich^{1,2} - doktorant (DSc),<https://orcid.org/0000-0003-1164-9027> e-mail: a-safarov91@mail.ruPirimov Ramziddin Ramazonovich² - tayanch doktorant (PhD),<https://orcid.org/0009-0005-7865-2599> e-mail: ramziddinpirimov242@gmail.comNematov Baxrom Nemat o‘g‘li² - tayanch doktorant (PhD),Choriyev Alisher Isomiddin o‘g‘li² - mustaqil izlanuvchi<https://orcid.org/0000-0002-8268-2476> e-mail: aliwer91513@gmail.com¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston²Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Jahonda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish, ekologik toza elektr energiyasi ishlab chiqarishni rivojlantirish hamda mikro gidroelektr stansiyalarining samaradorligini oshirish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. Kichik napor va o‘zgaruvchan ish rejimlarida keng qo‘llaniladigan ko‘ndalang oqimli (Banki) gidroturbinalarning energiya samaradorligini oshirishda parrak shakli geometriyasini takomillashtirish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Usullar va materiallar. Tadqiqotda ko‘ndalang oqimli gidroturbinaning tekis, yumaloq, o‘tkir va aerodinamik parrak shakllari ANSYS Fluent dasturida ikki o‘lchamli (2D) Hisoblash Suyuqliklar Dinamikasi (CFD) usuli yordamida modellashtirildi. Oqimning ajralishi, qayta aylanishi va turbulentlik hodisalarini aniqlash uchun Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulensiya modeli qo‘llanildi. Hisoblashlar 10 m doimiy napor sharoitida ishchi g‘ildirakning 270-940 rpmaylanish tezliklari oralig‘ida bajarildi hamda aylantiruvchi moment, gidravlik foydali ish koeffitsiyenti, suvning hajm ulushi, bosim taqsimoti va tezlik maydoni tahlil qilindi.

Natijalar. Hisoblash natijalari aerodinamik parrak shaklining boshqa konfiguratsiyalarga nisbatan yuqori gidravlik samaradorlikni ta‘minlashini ko‘rsatdi. Ishchi g‘ildirakning 800 rpmaylanish tezligida maksimal foydali ish koeffitsiyenti 83,5 % ga erishildi. Oqimning parrak yuzasiga yaxshiroq yopishishi, girdoblarning kamayishi va chiqish qismidagi bosim yo‘qotishlarining pasayishi samaradorlikning oshishiga sabab bo‘ldi. O‘tkir parrak shakli ma‘lum optimal aylanish tezliklari oralig‘ida yuqori natija ko‘rsatgan bo‘lsa, tekis va yumaloq parraklarda turbulentlik hamda qayta aylanish zonalari sezilarli darajada ortishi kuzatildi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari ko‘ndalang oqimli gidroturbinalarning gidravlik samaradorligi parrak shakli geometriyasiga bevosita bog‘liqligini ko‘rsatdi. Aerodinamik shakl oqim beqarorligini kamaytirib, energiyaning ikki bosqichli almashinuvi jarayonida yuqori samaradorlikni ta‘minlashi aniqlandi. CFD modellashtirish usuli Banki gidroturbinalarini loyihalash va optimallashtirishda ishonchli vosita ekanligi tasdiqlandi hamda olingan natijalar mikro gidroelektr stansiyalarida qo‘llaniladigan yuqori samaradorlikka ega gidroturbinalarni yaratish uchun muhim ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: ko‘ndalang oqimli gidroturbina, parrak shakli, gidravlik samaradorlik, ichki oqim, CFD, mikro gidroenergetika.

Дата поступления: 27.07.2026. После обработки: 13.08.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Safarov A.B., Pirimov R.R., Nematov B.N., Choriyev A.I. Optimization of the Hydrodynamic Parameters of a Hydroturbine and Improvement of its Hydraulic Efficiency Under Variable Water Flow Conditions. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 40-50.



UDC 621.224:532.5

OPTIMIZATION OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A HYDROTURBINE AND IMPROVEMENT OF ITS HYDRAULIC EFFICIENCY UNDER VARIABLE WATER FLOW CONDITIONS

Safarov Alisher Bekmurodovich^{1,2} – Doctoral candidate (DSc),

<https://orcid.org/0000-0003-1164-9027> e-mail: a-safarov91@mail.ru

Pirimov Ramziddin Ramazonovich² – Doctoral candidate (PhD),

<https://orcid.org/0009-0005-7865-2599> e-mail: ramziddinpirimov242@gmail.com

Nematov Baxrom Nemat ugli² – Doctoral candidate (PhD),

Choriyev Alisher Isomiddin ugli² – Independent Researcher,

<https://orcid.org/0000-0002-8268-2476> e-mail: aliwer91513@gmail.com

¹Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

²Bukhara State Technical University, Bukhara, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Improving the efficient utilization of renewable energy resources, advancing environmentally friendly electricity generation, and enhancing the performance of micro-hydropower plants are among the key challenges in the global energy sector. Optimizing the blade geometry of Cross-Flow (Banki) turbines, which are widely employed under low-head and variable operating conditions, is of considerable scientific and practical importance for improving their hydraulic efficiency.

Methods and Materials. In this study, four blade shakle configurations-flat, rounded, sharp, and aerodynamic-of a Cross-Flow (Banki) turbine were numerically investigated using two-dimensional (2D) Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations in ANSYS Fluent. The Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulence model was employed to accurately capture flow separation, recirculation, and turbulent flow phenomena. Simulations were performed under a constant hydraulic head of 10 m over a runner rotational speed range of 270-940 rpm. Hydraulic torque, hydraulic efficiency, water volume fraction, pressure distribution, and velocity fields were evaluated to assess the influence of blade geometry on turbine performance.

Results. The numerical results demonstrated that the aerodynamic blade shakle provided superior hydraulic performance compared with the other blade configurations. A maximum hydraulic efficiency of 83.5% was achieved at a runner speed of 800 rpm. The improved performance was primarily attributed to enhanced flow attachment along the blade surface, reduced vortex formation, and lower pressure losses at the outlet. Although the sharp blade shakle exhibited competitive performance within a limited range of optimal rotational speeds, the flat and rounded blade shakles generated significantly higher turbulence intensity and larger recirculation zones, leading to reduced hydraulic efficiency.

Conclusion. The findings confirm that the hydraulic performance of Cross-Flow (Banki) turbines is strongly influenced by blade geometry. The aerodynamic blade shakle effectively suppresses flow instabilities and improves energy conversion efficiency throughout the two-stage energy transfer process. Furthermore, the study demonstrates that CFD-based numerical modeling is a reliable approach for the design and optimization of Cross-Flow turbines. The obtained results provide a valuable scientific and engineering basis for the development of high-efficiency turbines intended for micro-hydropower applications.

Keywords: Cross-Flow (Banki) turbine, blade geometry, hydraulic efficiency, internal flow, Computational Fluid Dynamics (CFD), micro-hydropower.

УДК 621.224:532.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТУРБИНЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЁ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ВОДНОГО ПОТОКА



Сафаров Алишер Бекмуродович^{1,2} – докторант (DSc),

<https://orcid.org/0000-0003-1164-9027> e-mail: a-safarov91@mail.ru

Пиримов Рамзиддин Рамазонович² – докторант (PhD),

<https://orcid.org/0009-0005-7865-2599> e-mail: ramziddinpirimov242@gmail.com

Нематов Бахром Немат угли² – докторант (PhD),

Чориев Алишер Исомиддин угли² – независимый исследователь,

<https://orcid.org/0000-0002-8268-2476> e-mail: aliwer91513@gmail.com

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

Аннотация. Введение. В мировом масштабе эффективное использование возобновляемых источников энергии, развитие производства экологически чистой электрической энергии, а также повышение эффективности микро-гидроэлектростанций являются одними из актуальных научно-технических задач. Совершенствование геометрии профиля лопаток имеет важное научно-практическое значение для повышения энергетической эффективности гидротурбин поперечного потока (Банки), широко применяемых при малых напорах и в условиях переменных режимов эксплуатации.

Методы и материалы. В исследовании были смоделированы плоский, закруглённый, острый и аэродинамический профили лопаток гидротурбины поперечного потока с использованием двухмерного (2D) метода вычислительной гидродинамики (CFD) в программном комплексе ANSYS Fluent. Для исследования явлений отрыва потока, рециркуляции и турбулентных процессов применялась модель турбулентности Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$. Расчётные исследования проводились при постоянном напоре 10 м в диапазоне частот вращения рабочего колеса от 270 до 940 об/мин. В процессе анализа оценивались крутящий момент, гидравлический коэффициент полезного действия, объёмная доля воды, распределение давления и поле скоростей потока.

Результаты. Результаты расчётного моделирования показали, что аэродинамический профиль лопатки обеспечивает более высокую гидравлическую эффективность по сравнению с другими конфигурациями. Максимальное значение коэффициента полезного действия было достигнуто при частоте вращения рабочего колеса 800 об/мин и составило 83,5 %. Повышение эффективности обусловлено улучшенным прилеганием потока к поверхности лопатки, снижением интенсивности вихревых образований и уменьшением потерь давления в выходной зоне. Острый профиль лопатки продемонстрировал высокие показатели в определённом диапазоне оптимальных частот вращения, тогда как для плоских и закруглённых профилей наблюдалось значительное увеличение зон турбулентности и рециркуляции потока.

Выводы. Результаты исследования показали, что гидравлическая эффективность гидротурбин поперечного потока непосредственно зависит от геометрии профиля лопаток. Установлено, что аэродинамический профиль способствует снижению неустойчивости потока и обеспечивает высокую эффективность в процессе двухступенчатого преобразования энергии. Подтверждено, что метод CFD-моделирования является надёжным инструментом для проектирования и оптимизации гидротурбин Банки, а полученные результаты могут служить важной научно-практической основой для разработки высокоэффективных гидротурбин, применяемых в микро-гидроэлектростанциях.

Ключевые слова: гидротурбина поперечного потока; форма профиля лопатки; гидравлическая эффективность; внутреннее течение; CFD; микро-гидроэнергетика.

Kirish

Xalqaro Energetika Agentligi (IEA) ma'lumotlariga ko'ra, dunyo bo'yicha qariyb 700 million kishi, asosan Sahroi Kabirdan janubdagi Afrika hamda Janubiy Osiyo mamlakatlarining



chekka hududlarida, hali ham zamonaviy elektr energiyasidan foydalanish imkoniyatiga ega emas [1].

Ushbu hududlarda markazlashgan elektr tarmoqlarini kengaytirish murakkab geografik sharoitlar, yuqori infratuzilmaviy xarajatlar va uzoq masofalar sababli iqtisodiy jihatdan samarali yechim bo'la olmaydi. Shu sababli, mahalliy qayta tiklanuvchi energiya manbalariga asoslangan markazlashmagan energetika tizimlarini rivojlantirish barqaror elektr ta'minotini ta'minlashning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Birlashgan Millatlar Tashkilotining Barqaror rivojlanish maqsadi 7 (SDG 7 - Arzon, ishonchli, barqaror va zamonaviy energiya) doirasida qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish, energiya samaradorligini oshirish va elektr energiyasidan foydalanish imkoniyatlarini kengaytirishga alohida e'tibor qaratilmoqda [2,3].

Mazkur global tendensiyalar O'zbekistonda ham qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish va gidroenergetika salohiyatini oshirishga qaratilgan davlat siyosatida o'z aksini topmoqda. Shu maqsadda O'zbekiston Respublikasida gidroenergetika tarmog'ini modernizatsiya qilish, yangi quvvatlarni ishga tushirish hamda mavjud gidroelektr stansiyalarining samaradorligini oshirish bo'yicha izchil islohotlar amalga oshirilmoqda. Jumladan, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2026-yil 1-mayda "Gidroenergetika sohasini yanada rivojlantirish bo'yicha kechiktirib bo'lmaydigan chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-163-son qarori qabul qilindi [4]. Mazkur qarorga muvofiq, "O'zbekgidroenergo" AJ faoliyati samaradorligini oshirish bo'yicha bir qator asosiy maqsadli ko'rsatkichlar belgilangan. Xususan, 2026-yil yakuniga qadar umumiy quvvati 114 MW bo'lgan yangi ishlab chiqarish quvvatlarini ishga tushirish hamda 7,1 mlrd kWh elektr energiyasi ishlab chiqarishga erishish rejalashtirilgan. 2032-yil yakuniga qadar esa respublikada umumiy quvvati 1 400 MW bo'lgan gidroto'plash elektr stansiyalarini barpo etish, shuningdek, gidroenergetika sohasida 3 266 MW qo'shimcha ishlab chiqarish quvvatlarini yaratish orqali mamlakatning umumiy gidroenergetika quvvatlarini 2,4 baravar oshirish vazifasi belgilangan.

Belgilangan maqsadlarga erishishda kichik va mikro gidroelektr stansiyalarini rivojlantirish, ayniqsa past va o'rta naporli suv oqimlaridan samarali foydalanishga mo'ljallangan zamonaviy gidroturbinalarni takomillashtirish muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur yo'nalishda mikro gidroelektr stansiyalari (Mikro GES) ekologik tozaligi, mahalliy sharoitlarga moslashuvchanligi va ishonchli ishlashi tufayli eng istiqbolli qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalaridan biri hisoblanadi. Mikro gidroenergetika texnologiyalari orasida ko'ndalang oqimli gidroturbinalar (Cross-Flow Turbines, CFT), ya'ni Michell-Banki turbinalari, 2–200 m oralig'idagi past va o'rta naporlarda samarali ishlash qobiliyati [5], 0,025–13 m³/s diapazondagi suv sarflariga moslasha olishi hamda tarkibida cho'kindi zarralari ko'p bo'lgan suv sharoitlarida ham barqaror ishlashi bilan ajralib turadi [6]. Ushbu turbinalarning konstruktiv jihatdan sodda tuzilishi, mahalliy sharoitlarda ishlab chiqarish imkoniyati va minimal texnik xizmat ko'rsatish bilan ishonchli ekspluatatsiya qilinishi ularni chekka va elektr ta'minoti yetarli darajada rivojlanmagan hududlar uchun samarali yechimga aylantiradi.

Ushbu afzalliklarga qaramay, ko'ndalang oqimli gidroturbinalarning qo'llanilishi Pelton, Frensis va Kaplan kabi an'anaviy gidroturbina texnologiyalariga nisbatan sekin rivojlanmoqda. Bunga asosan ularning gidravlik foydali ish koeffitsiyenti (odatda 70-85 %, an'anaviy turbinalarda esa 90-95 %) nisbatan pastligi hamda unumdorligi optimallashtirilgan standart loyihalash metodologiyalarining yetarli darajada ishlab chiqilmaganligi sabab bo'lmoqda [7].

Shu sababli, CFTlarning gidravlik samaradorligini oshirish va ularni turli ekspluatatsiya sharoitlariga moslashtirish uchun ishchi g'ildirak konstruksiyasi, xususan, parrak geometriyasini takomillashtirish muhim ilmiy-amaliy vazifalardan biri hisoblanadi. CFTlarning ishlash samaradorligiga ta'sir etuvchi asosiy omillardan biri parrak shakli geometriyasi, ayniqsa, parrakning kirish va chiqish qirralari shaklidir. Ushbu geometrik xususiyatlar oqim bilan o'zaro ta'sir, gidravlik energiyaning mexanik energiyaga aylanish jarayoni hamda konstruksiyaning ekspluatatsion mustahkamligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Parrakning kirish qirrasida suv oqimining ishchi g'ildirakka kirishi va parrak yuzasiga birikish jarayonini belgilasa, chiqish qirrasida oqim ajralishi hamda undan keyingi uyg'onish (wake) oqimi shakllanishini boshqaradi [8].



O'tkir qirrali parrak shakllari oqim yo'nalishini samarali boshqarishi va oqim ajralishini kamaytirishi mumkin, biroq bunday shakllar eroziya ta'siriga nisbatan sezgir hisoblanadi. Aksincha, yumaloq qirrali shakllar yuqori konstruktiv mustahkamlikni ta'minlasa-da, ayrim ish rejimlarida turbulentlikni kuchaytirishi va energiya yo'qotishlarini oshirishi mumkin [9].

Garchi avvalgi tadqiqotlarda sopro konfiguratsiyasi, oqimni boshqarish strategiyalari hamda ishchi g'ildirak aylanish tezligini optimallashtirish masalalari keng o'rganilgan bo'lsa-da, CFTlarda parrak shakli geometriyasining oqim tuzilishi va gidravlik samaradorlikka ta'sirini tizimli baholash bo'yicha tadqiqotlar hali ham yetarli emas [10]. Shu bilan birga, an'anaviy gidroturbinalarda aerodinamik va gidrodinamik jihatdan takomillashtirilgan parrak konstruksiyalaridan samarali foydalanib kelinmoqda. Jumladan, Frensis turbinalarida kavitatsiya hodisasini kamaytirish uchun burama parraklar, Kaplan turbinalarida esa turli yuklama sharoitlariga moslashuvchi rostlanuvchi parraklar qo'llaniladi. Bunday konstruktiv yechimlar oqimni boshqarish va energiya aylantirish samaradorligini oshirish imkonini beradi.

CFT parrak shakllari bo'yicha olib borilgan ayrim CFD tadqiqotlarida esa turli oqim sharoitlari va ish rejimlarida samaradorlik ko'rsatkichlarining sezilarli farqlanishi aniqlangan [11]. Buning asosiy sabablaridan biri CFTlarning ochiq ishchi g'ildirak konstruksiyasida yuzaga keladigan murakkab ikki fazali oqim jarayonlari bilan parrak geometriyasi o'rtasidagi o'zaro ta'sir mexanizmlarining yetarli darajada o'rganilmaganligidir.

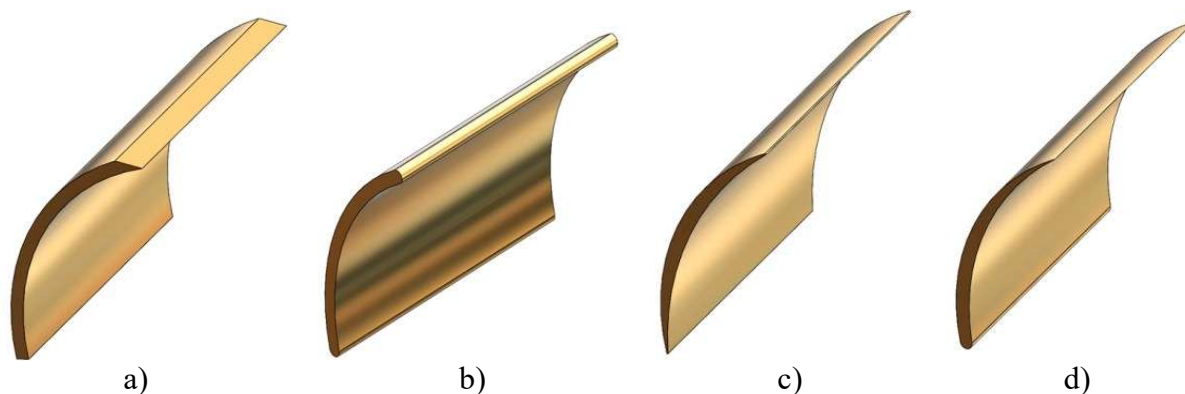
Shu bois, CFTlar uchun samarali parrak shaklini tanlash faqat gidravlik samaradorlikni oshirish bilan cheklanmasdan, konstruktiv mustahkamlik, ishlab chiqarish imkoniyatlari va iqtisodiy samaradorlikni ham hisobga oluvchi kompleks yondashuvni talab qiladi. Hozirgi kunga qadar CFTlarni optimallashtirish bo'yicha tadqiqotlarning aksariyati asosan gidravlik samaradorlikni maksimal oshirishga qaratilgan bir maqsadli yondashuvlarga asoslangan. Biroq, markazlashtirilmagan energiya tizimlarida mavjud material, texnologik va iqtisodiy cheklovlar sababli ko'p maqsadli optimallashtirish yondashuvlarini qo'llash muhim ahamiyat kasb etadi.

Murakkab parrak geometriyalari yuqori samaradorlikni ta'minlashi mumkin, biroq ularni ishlab chiqarish yuqori aniqlikdagi texnologiyalar va maxsus materiallarni talab qiladi. Shu bilan birga, soddakonstruksiyali tekis yoki yumaloq shaklli parraklar ishlab chiqarish va ekspluatatsiya jihatidan qulay bo'lsa-da, murakkab turbulent oqim sharoitlarida yuqori samaradorlikni ta'minlay olmasligi mumkin. Shuning uchun, ayniqsa tarmoqdan uzoq va qishloq hududlarida foydalaniladigan mikro GESlar uchun parrak geometriyasini optimallashtirishda gidravlik samaradorlik, konstruktiv ishonchlilik va ishlab chiqarish qulayligi o'rtasidagi maqbul muvozanatni ta'minlash zarur.

Shu bilan birga, markazlashtirilmagan gibrid qayta tiklanuvchi energiya tizimlarida gidroenergetikani quyosh fotoelektrik va shamol energetikasi bilan integratsiyalash istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Bunday tizimlar energiya samaradorligini oshirish, ekologik ta'sirni kamaytirish va elektr ta'minoti ishonchligini yaxshilash imkonini beradi. Shu nuqtai nazardan, samarali va moslashuvchan CFTlarni ishlab chiqish barqaror energiya ta'minoti hamda chekka hududlarni elektrlashtirish masalalarini hal etishda muhim ahamiyatga ega. Shu sababli, ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi ko'ndalang oqimli gidroturbinalarda turli parrak shakli geometriyalarining oqim xususiyatlari va gidravlik samaradorlikka ta'sirini CFD modellashirish asosida baholash hamda samaradorlik va konstruktiv maqbullik nuqtai nazaridan optimal parrak shaklini aniqlashdan iborat.

Usullar va materiallar.

Tadqiqot doirasida ko'ndalang oqimli (Banki) gidroturbinasining ishchi g'ildiragi uchun to'rtta turdagi parrak shakli - tekis, yumaloq, o'tkir qirrali va aerodinamik shakllar tanlandi. Parrak turlarini tanlashda ularning konstruktiv soddaligi, ishlab chiqarish texnologik imkoniyatlari hamda gidravlik samaradorlikni oshirish salohiyati asosiy mezon sifatida qabul qilindi (1-rasm). Barcha parrak modellari bir xil qalinlik parametriga ega holda shakllantirildi. Shu bilan birga, o'tkir qirrali shakl oqimga kirish zonasidagi yo'qotishlarni baholash uchun 1 mm o'lchamdagi kirish qirrasi bilan, aerodinamik shakl esa oqimning parrak yuzasidan ajralishini kamaytirish va oqim bilan o'zaro ta'sirni yaxshilash maqsadida assimetrik qanot kesimi asosida modellashirildi.



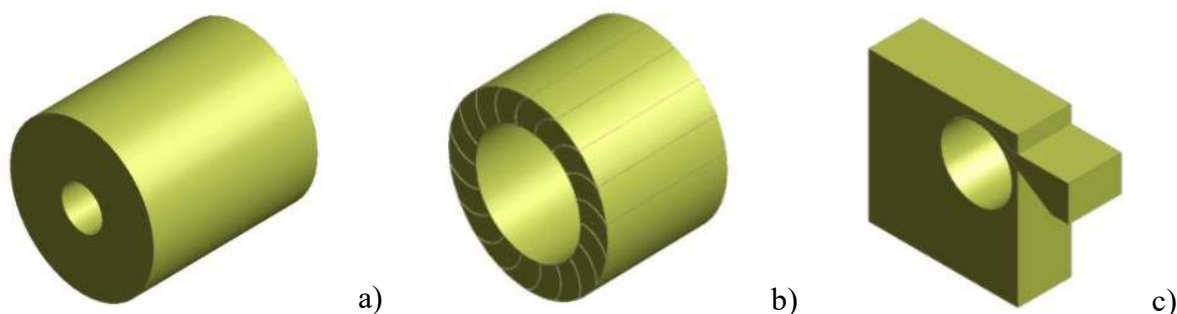
1-rasm. Tadqiqotda ko'rib chiqilgan parrak shakllari: tekis (a), yumaloq (b), o'tkir qirrali (c) va aerodinamik (d).

1-jadval

Modellashtirishda qo'llanilgan CFT turbinasining geometrik va ekspluatatsion ko'rsatkichlari

Loyihalash parametri	Belgilanishi	Qiymati	Birlik
Samarali napor	H	10	m
Suv sarfi	Q	55	l/s
Oqimning kirish burchagi	α_1	16	grad
Parrakka kirish burchagi (1-bosqich)	β_1	30	grad
Parrakdan chiqish burchagi (1-bosqich)	β_2	90	grad
Optimal ishchi g'ildirak aylanish tezligi	N	670	ayl/min
Ishchi g'ildirakning tashqi diametri	D_1	200	mm
Ishchi g'ildirakning ichki diametri	D_2	130	mm
Diametrlar nisbati	D_r	0,66	—
Oqim oqish qalinligi (jet qalinligi)	S_1	17	mm
Parraklar oralig'i	t_1	34	mm
Parraklar soni	Z_β	18	—
Parrak qalinligi (o'tkir qirrali shakldan tashqari)	t	3	mm
Soplo kirish yoyi burchagi	λ	90	grad
Parrak egrilik radiusi	r_β	33	mm
Markaziy burchak	δ	73,5	grad
Parrak kengligi	B_v	225	mm

Hisoblash modeli va sonli modellashtirish. Hisoblash sohasi ANSYS Design Modeler dasturiy muhiti yordamida modellashtirildi va uchta asosiy tarkibiy qismni o'z ichiga oldi: soplo, parraklarga ega ishchi g'ildirak va korpus (2-rasm). Statsionar va aylanuvchi sohalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirni aniq hisobga olish maqsadida Ko'p sanoq tizimli tayanch usuli qo'llanildi. Ishchi g'ildirak va uning parraklari aylanuvchi hisoblash sohasi, soplo hamda korpus esa statsionar (qo'zg'almas) soha sifatida belgilandi.



2-rasm. Hisoblash sohasining tarkibiy qismlari: erkin oqim ichki sohasi (a), ishchi g'ildirak (b) va suv yo'naltiruvchi soplo hamda tashqi korpus (c).



Statsionar va aylanuvchi hisoblash zonalari orasidagi gidrodinamik o'zaro ta'sirni ifodalash maqsadida Frozen Rotor interfeys modeli joriy etildi. Ushbu usul aylanuvchi va qo'zg'almas sanoq tizimlari orasidagi nisbiy holatni saqlagan holda, oqim jarayonlarini kvazi-statsionar rejimda hisoblash imkonini beradi hamda to'liq nostatsionar modellashga nisbatan talab etiladigan katta hisoblash xarajatlarini kamaytiradi. Garchi uch o'lchovli modellash ikkilamchi oqimlar va murakkab turbulentlik hodisalarini batafsil ifodalash imkonini bersada, oldingi tadqiqotlar [12] 3D hisoblash natijalarida qo'shimcha ikkilamchi oqim yo'qotishlari hisobiga samaradorlik qiymatlari taxminan 3-4 % pastroq aniqlanishini ko'rsatgan. Shu sababli, ushbu tadqiqotda parrak geometriyasining gidravlik ko'rsatkichlarga ta'sirini qiyosiy baholash maqsad qilinganligi sababli, 2D statsionar CFD modeli hisoblash aniqligi va samaradorligi nuqtai nazaridan maqbul yondashuv sifatida tanlandi.

ANSYS CFX muhitida statsionar hisoblashlar suv va havoni o'zaro kirishuvchi uzluksiz fazalar sifatida ifodalovchi bir jinsli ikki fazali erkin sirt modeli asosida bajarildi. Bunda ikkala faza uchun umumiy tezlik, bosim va turbulentlik maydonlari qabul qilindi. Ushbu modellash yondashuvi erkin sirt chegarasini aniqlash jarayonini soddalashtirish bilan birga, ko'ndalang oqimli (Banki) gidroturbinasining ish jarayonida yuzaga keladigan erkin sirt oqimining asosiy fizik xususiyatlarini yetarli darajada aks ettirish imkonini beradi. Hisoblashlarda qo'llanilgan boshqaruvchi tenglamalar Reynolds o'rtachalashtirilgan Navye–Stoks (RANS) tenglamalar tizimiga asoslangan bo'lib, aylanuvchi sohada yuzaga keladigan inertsia va aylanish effektlarini hisobga olish uchun aylanuvchi sanoq tizimi (rotating reference frame) orqali modifikatsiya qilindi [13]. Mazkur tenglamalar quyidagi ifodalardan iborat:

Uzluksizlik tenglamasi (massa saqlanish tenglamasi):

$$\frac{\partial(\alpha_P \rho_P)}{\partial x} + \nabla \cdot (\alpha_P \rho_P) = S_P \quad (1)$$

Impuls saqlanish tenglamasi (aylanuvchi sanoq tizimida):

$$\frac{\partial(\alpha_P \rho_P \vec{V}_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_P \rho_P \vec{V}_r \vec{V}_r) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{V}_r) + \alpha_P \rho_P (2\vec{\omega} \times \vec{V}_r + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{a} \times \vec{r} + \vec{a}) = \nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{V}_r)^T + S_{MP} \quad (2)$$

bu yerda:

$$\vec{P} = P + \frac{2}{3} \rho_P k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \nabla \cdot \vec{V} \quad (3)$$

bu yerda, α_P fazaning hajmiy ulushini, ρ_P faza zichligini, S_P esa faza massasining manba hadini bildiradi. $\vec{V}_r$ nisbiy oqim tezligi vektori, $\vec{\omega}$ aylanishning burchak tezlik vektori hisoblanadi. $2\vec{\omega} \times \vec{V}_r$ hadi Koriolis tezlanishini, $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$ hadi markazdan qochma tezlanishni, $\vec{a} \times \vec{r}$ hadi esa aylanish tezligining o'zgarishi natijasida hosil bo'ladigan qo'shimcha tezlanishni ifodalaydi. $\vec{a}$ hadi nisbiy tezlikning chiziqli o'zgarishlari bilan bog'liq tezlanishni hisobga oladi. Tenglamalarda qo'llanilgan "p" indeksi har bir fazaning tegishli fizik xususiyatlarini belgilash uchun ishlatiladi.

Parrak geometriyasining turbina gidravlik samaradorligiga ta'sirini aniqlash uchun to'rtta turdagi parrak shakli - tekis, yumaloq, o'tkir qirrali va aerodinamik shakllar tanlab olinib, ishchi g'ildirakning 270, 540, 670, 800 hamda 940 rpm aylanish tezliklarida tizimli ravishda qiyosiy tahlil qilindi.

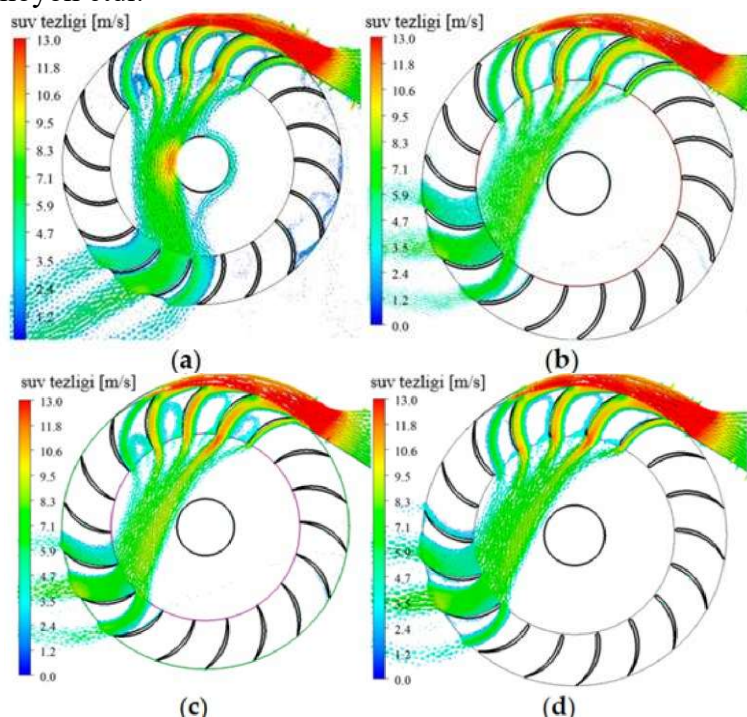
Natijalar

Mazkur bo'limda ishchi g'ildirakning turli aylanish tezliklari (270-940 rpm) sharoitida to'rtta parrak shakli - tekis, yumaloq, o'tkir qirrali va aerodinamik shakllar bo'yicha tezlik hamda bosim maydonlarining kompleks tahlili keltiriladi. Bunda parrak geometriyasining moment hosil bo'lish jarayoni, oqim strukturasining shakllanishi va gidravlik energiyaning mexanik energiyaga aylanish samaradorligiga ta'siri baholanadi.

Tezlik maydoni va oqim komponentlari tahlili: Ishchi g'ildirak ichidagi tezlik maydoni parrak shaklining geometrik xususiyatlari hamda aylanish tezligining ichki oqim dinamikasi va turbina gidravlik ko'rsatkichlariga ta'sirini baholash maqsadida tahlil qilindi. 270 rpm tezlikda (3-rasm) tekis va yumaloq shaklli parraklarda nisbiy tezliklarning yuqori qiymatlari hamda kiruvchi oqimning parrak geometriyasiga moslashuvining yetarli emasligi kuzatildi. Natijada parrakning oldingi qirralari yaqinida oqim ajralishi, turbulentlik darajasining ortishi va oqimning parrak yuzasiga yopishish xususiyatining yomonlashuvi yuzaga keldi. Shu bilan birga, o'tkir qirrali va aerodinamik

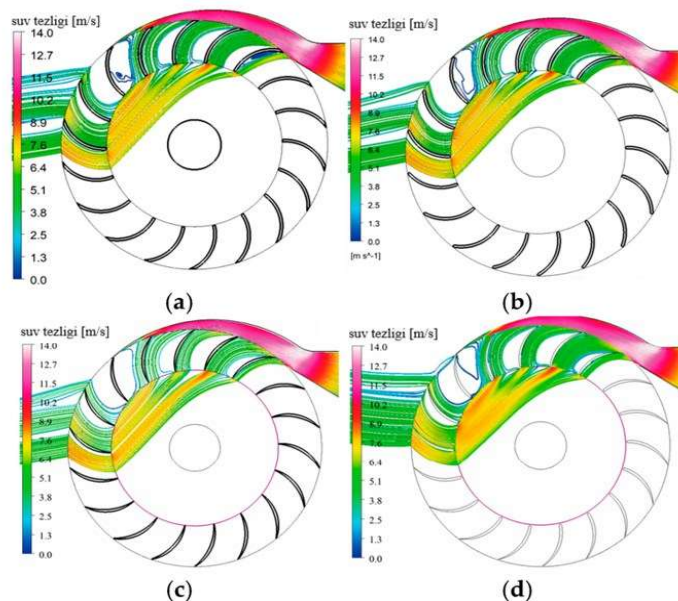


shaklli parraklarda oqim yoʻnalishining yaxshiroq boshqarilishi hamda ajralish hodisalarining kamayishi kuzatildi. Ayniqsa, aerodinamik shakl tezlik maydonining eng barqaror va bir tekis taqsimlanishini namoyon etdi.



3-rasm. 270 rpm aylanish tezligida turli parrak shakllari uchun suv oqimi tezligi taqsimoti: tekis (a), yumaloq (b), oʻtkir qirrali (c) va aerodinamik (d).

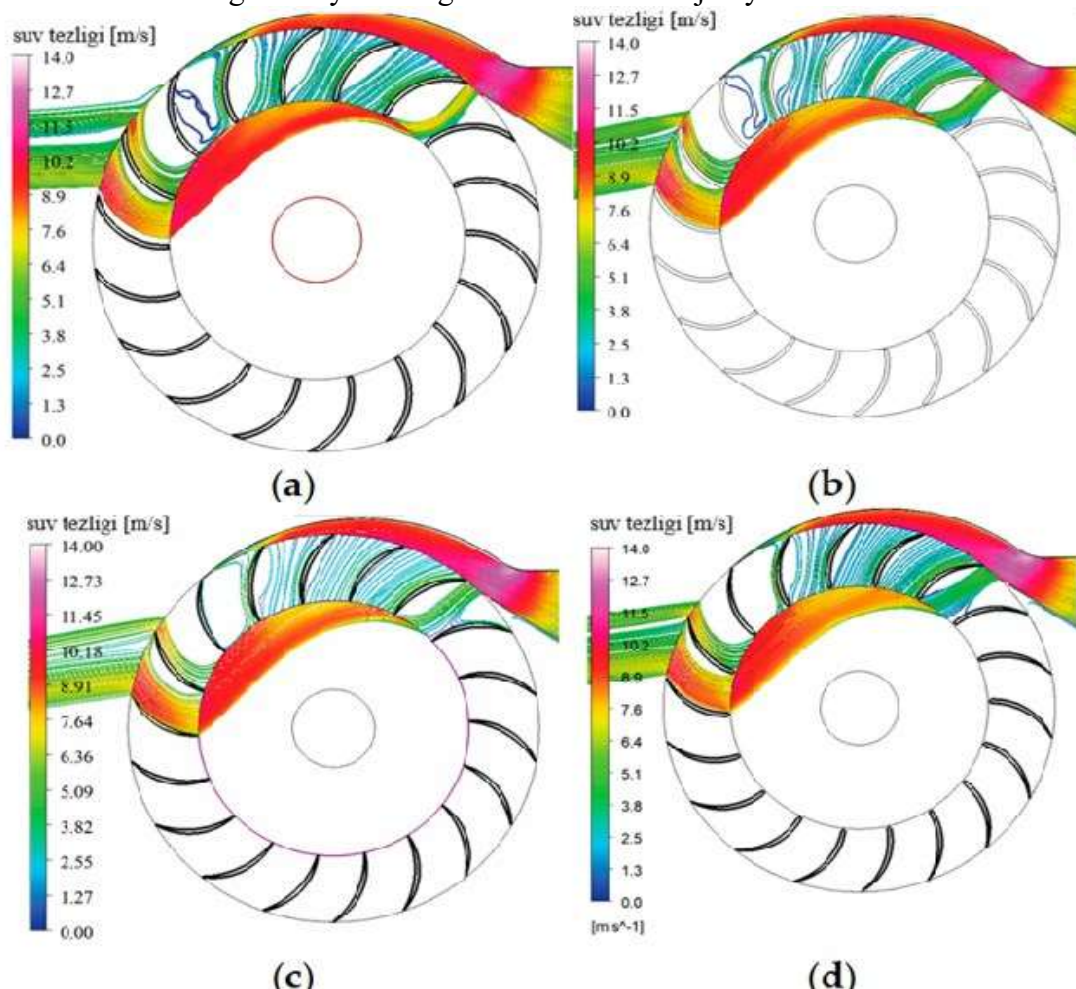
670 rpm optimal aylanish tezligida (4-rasm) parrak harakati va kiruvchi oqim yoʻnalishi oʻrtasida eng qulay gidrodinamik moslashuv shakllandi. Aerodinamik shaklli parrak oqimning silliq burilishini taʼminlab, tezlik gradientlarini kamaytirdi va oqim buzilishlarini minimallashtirdi. Natijada energiya almashinuvi jarayoni yaxshilandi hamda yuqori gidravlik samaradorlikka erishildi. Oʻtkir qirrali shakl ham oqimni samarali boshqarish xususiyatini namoyon qilgan boʻlsa-da, tekis va yumaloq shaklli parraklarda mahalliy qayta aylanish zonalari va ikkilamchi oqimlar mavjudligi saqlanib qoldi.



4-rasm. 670 rpm aylanish tezligida turli parrak shakllari uchun suv oqimi tezligi taqsimoti: tekis (a), yumaloq (b), oʻtkir qirrali (c) va aerodinamik (d).



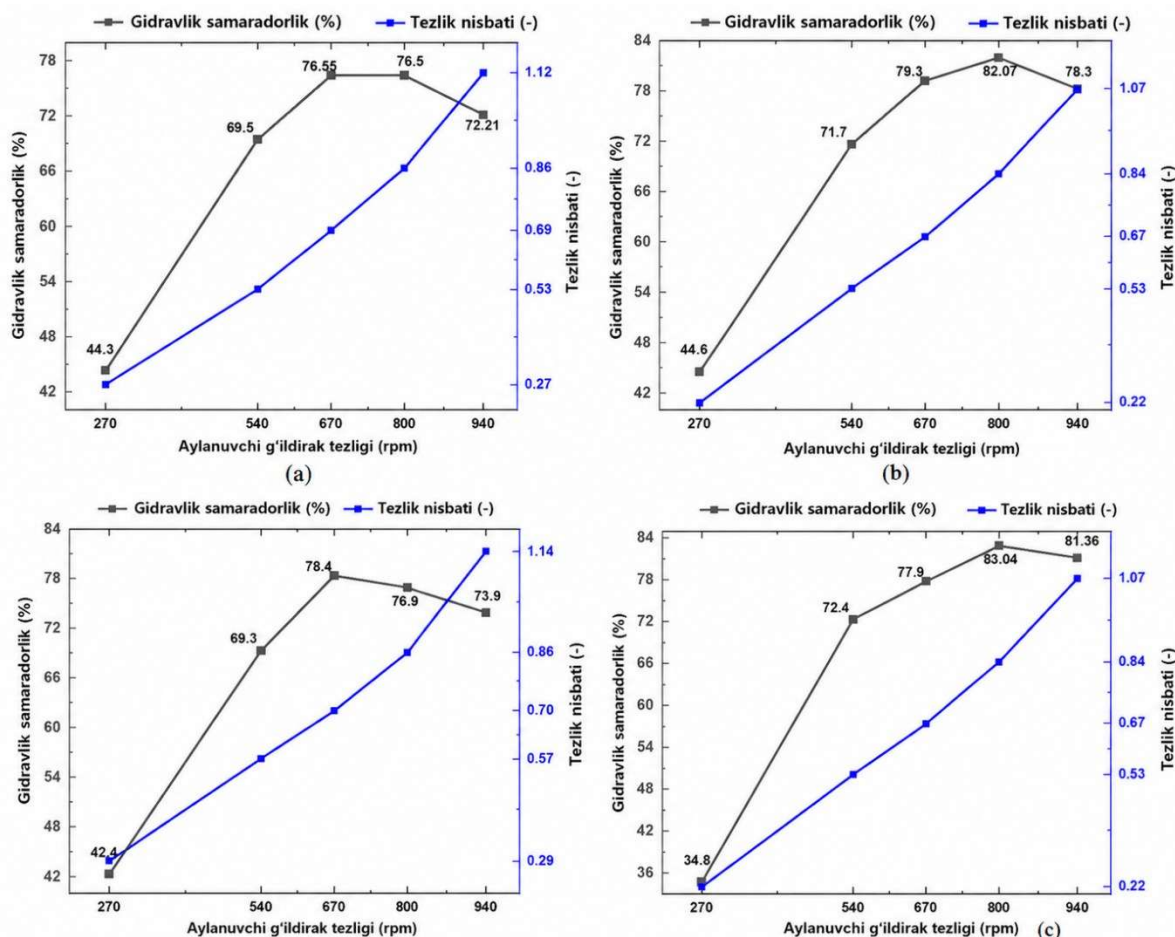
940 rpm yuqori aylanish tezligida (5-rasm) barcha parrak shakllarida nisbiy tezliklarning kamayishi kuzatildi, bu esa oqim tezligi bilan parrak aylanish tezligi o'rtasidagi farqning qisqarishi bilan izohlanadi. Biroq aerodinamik shakl ushbu rejimda ham oqim strukturasi barqarorligini saqlab, gidravlik yo'qotishlarni kamaytirish imkonini berdi. O'tkir qirrali parraklar o'rtacha gidrodinamik ko'rsatkichlarni namoyon etdi, tekis va yumaloq shaklli parraklarda esa orqa qirra yaqinida turbulentlikning kuchayishi va girdob hosil bo'lish jarayonlari kuzatildi.



5-rasm. 940 rpm aylanish tezligida turli parrak shakllari uchun suv oqimi tezligi taqsimoti: tekis (a), yumaloq (b), o'tkir qirrali (c) va aerodinamik (d).

Ko'ndalang oqimli gidroturbinaning gidravlik samaradorligi turli tezlik nisbatlariga mos keluvchi ishchi g'ildirak aylanish tezliklarida to'rtta parrak shakli - tekis, yumaloq, o'tkir va aerodinamik geometriyalar uchun baholandi. Tadqiqot natijalari turbina gidravlik samaradorligi parrak geometriyasi hamda ish rejimini ifodalovchi tezlik nisbatiga sezilarli darajada bog'liqligini ko'rsatdi. Tahlil natijalariga ko'ra, aerodinamik va o'tkir parrak shakllari, ayniqsa optimal tezlik nisbatlari oralig'ida, boshqa shakllarga nisbatan yuqori gidravlik samaradorlikni ta'minladi. Aerodinamik parrak shakli ishchi g'ildirakning 800 rpm aylanish tezligida, 0,84 tezlik nisbatida 83,04 % maksimal gidravlik samaradorlikka erishdi. O'tkir parrak shakli esa 1,14 tezlik nisbatida 83,01 % gidravlik samaradorlikni namoyon etdi (6-rasm).

Mazkur natijalar aerodinamik va o'tkir parrak geometriyalari suv oqimining kinetik energiyasini ishchi g'ildirak kanallari bo'ylab samaraliroq yo'naltirish va undan foydalanish imkonini berishini ko'rsatadi. Bunday geometriya oqimning parrak yuzasidan ajralishini hamda turbulent yo'qotishlarni kamaytiradi, natijada energiya yo'qotishlari qisqarib, turbina gidravlik samaradorligi ortadi. Shu sababli ushbu parrak shakllari ko'ndalang oqimli gidroturbinalarining yuqori samaradorlikka ega konstruksiyalarini ishlab chiqishda istiqbolli yechim sifatida qaralishi mumkin.



6-rasm. Turli ishchi g'ildirak aylanish tezliklari va tezlik nisbatlarida gidravlik samaradorlikning o'zgarishi: tekis parrak (a), yumaloq parrak (b), o'tkir parrak (c) va aerodinamik parrak (d).

Xulosa

Mazkur tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, parrak shaklining geometrik shakli ko'ndalang oqimli (CFT) gidroturbinasining ichki oqim jarayonlari va gidravlik samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. CFD tahlillari asosida aerodinamik shakl barcha ish rejimlarida eng yuqori ko'rsatkichlarni namoyon etib, 800 ayl/min tezlikda 83,5 % maksimal gidravlik samaradorlikka erishdi. Ushbu shakl barqaror tezlik maydoni, past turbulentslik va samarali energiya almashinuvini ta'minladi. O'tkir qirrali parraklar o'rta tezliklarda yuqori samaradorlik ko'rsatgan bo'lsa-da, nostandart ish rejimlarida barqarorligi pastroq bo'ldi. Tekis va yumaloq shakllar esa konstruktiv soddaligiga qaramay, oqim ajralishi, bosim yo'qotishlari va turbulentslikning ortishi sababli pastroq samaradorlikni namoyon etdi. Bosqichli energiya almashinuvi tahlili birinchi bosqich umumiy quvvat hosil bo'lishida asosiy rol o'ynashini ko'rsatdi. Shuningdek, bosim taqsimoti, suv hajmiy ulushi va oqim chiziqlari tahlillari aerodinamik shaklning oqim barqarorligini oshirishi, havo aralashuvi va energiya yo'qotishlarini kamaytirishini tasdiqladi.

Olingan natijalar aerodinamik parrak shakllarining mikro-gidroenergetik qurilmalardagi samaradorlik afzalliklarini tasdiqlab, yuqori gidrodinamik ko'rsatkichlarga ega gibrid konstruksiyalarni ishlab chiqish imkoniyatlarini ko'rsatdi. Shuningdek, optimallashtirilgan ko'ndalang oqimli turbinalarni quyosh fotoelektrik tizimlari va energiya saqlash qurilmalari bilan integratsiyalash markazlashtirilmagan qayta tiklanuvchi energiya tizimlarining ishonchliligi va samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Adabiyotlar

- [1]. International Energy Agency (IEA). Access to Electricity [Elektron resurs]. - Paris, France. - URL: <http://www.iea.org/weo/electricity.asp>



- [2]. The High-Level Political Forum. Goals Energy Action [Elektron resurs]. - URL: <https://hlpf.un.org/>.
- [3]. Eludoyin E.O. The Nature of Sustainable Energy Access Transitions: Realities and Possibilities for Lagos, Nigeria: Ph.D. Thesis. – London: UCL Energy Institute, University College London, 2018. - 421 p. - URL: http://discovery.ucl.ac.uk/10057177/7/Eludoyin_10057177_thesis_redacted_photo.pdf
- [4]. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2026-yil 1-maydagi “Gidroenergetika sohasini yanada rivojlantirish bo‘yicha kechiktirib bo‘lmaydigan chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi qarori [Elektron resurs]. - URL: <https://lex.uz/ru/docs/8168754>.
- [5]. Kaunda C. Energy situation, potential and application status of small-scale hydropower systems in Malawi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2013. -Vol. 26. -P. 1-19. - DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.034.
- [6]. Sammartano V., Aricò C., Carravetta A., Fecarotta O., Tucciarelli T. Banki-Michell optimal design by computational fluid dynamic testing and hydrodynamic analysis // Energies. - 2013. -Vol. 6, No. 5. - P. 2362–2385. - DOI: 10.3390/en6052362.
- [7]. Adhikari R., Wood D. The design of high efficiency crossflow hydro turbines: A review and extension // Energies. - 2018. - Vol. 11, No. 2. - Art. 267. - DOI: 10.3390/en11020267.
- [8]. Assefa E.Y., Tesfay A.H. Effect of blade number on internal flow and performance characteristics in low-head cross-flow turbines // Energies. - 2025. - Vol. 18, No. 2. - Art. 318. - DOI: 10.3390/en18020318.
- [9]. Guo Q., Zhou L., Wang Z. Numerical evaluation of the clearance geometries effect on the flow field and performance of a hydrofoil // Renewable Energy. - 2016. -Vol. 99. - P. 390-397. - DOI: 10.1016/j.renene.2016.06.064.
- [10]. Desai V.R., Aziz N.M. An experimental investigation of cross-flow turbine efficiency // Journal of Fluids Engineering. - 1994. - Vol. 116. - P. 545-550. - DOI: 10.1115/1.2910311.
- [11]. Sinagra M., Picone C., Aricò C., Pantano A., Tucciarelli T., Hannachi M., Driss Z. Impeller optimization in crossflow hydraulic turbines // Water. - 2021. - Vol. 13, No. 3. - Art. 313. - DOI: 10.3390/w13030313.
- [12]. Phillips T.S., Roy C.J. Richardson extrapolation-based discretization uncertainty estimation for computational fluid dynamics // Journal of Fluids Engineering. - 2014. - Vol. 136, No. 12. - Art. 121401. - DOI: 10.1115/1.4027353.
- [13]. Javaherchi T., Stelzenmuller N., Seydel J., Aliseda A. Experimental and numerical analysis of a scale-model horizontal axis hydrokinetic turbine // Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium (METS2014). - Seattle, WA, USA, 15-18 April 2014.