

PRIRODNI PROCESI NA PODRUČJU BIVŠE AKUMULACIJE NA RIJECI DNJEPRU NAKON RAZARANJA BRANE HIDROELEKTRANE KAHOVKA (КАХОВСЬКА ГЕС)

dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emerit., dr. sc. Tanja Roje-Bonacci, prof. emerit.

Brana Kahovka na rijeci Dnjepru srušena je 6. lipnja 2023. Fotografija srušene brane nalazi se na [slici 1](#).



Slika 1: Pogled na srušeni dio brane Kahovka

Izgradnja brane Kahovka na rijeci Dnjepru u Hersonskoj oblasti u Ukrajini započela je u rujnu 1950. godine. Posljednji generator pušten je u rad u listopadu 1956. godine. Bila je to šesta i najnižvodnija brana u kaskadi brana i akumulacija na Dnjepru u Ukrajini. Prema projektnoj dokumentaciji na normalnoj razini vode u akumulaciji od 16,0 m nad morem (m n. m.), površina vodnog lica Kahovske akumulacije bila je 2155 km², a uskladišteni volumen vode iznosio je 18,2 km³. Duljina akumulacije bila je 230 km, a širina joj se kretala između 9,3 km i 25 km. Prosječna dubina bila je 8,3 m, a najveća je iznosila 36 m (Baksheev 2006).

Na [slikama 2 i 3](#) nalaze se fotografije brane snimljene iz satelita i betonski dio brane i akumulacije Kahovka prije rušenja. Ukupna duljina brane je 3273 m, a visina 30 m. Brana je bilo dijelom nasuta, zemljana. Kroz dio korita rijeke brana je bila gravitacijska, betonska, sastavljena od 22 preljevna polja, 6 proizvodnih polja i brodske prijevodnice. Brana je imala veliki prometni značaj jer su preko nje prolazili cestovni i željeznički promet.

Akumulacija Kahovka bila je višenamjenska. Koristila se za proizvodnju hidroenergije, navodnjavanje, plovību, hlađenje nuklearne elektrane Zaporozje (najjače nuklearne elektrane u Europi), opskrbu vodom, industriju, privredni ribolov, kao i za brojne ekološke svrhe.

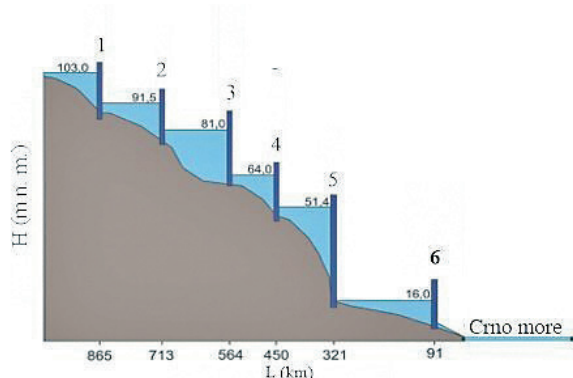
Godine 1932. u skladu s planom elektrifikacije Sovjetskog Saveza dovršena je prva hidroelektrana na Dnjepru u Zaporozju u području brzaka. Bila je to najveća hidroelektrana u Europi sve do izgradnje velikih hidroelektrana na Volgi 1950-ih godina. Potpuno ju je uništila njemačka vojska tijekom Drugog svjetskog rata. Brana je obnovljena 1947. godine, a kapacitet joj je povećan. Rijeka Dnjepar u Ukrajini energetske je iskorištena izgradnjom šest stepenica. Na svakoj je protočna hidroelektrana različite snage. Na [slici 4](#) prikazan je lanac od 6 velikih hidroelektrana na Dnjepru kroz Ukrajinu: 1 – HE Kijev; 2 – HE Kanjev; 3 – HE Kremenčuk; 4 – HE Kamjanske; 5 – HE Dnjepar; 6 – HE Kahovka. Stepence su, uz proizvodnju energije, osiguravale nesmetani plovni put u dužini od cca 900 kilometara, duž rijeke Dnjepra uzvodno od grada Kijeva



Slika 2: Pogled na branu Kahovka iz satelita



Slika 3: Pogled uzvodno na betonski dio brane i jezero



Slika 4: Uzdužni presjek kroz 6 dnjeparskih brana i akumulacija

do ušća u Crno more. Ukupni pad u cijelom sustavu je 103,0 metra. U gornjem toku Dnjepra u Bjelorusiji postoje dvije akumulacije i u Rusiji jedna. One su značajno manje od ovih šest izgrađenih u Ukrajini te nemaju utjecaja na hidrološki režim Dnjepra u njegovom donjem toku kroz Ukrajinu.

Jedan od bitnih razloga izgradnje akumulacije Kahovka bio je osiguravanje potrebnih količina vode za navodnjavanje sušne regija donjeg Dnjepra i Krima, tijekom vegetacijskog razdoblja. U prosjeku se na navodnjavanje trošilo 65 % ukupnog volumena korištene vode tijekom ljetnog razdoblja. U posljednjih desetak godina kao posljedica porasta temperature zraka ponekad je ova vrijednost dosegla vrijednost od 76 %.

Rijeka Dnjepr (*Dnieper, Dnepr, Dnipro*) izvire u Rusiji, teče kroz Bjelorusiju i Ukrajinu. Ulijeva se u Crno more. Dnjepr izvire na visini 220 m n. m. Površina sliva prema raznim izvorima kreće se između 504.000 km² i 516.300 km². Četvrta je po veličini europska rijeka poslije Volge, Dunava i Urala. Podaci o njejoj dužini prema raznim izvorima variraju između 2145 km i 2287 km. Dužina riječnog toka iznosi u Rusiji 485 km, u Bjelorusiji 595 km i u Ukrajini 1095 km (<https://simple.wikipedia.org/wiki/Dnieper>). Opći je pad rijeke neznan, stoga je brzina voda mala, skoro tri puta sporija od brzine tečenja vode u Volgi.

Prosječni godišnji protok na najnižvodnijoj postaji Herson koja je smještena neposredno pri ušću procijenjen je na 1670 m³/s ili 53 km³ godišnje. Radi se o količinama protoka koje su postojale u prirodnom stanju, dakle prije izgradnje kaskada brana, akumulacija i rada hidroelektrana. Treba napomenuti da su srednje godišnje protoke tijekom pojedinih godina značajno varirale. Zadnjih godina kao posljedica zahvata vode iz rijeke, isparavanje iz brojnih ribnjaka i akumulacija te klimatskih promjena, prije svega regionalnog porasta temperatura zraka, došlo je do smanjenja prosječnih protoka na ušću. Prosječni godišnji protok vode u HE-u Kahovka u razdoblju od 1956. do 2020. iznosio je 1.290 m³/s ili 40,7 km³ godišnje. Istjecanje vode iz uzvodnog HE-a Dnjepr tijekom istog razdoblja bio je veći te je iznosio 1420 m³/s ili 44,8 km³ godišnje (Vyshnevskiy i

Kutsiy 2022).

Nizvodno od Hersona Dnjepr tvori deltu, čiji se brojni krakovi ulijevaju u Crno more. U prirodnim uvjetima Dnjepr je imao velike protoke tijekom proljeća i jeseni, a niske protoke tijekom ljeta i zime. Izgradnja brana i pogon akumulacija značajno su promijenile prirodni hidrološki režim. Rijeka Dnjepr sada ima izražene visoke protoke u proljeće, smanjene protoke ljeti i niske protoke od rujna do ožujka. Proljetno topljenje snijega u gornjem dijelu sliva bitno utječe na hidrološki režim. Oko 60 % godišnjeg otjecanja događa se tijekom tri mjeseca, od ožujka do svibnja.

U gornjem toku Dnjepr je zaleđen 5 mjeseci, a u donjem 3 mjeseca. Razdoblje stabilnog leda na otvorenim vodama počinje u gornjem Dnjepru početkom prosinca, a u donjem Dnjepru krajem prosinca. Otapanje počinje početkom travnja u gornjem toku, a početkom ožujka u donjem toku.

Nakon razaranja brane Kahovska akumulacija, koja je bila najveća po volumenu uskladištene vode na rijeci Dnjepru, vrlo je brzo nestala, tj. transformirala se u mrežu riječnih rukavaca, jezera i močvara. Na slici 5 ucrтана je situacija s naznačenim područjem plavljenja nakon rušenja brane. Današnje stanje u velikoj mjeri ovisi o protoku vode koja se ispušta iz uzvodnog HE-a Dnjepr. U uvjetima velikog protoka, pretežni dio bivše Kahovske akumulacije prekriven je vodom znatno niže dubine od one koja je bila dok brana nije bila razorena.



Slika 5: Situacija područja HE-a Kahovka s kanalom za dovod vode na Krim

Istodobno s pražnjenjem akumulacije započeo je proces njezina zarastanja (Dovhanenko i sur. 2024). Dominantna vrsta postala je vrba, koja danas pokriva najveću površinu. Povoljni klimatski uvjeti u prvoj godini nakon nesreće uzrokovali su njenu abnormalnu stopu rasta, ovisnu o sedimentima tla. U području koje je bogato organskim sedimentima, srednja visina stabala do 21. lipnja 2024. dosegla je 4,5 m. Veličine stabala i stopa rasta na područjima pokrivenim pjeskovitim sedimentima mnogo su manje. Danas veliko područje bivšeg rezervoara izgleda kao gusta šuma.

Kuzemko i sur. (2024) vršili su terenska istraživanja u sjevernom području bivše akumulacije 30. lipnja 2024. i

19. listopada 2024. godine. Tijekom prve posjete uočena je vrlo velika gustoća stabala. U listopadu 2024. gustoća stabala značajno se smanjila, ali je prosječna visina biljke povećana na 190 cm, s maksimalnom visinom od 309 cm. U listopadu je uočena pojava trske duž stalnih vodotoka. U drugom slučaju pronađeno je 68 vrsta viših vaskularnih biljaka.

Nepsha i sur. (2024) pokušali su utvrditi ekološke posljedice razaranja brane Kahovka na biološku raznolikost regije. Glavne metode istraživanja bile su: teorijska generalizacija i sistemsko-funkcionalni pristup, analiza, sinteza i ekspedicijske metode. Ekološke posljedice razaranja dijele se na one koje uzrokuje odvodnja područja, tj. nestanak akumulacije i one koje se javljaju kao posljedica poplava. Vodeni biotopi i biotopi karakteristični za jako vlažna područja bila su najviše pogođeni nestankom vode iz akumulacije. Procijenjeno je da je 38 rijetkih vrsta biotopa, koji su pod zaštitom Bernske konvencije, bilo pogođeno ekološkom katastrofom. Ozbiljne ekološke štete pretrpjele su i močvare od međunarodnog značaja zaštićene Ramsarskom konvencijom čija je površina od 33.000 ha smještena u delti Dnjepa kao i sedam objekata Emerald mreže. Poplava koja je nastala nakon rušenja brane nizvodno je potopila 48 objekata rezervata prirode, ukupne površine 120.000 ha.

Kako se sve više inzistira i provodi uklanjanje brana, znanstvenu zajednicu zanimaju procesi koji se odvijaju nakon njihovog uklanjanja kako u prostoru bivše akumulacije, tako i nizvodno od nje. Vrše se razna istraživanja, kao npr. utjecaj na termički režim, kvalitetu vode, cvjetanje algi, biološku raznolikost, mogućnosti ljudske upotrebe te vode itd. Utvrđeno je da je u slučaju uklanjanja jedne brane u Češkoj područje bez vode vrlo brzo zaraslo bijelim vrbama i crnim topolama. Ova činjenica pokazala je visoku i dugotrajnu održivost sjemena vrba u vodi, a potvrđena je i u slučaju nestanka vode iz akumulacije Kahovka. Slične posljedice smanjenja razine vode uočene su i u velikom bazenu za hlađenje bivše nuklearne elektrane Černobil.

Koliko su to ograničene mogućnosti pristupa terenu omogućavale, napravljene su brojne druge studije o promjenama nastalim nakon razaranja brane i nestanka vode iz Kahovske akumulacije, najveće i najnižvodnije na rijeci Dnjepar. Utvrđeno je da su bitnu ulogu na toplinski režim u prostoru bivše Kahovske akumulacije imale uzvodne akumulacije s visokim branama i u njima formiranim dubokim vodama. Osim toga utvrđeno je da je temperatura površinske vode bivše akumulacije uvelike ovisila na udarima vjetrova na njenu prostranu površinu vodnog lica (Vyshnevskiy i Shevchuk 2021; Vyshnevskiy i Shevchuk 2024a, 2024b). Nakon rušenja brane na području bivše akumulacije formirala se mreža riječnih rukavaca. Dotjecanje hladne vode u glavnom kraku rijeke nizvodno od HE-a Dnjepar u proljeće i ljeto osjetio se na udaljenosti od više od 100 km.

Vode u Kahovskoj akumulaciji bile su vrlo bogate anorganskim fosforom (P). Tijekom posljednjih

desetljeća koncentracija anorganskog fosfora imala je tendenciju porasta. Istovremeno je koncentracija dušikovih spojeva (N) bila stabilna. Kao rezultat toga, omjer N/P u vodi Kahovske akumulacije bila je najmanja (oko 5) u usporedbi s ostalim uzvodnim akumulacijama Dnjeparske kaskade (Vyshnevskiy 2020; Zhezheria i sur. 2022).

Uništenje HE-a Kahovka značajno je utjecalo na ekonomske, socijalne i ekološke procese. Zbog nestanka akumulacije nije moguće navodnjavanje na velikom teritoriju Južne Ukrajine i Krima, a potrošnja industrijske vode i one za domaćinstva znatno je ograničena (Khoriev i Karamushka 2024).

Nestanak akumulacije uzrokovao je naglu promjene mikroklimatskih uvjeta, koja se manifestirala porastom temperature zraka i tla te promjenom količina evapotranspiracije (Pichura i sur. 2024).

Nakon rušenja brane većina živih organizama, kao što su ribe, mekušci, razne vrste dvokrilaca, koji su bili nastanjeni u akumulaciji su nestali. Prije nesreće bilo je čak 43 vrsta riba, od kojih je 20 vrsta bilo od industrijskog značaja s godišnjim ulovom do 2600 tona. Pretpostavlja se da će za njihovo obnavljanje trebati najmanje od 7 do 10 godina.

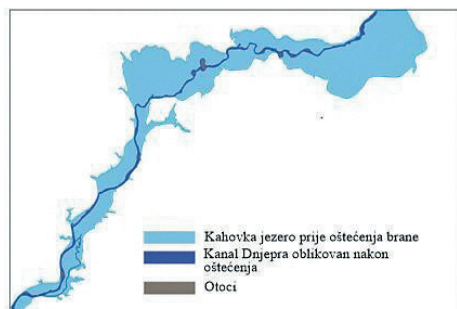
Vodozemci i gmazovi su i u stanju prije rušenja bili najmalobrojniji od svih klasa kralježnjaka u pogledu sastava vrsta. Otprilike od 15 do 18 vrsta bilo je izravno ili neizravno pogođeno isušivanjem akumulacije. Posljedice nestanka vode iz akumulacije različite su za vodozemce i gmazove. Vodozemci su ugroženi zbog uništavanja staništa i vode za mrijest. Za većinu vrsta gmazova, isušena područja mogu potencijalno postati mjesta naseljavanja i daljnjih promjena u strukturi i brojnosti vrsta. Istovremeno, vrste koje ovise o vodenim staništima su pod pritiskom te bi mogle nestati iz tog područja ili se s vodenim masama preseliti u druga područja (Nepsha i sur. 2024).

Zbog gotovo potpunog nestanka akumulacije Kahovka, za pretpostaviti je da će broj vrsta ptica koje se gnijezde na ovom području biti znatno reduciran.

Klimatske promjene predstavljaju važan čimbenik koji već utječe, a u budućnosti se može realno očekivati njihov još snažniji utjecaj na ekosustave u proučavanom području. Recentna klima na jugu Ukrajine je toplija i sušnija nego što je bila u prošlosti, što može negativno utjecati prvenstveno na razvoj vrba. Nepsha i sur. (2024) pretpostavljaju da će se zbog toga udio topola na površini bivše akumulacije postupno povećavati.

Tijekom 2024. godine pojavili su se dugotrajni šumski požari na području bivše akumulacije. Trajali su od 9. srpnja do 14. srpnja 2024., od 26. srpnja do 30. srpnja 2024., te od 16. kolovoza do 21. kolovoza 2024. Uzimajući u obzir klimatske promjene, za očekivati je da će se šumski požari u ovom području češće javljati u budućnosti.

Na prostoru bivše akumulacije Kahovka započelo je formiranje novog ekosustava. Proučavanje faza ove sukcesije trenutno je ometeno vojnim aktivnostima u



Slika 6: Shematski prikaz stanja prije i poslije rušenja brane

regiji. Jedina dostupna metoda praćenja ovog složenog ekološkog procesa je daljinska detekcija. Zbog toga se još uvijek ne mogu dati pouzdani odgovori na brojna pitanja. Predviđa se da će u budućnosti, kada se vlaga sedimenata smanji, stopa rasta također smanjiti. Realno je očekivati da će se uvjeti na prostoru nekadašnje akumulacije približiti onima koji su postojali prije njenog formiranja. To je moguće uočiti i sa [slike 6](#) na kojoj je dan shematski prikaz stanja prije i poslije rušenja brane. ■

LITERATURA

Baksheev, E. A. 2008. *Dnipro reservoirs and their economic effect: memories and reflections of a designer*. Dovira.

Dovhanenko, D. O.; Yakovenko, V. M.; Brygadyrenko, V. V.; Boyko, O. O. 2024. Characteristic of the dried-up zone formed as a result of the breach of the Kakhovka dam. *Biosystems Diversity*. 32(2): 285–295. DOI:10.15421/012431.

Khoriev, M.; Karamushka, V. 2024. Assessment of water needs in the lower Dnipro subbasin following the destruction of the Kakhovka Reservoir. *Research Square*. DOI:10.21203/rs-4480879/v1.

Kuzemko, A.; Prylutskyi, O.; Kolomytsev, G.; Didukh, Y.; Moysiienko, I.; Borsukevych, L.; Chusova, O.; Splodytel, A.; Khodosovtsev, O. 2024. Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*. DOI:10.21203/rs.3.rs-4137799/v1.

Nepsha, O.; Hryshko, S.; Prokhorova, L.; Zavialova, T.; Lisenko, V. 2024. Environmental Consequences of the Explosion of the Kakhovsky Hydroelectric Plant on Biodiversity. *Revista de la Universidad del Zulia*. 15(42): 163–178. DOI:10.46925/rdluz.42.09.

Pichura, V.; Potravka L.; Dudiak N.; Bahinskyi, O. 2024. Natural and climatic transformation of the Kakhovka reservoir after the destruction of the dam. *Journal of Ecological Engineering*. 25(7): 82–104.

DOI:10.12911/22998993/187961.

Vyshnevskyi, V. I. 2020. Hydrological and hydrochemical regime of the Dnieper reservoirs. *Hydrobiological Journal*. 56(4): 103–120. DOI:10.1615/HydrobJ.v56.i4.80.

Vyshnevskyi V. I.; Shevchuk S. A. 2021. Thermal regime of the Dnipro Reservoirs. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 69(3): 300–310. DOI:10.2478/johh-2021-0016.

Vyshnevskyi, V. I., Kutsiy, A. V. 2022. *Long-term changes in the water regime of rivers in Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka. (<https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/56293>).

Vyshnevskyi V. I.; Shevchuk, S. A. 2024a. Natural Processes in the Area of the Former Kakhovske Reservoir After the Destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*. 17(2): 147–164. DOI:10.2478/jlecol-2024-0014.

Vyshnevskyi, V. I.; Shevchuk, S. A. 2024b. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 81(1): 275–288. DOI:10.1080/00207233.2024.2320033.

Zhezherya, V. A.; Zhezherya, T. P.; Linnik, P. M. 2022. Nutrients in the water of the reservoirs of the Dnieper Cascade after the Dnieper River regulation. *Hydrobiological Journal*. 58(22): 79–97. DOI:10.1615/HydrobJ.v58.i2.70.

<https://simple.wikipedia.org/wiki/Dnieper>