



Cavitation Effect Indicators on Kaplan Turbines

Pokazatelji dejstva kavitacije na Kaplan turbinama

G. Orašanin^{1*}, S. Simić¹, S. Šijaković¹, J. Blagojević¹

¹Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Abstract: During the exploitation of hydropower plants, there are various impacts that negatively affect their efficacy. One of the biggest problems that occurs during the operation of these plants is the appearance of cavitation on the turbine blades. The impact of cavitation on the technical performances of the hydropower plant is unfavorable, and the goal is to minimize its impact, i.e. reduce it to an acceptable level. The paper presents the impact of cavitation on reaction turbines in Višegrad Hydro Power Plant (Višegrad HPP). The cavitation and abrasive effects on vertical Kaplan turbines were investigated. During testing, NDT testing (non-destructive testing) methods were used. Based on the obtained results of the damage test of Kaplan turbines, it can be concluded that these turbines are significantly exposed to the effect of cavitation, as well as damage due to the effect of sand and other sediments in the water. It is necessary to carry out further research in terms of preventive measures in order to achieve optimal functioning of these hydro turbines.

Keywords: cavitation, impact, indicators, Kaplan turbines

Apstrakt: Prilikom eksploatacije hidroenergetskih postrojenja dolazi do različitih uticaja koji se negativno održavaju na njihov efikasan rad. Jedan od najvećih problema koji se javlja u toku rada ovih postrojenja je pojava kavitacije na lopaticama turbine. Uticaj kavitacije na tehničke performanse hidroenergetskog postrojenja je nepovoljan i cilj je da se njen uticaj minimizira odnosno svede na prihvatljiv nivo. U radu je prezentovan uticaj kavitacije na reakcione turbine u Hidroelektrani Višegrad (HE Višegrad). Vršeno je ispitivanje dejstva kavitacije i abrazivnog dejstva na vertikalne Kaplan turbine. Prilikom ispitivanja korišćene su metode „NDT ispitivanja“ (non – destructive testing). Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja oštećenja Kaplan turbina može se zaključiti da su ove turbine u značajnoj mjeri izložene dejstvu kavitacije, kao i oštećenjima usljed dejstva pijeska i drugih sedimenata koji se nalaze u vodi. Neophodno je provoditi dalja istraživanja u pogledu preventivnih mjera u cilju postizanja optimalnog rada ovih hidroturbina.

Ključne riječi: kavitacija, uticaji, pokazatelji, Kaplan turbine

1 UVOD

Hidroenergija je jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije, a ujedno i jedini koji je ekonomski konkurentan energiji dobijenoj iz fosilnih goriva i nuklearnoj energiji. Za iskorišćenje potencijala energije vode koriste se hidroelektrane različitih konstrukcija. To su energetska postrojenja koja energiju vode pretvaraju u električnu energiju. Energija vode je energija pritiska, energija položaja i kinetička energija. Navedene

energije se preko hidraulične turbine pretvaraju u mehaničku energiju obrtnog kretanja koju generator pretvara u električnu energiju te je putem razvoda šalje u sistem snabdijevanja [1]. Postoje različite konstrukcije hidrauličnih turbina, a najčešće su u primjeni Kaplanova, Fransisova i Peltonova turbina.

Upravljanje hidroelektranama u toku njihovog rada predstavlja važan faktor za postizanje veće efikasnosti hidroturbina. Nakon nekoliko godina rada turbine

*goranorasanin@yahoo.com

pokazuju smanjene performanse jer se iz različitih razloga ozbiljno oštećuju [3]. Glavni uzroci oštećenja hidroturbina su problemi vezani sa kavitacijom, erozijom, mehaničkim oštećenjima, zamorom materijala, i dr. Kavitacija predstavlja najveći problem koji negativno utiče na performanse turbina, a ujedno može izazvati njihova velika oštećenja.

U radu su prezentovani rezultati ispitivanja dejstva kavitacije i abrazivnog habanja Kaplan turbine.

2 NASTAJANJE I NEGATIVNI EFEKTI KAVITACIJE KOD HIDRAULIČNIH TURBINA

Kavitacija je veoma važan hidrodinamički fenomen koji se javlja u mnogim oblastima povezanim sa transportom tečnosti. Kavitacija se može umanjiti, ali se ne može do kraja izbjeći [1]. Poznato je da hidraulične mašine najčešće trpe jake vibracije, buku, materijalnu štetu i dr. zbog kavitacije. Kavitacija je veoma štetna za hidrauličnu mašinu i njen sistem jer narušava kvalitet rada i životni vijek postrojenja [5].

Većina rijeka sadrži visoke koncentracije sedimenata. Visoka koncentracija sedimenata dovodi do ozbiljnog habanja turbina koje rade u tim uslovima. Singh i ostali 2012 [6] navodi da je jedan od glavnih uzroka materijalnog oštećenja turbina visoko prisustvo pijeska (posebno kvarca) i mulja u dovodnom cjevovodu turbine, te da u većini praktičnih slučajeva kavitacionu eroziju potpomažu čvrste čestice prisutne u tečnom mediju. Lian i ostali 2018 [4], Wang i ostali 2018 [10] eksperimentalnim istraživanjem pokazuju i da se oštećenja povećavaju sa povećanjem veličine sedimenata. Zajedničkim djelovanjem kavitacije i habanja materijala pijeskom može doći do ozbiljne abrazije i smanjenja hidrauličnih performansi turbine. Funkcionalnost hidraulične turbine je na taj način u velikoj mjeri ugrožena. Kavitacija je po pravilu karakteristična za čist tok vode, dok je habanje specifično za oštećenje pijeskom, a abrazija se odnosi na oštećenje usljed zajedničkog dejstva kavitacije i habanja [11]. Rezultat zajedničkog djelovanja kavitacije i habanja prouzrokuje veću eroziju, u odnosu na ukupnu eroziju nastalu usljed dejstva sedimenata i tečnosti [6].

Kavitacija najčešće ima negativne posljedice kao što su: smanjenje efikasnosti hidraulične mašine, povećanje buke i vibracija. Isto tako, može uzrokovati oštećenja tokom implozije kavitacionih mjehurova kada dolazi do oštećenja materijala tzv. pitting (kavitacijska erozija). Erozijska oštećenja tokom rada mašina mogu uzrokovati nastanak pukotina što povećala troškove održavanja i rekonstrukcije turbinske opreme [9] što znači da je njihova blagovremena sanacija nužna.

Koliko brzo će se materijal razarati zavisi od više faktora. Između ostalog zavisi od veličine kavitacionih mjehurova, veličine i količine sedimenata u vodi, karakteristika materijala od kojih je napravljena turbina, ali i od uslova rada hidrauličnog postrojenja.

3 ANALIZA RADA I ISPITIVANJE KAPLAN TURBINA NA UTICAJ KAVITACIJE

Prosječna godišnja proizvodnja u Hidroelektrani Višegrad (HE Višegrad) u posljednjih 20 godina iznosi oko 976 GWh električne energije. Instalirana snaga ove hidroelektrane od 3 x 105 MW ostvaruje se pomoću vertikalnih Kaplan turbina. Pouzdanost i sigurnost u radu, a samim tim i efikasnost ovog postrojenja je od velikog značaja.

Da bi se imao jasan uvid u uslove pri kojima rade turbine prezentovani su i određeni tehnički parametri procesa. U tabeli 1 prikazane su minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti dotoka i protoka kroz Kaplan turbine u toku 2021. godine.

Tabela 1. Protoci kroz turbine (m^3/s)

Dotok		
Min	Max	Prosjeck
38	1722	352
Protok		
Max	Prosjeck	
1786	352	
Kroz turbine		
Max	Prosjeck	
767	335	

U tabeli 2 je prikazano vrijeme rada agregata, broj njihovog pokretanja i proizvodnja električne energije u 2021. godini za svaki agregat. Iz tabele 2 se može vidjeti da su potrebe za proizvodnjom električne energije

zahtijevale i određen broj pokretanja agregata. U 2021. godini bilo je ukupno 754 pokretanja sva tri agregata. Agregat 1 (AG1) najviše puta je pokrenut (282 puta), a agregat 3 (AG3) najmanje (227 puta). Agregat 2 (AG2) u toku godine je pokrenut 245 puta.

Tabela 2. Vrijeme rada agregata, broj pokretanja agregata i proizvedena električna energija

	Vrijeme rada agregata (h)	Broj pokretanja agregata	Godišnja proizvodnja (MWh)
AG1	4.470,41	282	387.386,1
AG2	5.075,02	245	438.890,37
AG3	4.089,02	227	357.587,73
Ukupno	13.643,45	754	1183.864,2

Kada se analizira rad agregata, broj pokretanja i godišnja proizvodnja električne energije može se zaključiti da broj pokretanja agregata nije nužno jednak satima rada pojedinačnih agregata. Naime, agregat AG2 je pokrenut 245 puta, odnosno 37 puta manje od agregata AG1, ali je AG2 u radu proveo 604,61 h više i proizveo je 51.504,27 MWh više električne energije od agregata AG1.

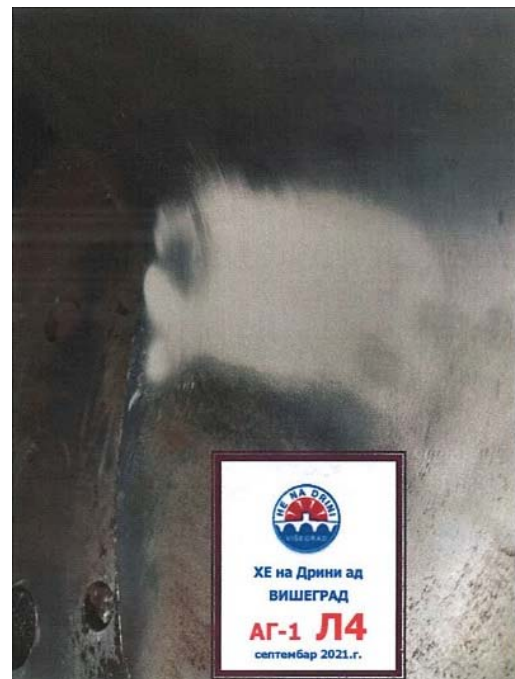
Ispitivanja Kaplan turbina na uticaj kavitacije u HE Višegrad su vršena u avgustu 2021. godine. Prilikom ispitivanja korišćene su sljedeće metode „NDT ispitivanja“ (non – destructive testing) [8]:

- vizuelno ispitivanje radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- ispitivanje metodom magnetnih čestica radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje, iz revizionog otvora, antikavitacione letve radnih kola turbine AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje obloge radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje lopatica usmjernog aparata agregata AG1, AG2 i AG3.

4 REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola prvog agregata (AG1) ustanovljena su oštećenja na leđnoj strani, na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatice u

vidu matiranih površina, zatim oštećenja na spoljašnjoj obodnoj ivici na antikavitacionoj letvi. Ustanovljena su mehanička oštećenja na grudnoj strani, na spoljašnjoj obodnoj ivici u obliku riseva. Ispitivanjem magnetnim česticama u zoni 300 mm od ivica lopatica i prelaznih radijusa tijela i rukavca lopatica nisu se pokazale indikacije tipa prslina. Na slici 1 prikazana su oštećenja na lopatici 4 (L4) i lopatici 2 (L2) radnog kola agregata AG1 (Slika 2).



Slika 1 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatice



Slika 2 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na spoljašnjoj obodnoj ivici na antikavitacionoj letvi



Slika 3 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola drugog agregata (AG2) ustanovljena su oštećenja na leđnoj strani i na izlaznim ivicama lopatica. Na šest lopatica su ustanovljena oštećenja na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatica. Takođe, na antikavitacionoj letvi su ustanovljena oštećenja na leđnoj strani i na spoljašnjoj obodnoj ivici. Ispitivanjem magnetnim česticama u zoni 300 mm od ivica lopatica i prelaznih radijusa tijela i rukavca lopatica nisu se pokazale indikacije tipa prslina. Na slici 3 prikazana su oštećenja na lopatici 2 (L2) i lopatici 4 (L4) radnog kola agregata AG2.

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola trećeg agregata (AG 3) ustanovljena su oštećenja izlaznih ivica lopatica, na dijelovima čeone površine izlazne ivice lopatice i leđne površine u zoni izlazne ivice. Oštećenja kavitacione letve su ustanovljena na pet lopatica u zoni ka izlaznoj ivici. Mehanička oštećenja su ustanovljena na skoro svim lopaticama u vidu zareza, ogrebotina, i udubljenja. Ispitivanjem magnetnim česticama uočeno je oštećenje na dijelu antikavitacione letve kod otvora za montažu i demontažu lopatice, oštećenje na središnjem dijelu lopatice i oštećenje na izlaznoj ivici u vidu matirane površine. Na slici 4 prikazana su oštećenja na lopatici 4 (L4) i lopatici 7 (L7) radnog kola agregata AG3 (Slika 5).



Slika 4 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice



Slika 5 - Kavitaciono oštećenje na dijelu antikavitacione letve kod otvora za montažu i demontažu lopatice

Rezultati ispitivanja oštećenja Kaplan turbina pokazuju da su iste izložene kavitacionom oštećenju.

Ispitivanja su pokazala da su u vidu matirane površine najčešće javljaju oštećenja na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice, na prelaznim radijusima tijela i rukavca lopatice. Dimenzije površina koje obuhvataju kavitaciona oštećenja su približno 800 mm², sa maksimalnom dubinom od 1 mm.

Oštećenja koja su ustanovljena u vidu zarez, riseva, ogrebotina i udubljenja na skoro svim lopaticama su mehanička oštećenja i naročito su izražena na ulaznim ivicama lopatica. Ova oštećenja najčešće su posljedica sedimenata, odnosno čvrstih čestica koji se nalaze u vodi. Oštećenja postaju izraženija sa povećanjem koncentracije pijeska i većim prečnicima čestica što prouzrokuje značajno smanjenje efikasnosti hidroenergetskog postrojenja.

Za ublažavanje i prevenciju habanja turbina kao posljedice kavitacione erozije u literaturi se mogu pronaći različiti pristupi. Svakako kao prva mjera prevencije dejstva sedimenata na hidrauličnu turbinu je sprečavanje ulaska sedimenata (pijeska, mulja) u dovodni vod turbine. Ako su uslovi za sprečavanje ulaska sedimenata otežani, kao mjera bi se mogla sprovesti površinska zaštita turbina od dejstva sedimenata u vodi. Površinska zaštita se odnosi na prevlake koje se mogu nanijeti na postojeće turbine i na taj način djelovati preventivno. Postoje razne vrste materijala koji se mogu koristiti kao prevencija u zaštiti i od kavitacije kao i od habanja turbina prouzrokovanim dejstvom sedimenata.

Pošto oštećenja od dejstva kavitacije i habanja materijala, odnosno razaranja materijala zavise od niza faktora, između ostalog vrste i starosti materijala, količine sedimenata veličine kavitacionog mjehura i frekvencije pojave kavitacije jedan od uslova povećanja kavitacije su i uslovi rada hidroagregata. Ukoliko se često mijenjaju režimi rada, odnosno ako dolazi do naglih promjena u sistemu rada, izraženija je i pojava kavitacije.

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja oštećenja Kaplan turbina može se zaključiti da su turbine u HE Višegrad u značajnoj mjeri izložene dejstvu kavitacije,

kao i oštećenjima usljed dejstva pijeska, odnosno sedimenata koji se nalaze u vodi. Tokom provedenih ispitivanja identifikovana su oštećenja turbina i ustanovljeno da je sinergijski efekat erozije pijeska i kavitacije izraženiji od njihovih pojedinačnih efekata. Dobijeni rezultati mogu biti veoma korisni u nastojanju da se smanji uticaj kavitacije, habanje lopatica turbina i oštećenje agregata uopšte.

Neophodno je naglasiti da je teško u potpunosti izbjeći kavitaciju u hidrauličnim turbinama, ali se definitivno može svesti na prihvatljiv nivo. Pored redovne i blagovremene sanacije oštećenja koja se pojavljuju na agregatima nužno je preuzeti i odgovarajuće preventivne mjere zaštite. Preventivnim dejstvom bi se ostvarilo poboljšanje efikasnosti ili iskoristivosti postrojenja, a uticalo bi se na nivo buke i vibracija koje bi se javljale u manjoj mjeri.

6 LITERATURA

- [1] Benišek, M. (1998) Hidraulične turbine, Mašinski fakultet, Beograd
- [2] HE Višegrad, <https://www.henadrini.com/>, pristupljeno: 25.11.2022. godine
- [3] Khurana S., Navtej, Singh H., Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.2, No.1, 2012.
- [4] Lian J., Gou W., Li H., Zhang H., Effect of sediment size on damage caused by cavitation erosion and abrasive wear in sediment-water mixture, Wear 398–399 (2018) 201–208, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.010>.
- [5] Luo X.W, Ji B., Tsujimoto Y., A Review of Cavitation in Hydraulic Machinery, Journal of Hydrodynamics, 2016,28(3):335-358, DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60638-8.
- [6] Singh R., S.K., Mishra S.K., Cavitation Erosion in Hydraulic Turbine Components and Mitigation by Coatings: Current Status and Future Needs, Journal of Materials Engineering and Performance (2012) 21:1539–1551, DOI: 10.1007/s11665-011-0051-9.
- [7] Singh V.K., Singal S.K., Operation of hydro power plants-a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69 (2017) 610–619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.169>
- [8] Šijaković S., (2022), Tehnički pokazatelj dejstva kavitacije na Kaplan turbinama u HE Višegrad, Master rad, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo.

- [9] Tianchen Y., A Review of the Research on the Influence of Cavitation and Abrasion on Hydroturbine Performance, E3S Web of Conferences 233, 03068 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123303068>
- [10] Wang Y., Wu J., Ma F., Cavitation–silt erosion in sand suspensions, Journal of Mechanical Science and Technology 32 (12) (2018) 5697~5702, DOI 10.1007/s12206-018-1116-6
- [11] Weili L., Jinling L., Xingqi L., Yuan L., Research on the cavitation characteristic of Kaplan turbine under sediment flow condition, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12 (2010) 012022, doi:10.1088/1755-1315/12/1/012022.