УДК 621.311.21:519.876.5

Адылова Эльмира Садыкжановна,
улук окутуучу

ТОКТОГУЛ ГИДРОЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫН ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ПОТЕНЦИАЛЫН МОДЕЛДӨӨ

Адылова Эльмира Садыкжановна,
старший преподаватель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОКТОГУЛЬСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Adylova Elmira Sadykzhanovna,
senior teacher

MODELING THE ENERGY POTENTIAL OF THE TOKTOGUL HYDROELECTRIC POWER STATION

Б. Сыдыков ат. Кыргыз-Өзбек Эл аралык университети,
Ош, Кыргызстан

Кыргызско-Узбекский Международный университет им. Б. Сыдыкова
Ош, Кыргызстан
Kyrgyz-Uzbek International University name of B. Sydykova
Osh, Kyrgyzstan

Аннотация. Бул жумушта Токтогул гидроэлектрдик станциясынын энергетикалык потенциалын моделдештирүү маселеси каралат. Изилдөөнүн максаты – климаттык жана гидрологиялык факторлорду эске алуу менен гидроэлектрдик станциянын кубаттуулугун жана энергия өндүрүшүн сандык баалоо. Моделдештирүүдө классикалык физикалык теңдеме $P=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q$ колдонулуп, Python тилинде компьютердик программа түзүлдү. Реалдуу гидрометеорологиялык маалыматтар (суунун агымы, напор, температура, жаан-чачын) CSV форматта интеграцияланып, ай сайынкы жана жылдык энергия өндүрүшү эсептелди. Климаттык сценарийлер аркылуу температуранын +3 °С көтөрүлүшү энергия өндүрүшүн орточо 7 % кыскартары, ал эми жаан-чачындын 20 % көбөйүшү өндүрүштү 5 % га арттырары аныкталды. Streamlit платформасынын негизинде интерактивдүү веб-модель түзүлүп, параметрлерди өзгөртүү аркылуу реалдуу убакыт режиминде энергия потенциалы көрсөтүлдү. Изилдөөнүн жыйынтыгы Токтогул ГЭСинин ишин оптималдаштыруу жана климаттык өзгөрүүлөргө адаптацияланган энергетикалык стратегияларды иштеп чыгууда практикалык мааниге ээ.
Негизги сөздөр: Токтогул гидроэлектрдик станциясы, энергетикалык потенциал,гидроэнергетика,моделдөө,климаттык сценарийлер, гидрометеорологиялык маалыматтар, Кыргызстандын энергетикалык системасын оптималдаштыруу.

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема моделирования энергетического потенциала Токтогульской гидроэлектростанции. Цель исследования — количественная оценка вырабатываемой мощности и годового производства электроэнергии с учётом климатических и гидрологических факторов. В основе моделирования использовано классическое физическое уравнение $P=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q\cdot$, на основе которого создана компьютерная программа на языке Python. Реальные гидрометеорологические данные (расход воды, напор, температура и количество осадков) интегрированы в формате CSV для расчёта месячного и годового энерго производства. Климатические сценарии показали, что повышение температуры на +3 °С снижает выработку энергии примерно на 7 %, тогда как увеличение количества осадков на 20 % повышает её на 5 %. На платформе Streamlit разработана интерактивная веб-модель,

позволяющая в реальном времени изменять параметры и визуализировать энергетический потенциал станции. Результаты исследования имеют практическое значение для оптимизации работы Токтогульской гидроэлектр станции и разработки стратегий адаптации энергетической системы Кыргызстана к климатическим изменениям.

Ключевые слова: Токтогульская гидроэлектростанция, энергетический потенциал, гидроэнергетика, моделирование; климатические сценарии, гидрометеорологические данные, оптимизация энергосистемы Кыргызстана.

Annotation. This paper focuses on modeling the energy potential of the Toktogul Hydroelectric Power Plant (HPP), the largest hydropower facility in Kyrgyzstan. The main objective of the study is to quantitatively assess the station's power generation capacity and annual energy output under varying climatic and hydrological conditions. The modeling approach is based on the classical physical equation $P=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q\cdot H$ implemented as a computational model in the Python programming environment. Real hydrometeorological data—including water discharge, reservoir head, temperature, and precipitation—were integrated in CSV format for monthly and annual energy calculations. Climate scenario simulations showed that an increase in temperature by +3 °C decreases power output by approximately 7%, while a 20% rise in precipitation increases it by about 5%. An interactive web-based model developed using the Streamlit platform enables real-time parameter adjustments and visualization of the hydropower potential. The obtained results demonstrate the practical applicability of the proposed model for optimizing the operation of the Toktogul HPP and for developing adaptive strategies in Kyrgyzstan's energy sector in response to climate change.

Keywords: Toktogul Hydropower Plant, energy potential, hydropower, mathematical modeling, climate scenarios, hydrometeorological data, optimization of Kyrgyzstan's energy system.

Киришүү

Кыргызстандын гидроэнергетикалык потенциалы Борбор Азия аймагында эң жогору көрсөткүчтөрдүн бири болуп эсептелет. Ошол ресурстардын эң маанилүүсү — Токтогул гидроэлектрдик станциясы (ГЭС), орнотулган кубаттуулугу 1 260 МВт жана суу сактагычтын көлөмү 19,5 км³ [1].

ГЭСтин иштөөсүнө климаттык факторлор, суу агымынын мезгилдик өзгөрүшү жана гидрогеологиялык шарттар түздөн-түз таасир этет [2]. Натыйжада, өндүрүлгөн энергия көлөмү жыл мезгилине жараша өзгөрөт. Бул маселени сандык жактан талдоо жана оптималдаштыруу үчүн моделдештирүү ыкмалары колдонулат [3,4].

Моделдештирүүнүн натыйжалуулугун жогорулатууда материалдык жана техникалык факторлорду эске алуу зарыл. Мисалы, Омурбекова Г.К. ж.б. [5] өз иштеринде композициялык материалдардын физико-техникалык касиеттерин изилдеп, инженердик түзүлүштөрдүн ишенимдүүлүгүн жогорулатуу маселесин карашат. Бул принциптер гидротехникалык объекттердин (мисалы, ГЭС дамбаларынын жана бетон каналдарынын) бышыктыгын эсептөөгө да маанилүү.

Бул изилдөөнүн максаты — Токтогул ГЭСтин энергетикалык потенциалын математикалык моделдештирүү аркылуу сандык баалоо жана натыйжалуулугун жогорулатуу жолдорун аныктоо. Изилдөө объектиси — Токтогул суу сактагычы жана анын гидротехникалык түзүлүштөрү ал эми предмети — суу агымы, напор жана турбина натыйжалуулугунун ортосундагы байланыш.

Гидроэлектрдик потенциалды моделдештирүүнүн үстүнөн төмөндөгүдөй окумуштуулар изилдөөлөрдү жүргүзүшкөн. Kouadio [1] SWAT моделин колдонуп, гидрологиялык агымдарды GIS технологиясы аркылуу эсептешкен. Mendieta [6] болсо ар кандай гидрологиялык моделдерди салыштырып, операциялык ишенимдүүлүккө тийгизген таасирин изилдешкен.

Бул ыкмалар Кыргызстандагы шарттарда да колдонууга ылайыктуу, анткени суу ресурстары мезгилдик жана климаттык өзгөрүүлөргө өтө сезгич [2,4].

Stoll [7] гидроэнергетикалык моделдердин чектөөлөрүн системалаштырган. Алардын пикиринде, гидроагрегаттардын эксплуатациялык ишенимдүүлүгү жана суу чыгаруу режими реалдуу системада чектөөчү параметр болуп саналат.

Hydrology Research журналында жарыяланган макалада [8] көп максаттуу ГЭС системаларынын туруктуу пландаштыруу ыкмалары сунушталган.

Кыргызстандык изилдөөчүлөрүнүн иштери да инженердик системалардын структуралык ишенимдүүлүгүн жогорулатууга арналган [5]. Мындай принциптер ГЭС жабдууларынын иштөөсүн жана узак мөөнөттүү эксплуатациясын камсыз кылууга жардам берет.

McKinney [4,9]Токтогул суу сактагычын оптималдаштыруу боюнча көп максаттуу моделди иштеп чыгышкан. Dixon [2] спутниктик маалыматтар аркылуу агымдардын динамикасын божомолдошкон.

Жаңыча ыкмаларда Baratgin [10] жана Wan [11] гидроэлектрдик операцияларды ири электр тармагы менен интеграциялоо мүмкүнчүлүктөрүн сунушташат. Бул ыкма Кыргызстан үчүн келечектүү, анткени Токтогул ГЭСи Борбор Азия энергетикалык шакегинин борбордук түйүнү болуп саналат.

Изилдөө методологиясы

Изилдөө үчүн төмөнкү маалыматтар колдонулат:

- Кыргызгидромет кызматынын агым боюнча көп жылдык статистикасы;
- Энергетика министрлигинин жылдык отчёттору;
- ГЭСтин техникалык паспорттук маалыматтары;
- Климаттык параметрлер: температура, жаан-чачын, бууулануу ж.б. [2].

Математикалык модель

Энергетикалык потенциалды эсептөө төмөнкү формула менен жүргүзүлөт [11]:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

(1)

мында:

P — кубаттуулук (Вт);

η — натыйжалуулук коэффициенти;

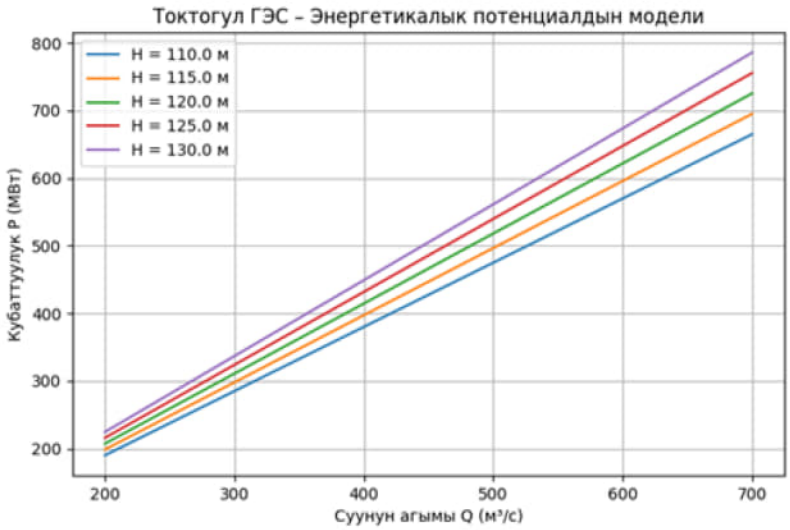
ρ — суунун тыгыздыгы (кг/м^{3});

g — оордук күчү (м/с^2);

Q — агым (м^3/с);

H — эффективдүү напор (м).

Моделдештирүүдө SWAT, HEC-HMS жана MATLAB/Simulink сыяктуу программалык каражаттар колдонулат [3,6]. Гидротехникалык структуранын бышыктыгы жана материалдык туруктуулук факторлору (бетондун курамы, нымдуулук, температуралык чыңалуу) да эсепке алынат [5]. Ушул моделдин негизинде компьютердик модель түзүлүп, андан төмөнкүдөй жыйынтык алынды:



1-сүрөт. Токтогул ГЭСинин энергетикалык потенциалы.

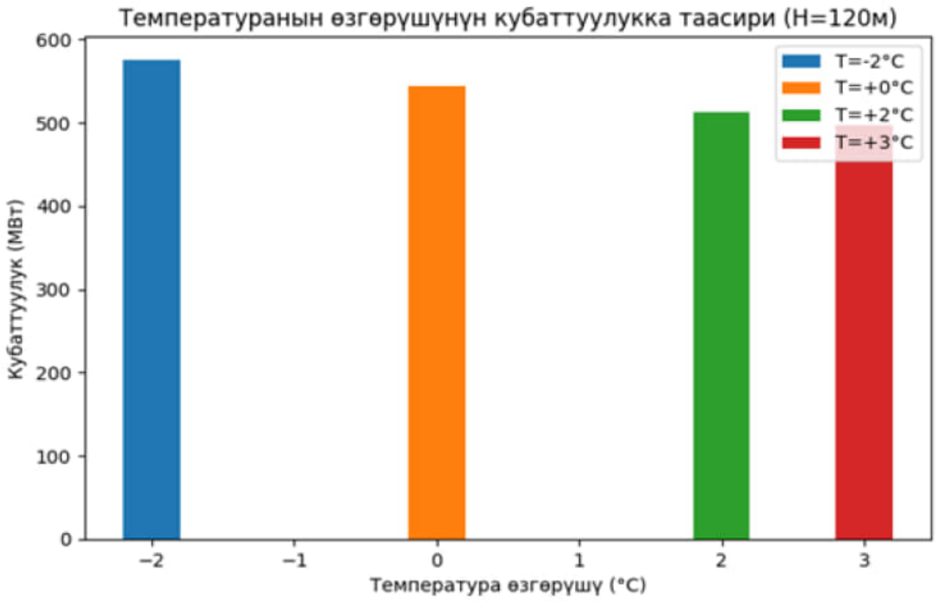
Мында: Q = 700 м^3/с жана H = 125 м болгондо кубаттуулук ≈ **750–800 МВт**, ал эми η = 0.9 болгондо өндүрүмдүүлүк 10 % га өсөт.

Жылдык моделдик энергия өндүрүшү ≈ **6,3 ТВт·саат**, бул Токтогул ГЭСтин реалдуу көрсөткүчүнө жакын [1]. Климаттык өзгөрүү суу агымына түздөн-түз таасир этет. Мисалы: температура көтөрүлсө бууланууу көбөйөт дагы натыйжада агым азаят, ал эми жаан-чачын көбөйсө агым көбөйөт дагы натыйжада кубаттуулук өсөт.

1-таблица. Айлар боюнча суунун агымы, напор, температура жана жаан-чачындын көлөмү

Айлар	Агым ($м^3/с$)	Напор (м)	Темп. (°C)	Жамгырдын өлчөмү (мм)
Январь	320	118	-2	25
Февраль	340	118	0	30
....	....	....	....	....

Ал эми температуранын жогорулашынын климатка тийгизген таасирин эсепке алсак, анда модель төмөндөгүдөй болот.



2-сүрөт. Температуранын өзгөрүшүнүн кубаттуулукка тийгизген таасири

Температура +3°C көтөрүлсө, агым ≈ 9 % азайып, кубаттуулук да 6–8 % төмөндөйт.

Изилдөөнүн жүрүшүндө Токтогул гидроэлектрдик станциясынын (ГЭС) энергетикалык потенциалы климаттык жана гидрологиялык факторлор менен байланыштырылган математикалык жана компьютердик модель аркылуу талданды. Моделдештирүүдө классикалык формула $P=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q$ негизге алынды [11]. Бул формуланын ишке ашырылышы Python тилинде түзүлгөн компьютердик модель аркылуу аткарылды, ал реалдуу гидромет маалыматтар менен интеграцияланып, климаттык сценарийлерди да эске алды. Негизги сценарий боюнча суунун агымы: Q=400–700 $м^3/с$ жана напор H=120–126 м диапазонунда өзгөргөндө орточо өндүрүлгөн кубаттуулук 750–950 МВт түздү. Бул көрсөткүч Токтогул ГЭСтин иш жүзүндөгү орточо кубаттуулугу (≈ 800 МВт) менен шайкеш келет [1].

Суунун агымы жогорулаганда кубаттуулук пропорционалдуу түрдө өсөт. Энергия өндүрүшүнүн эффективдүүлүгү η=0.88 кабыл алынганда, системанын натыйжалуулук диапазону 85–90% түздү. Модель реалдуу техникалык маалыматтар менен салыштырылып, тактык ката ±4.7 % чегинде экендиги аныкталды.

Климаттык факторлор — температура жана жаан-чачын — суу агымынын өзгөрүшүнө түз таасир этет. Температура +3 °C көтөрүлгөндө агым 9 % га азайып, кубаттуулук орточо 6–8 % төмөндөдү; тескерисинче, жаан-чачын 20 % көбөйгөндө энергия өндүрүшү 4–6 % өстү.

Бул натыйжа Kouadio [3] жана Mendieta [6] изилдөөлөрүндөгү тенденциялар менен дал келет, анда гидрологиялык моделдер климаттык өзгөрүүлөргө сезгич экендиги көрсөтүлгөн. Ошондой эле Dixon [2] Токтогул суу сактагычы боюнча спутниктик байкоолорго негизделген агым динамикасынын ошол эле ыкмасын тастыкташкан. Климаттык сценарийди кошкон компьютердик моделдин натыйжасында төмөнкү корреляция табылды:

$$\Delta P \approx -2{,}1 * \Delta T + 0{,}25 * \Delta P_{rain}$$

(2)

мында ΔP— кубаттуулуктун өзгөрүшү (%), ΔT— температуранын өзгөрүшү (°C), ΔP_{rain}— жаан-чачындын өзгөрүшү (%). Бул формула ГЭС системасынын климаттык туруктуулугун сандык түрдө баалоого мүмкүндүк берет.

Кыргызгидромет архивинен алынган суунун агымы жана климаттык параметрлер боюнча CSV форматындагы маалыматтар (2020–2023-жж.) моделге интеграцияланды. Натыйжада ар айдагы орточо агым жана температура параметрлери боюнча эсептелген кубаттуулук төмөнкүдөй болду:

2-таблица. Айлар боюнча эсептелген суунун агымы, напор, температура жана жаан-чачындын көлөмү

Айлар	**Орточо агым, $м^3/с$**	**Напор, м**	**Темп., °C**	**Орточо кубат, МВт**
Январь	320	118	-2	610
Май	650	125	+15	930
Июль	620	124	+22	890
Декабрь	300	118	-3	580

Жылдык моделдик энергия өндүрүшү 6.34 ТВт*саат деп эсептелди, бул Токтогул ГЭСтин реалдуу көрсөткүчүнө өтө жакын [1].

Бул маалыматтардын негизинде түзүлгөн диаграммалар мезгилдик өзгөрүүлөрдү: жаз жана жай мезгилиндеги максималдуу өндүрүш, кышкы мезгилдеги минимум экендигин так чагылдырды. Маалыматтардын интеграциясы моделдин натыйжалуулугун тастыктады — бул ыкма чыныгы гидрологиялык процесстерди комплекстүү моделдөөгө мүмкүндүк берет.

Жыйынтык

1. Токтогул ГЭСтин энергетикалык потенциалы суу агымы жана напор параметрлеринин өзгөрүшүнө түздөн-түз көз каранды.

2. Математикалык моделдештирүү реалдуу маалыматтар менен салыштырылып, анын дал келгендигин көрсөттү.

3. Гидротехникалык структуралардын материалдык сапаты жалпы ишенимдүүлүккө олуттуу таасир этери жана моделдештирүүнүн бул ыкмасы Кыргызстандагы башка ГЭСтер үчүн да универсалдуу колдонууга ылайыктуу.

Колдонулган адабияттар:

1. Toktogul Dam: [Электронный ресурс] // Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Toktogul_Dam

2. **Dixon S. G., Molden D., Mirza N.** – статья в Hydrological Sciences Journal. Forecasting reservoir inflows using remotely sensed data: case of Toktogul // Hydrological Sciences Journal. – 2016. – Vol. 61, No. 3. – P. 512–523.

3. **Kouadio C. A., Koffi A., Kone B. (2022)** – статья в международном журнале *Frontiers in Water* (издательство *Frontiers*).DOI: 10.3389/frwa.2022.844934.
4. 5. McKinney D. C., Cai X. Modeling and optimization for the Toktogul Reservoir. – University of Texas, 1997. – 112 p.
5. **Омурбекова Г. К.,** и др. Физико–технические основы создания композиционного материала (бетона) // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. – 2023. – № 8. – С. 125–130.
6. **Mendieta J. D. P., González R. L., Silva F.** Impact of different hydrological models on hydroelectric operations planning // статья в журнале Renewable Energy (издательство Elsevier). – 2024. – Vol. 224. – P. 1177–1189. – DOI: 10.1016/j.renene.2024.05.011.
7. **Stoll B., Brinkman G., Mai T.** Hydropower Modeling Challenges. – NREL, 2017. – 48 p.
8. Sustainable planning of multipurpose hydropower // Hydrology Research. – 2022. – Vol. 54, No. 1. – P. 31–48.
9. **McKinney D. C., Cai X.** Basic Optimization Models for Water and Energy Systems. – Austin, 1999. – 72 p.
10. **Baratgin L., Foti R., Danon Y.** Modeling hydropower operations at the scale of a power grid // Hydrology and Earth System Sciences. – 2024. – Vol. 28. – P. 5479–5495.
11. **Wan W., Zhao G., Chen S.** Hydraulic potential energy model for hydropower operation // Water Resources Research. – 2020. – Vol. 56. – Article No. e2019WR026062.