

DOLOČANJE VIŠINE VALOV ZARADI MANJŠIH PLOVIL IN VETRA TER MOŽNE EROZIJE BREGOV NA JEZERIH

DETERMINATION OF THE HEIGHT AND LENGTH OF WAVES CAUSED BY SMALLER BOATS AND WIND, AND POSSIBLE EROSION OF LAKE SHORES

doc. dr. Dušan Žagar, univ. dipl. inž. grad.,

dzagar@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Matjaž Četina, univ. dipl. inž. grad.,

mčetina@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Rudi Rajar, univ. dipl. inž. grad.,

rudi.rajar@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, Ljubljana

v. p. mag. Marko Perkovič, univ. dipl. inž. lad. stroj.,

marko.perkovic@fpp.uni-lj.si

v. p. mag. Franc Dimc, univ. dipl. inž. el.,

franc.dimc@fpp.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet

Pot pomorščakov 4, Portorož

Znanstveni članek

UDK 532.5:556.55

Povzetek | Na naravnih ali umetnih jezerih se vedno pogosteje uporabljajo rekreacijska in športna plovila. Ta povzročajo valovanje, ki lahko ogroža brežine z erozijo. Opisana je enostavna metodika, kako določiti višino in valovno dolžino takih valov ter primerjava z valovi zaradi vetra. Dodaten pojav, ki lahko povzroča erozijo brežin, je vodni curek, ki ga povzročajo motorji. V svetovni literaturi je veliko podatkov za določitev višine valov, ki jih povzročajo velike ladje, saj so taki valovi včasih zelo visoki in lahko celo ogrožajo prebivalce ali objekte ob bregu. Malo pa je literature, ki opisuje določanje višine valov, ki nastajajo zaradi manjših rekreacijskih plovil. Zato je skupina s Katedre za mehaniko tekočin FGG skupaj s člani Fakultete za pomorstvo in promet, ki je preskrbela za natančno mersko opremo (DGPS), izvedla nekaj takih meritev na morju. Rezultate meritev smo primerjali z izračuni po enačbah, ki jih podajata Riedner in Wu. Merjene višine valov se z izračunanimi razmeroma dobro ujemajo. Razlike so večje le pri zelo majhnih hitrostih plovil. Za to področje pa predlagamo popravke enačb. Na osnovi literature in meritev podajamo enačbe, ki so praktično uporabne za določanje višine valov, ki jih povzročajo takšne vrste plovil, ki se večinoma uporabljajo na naravnih ali umetnih jezerih, to so hitri motorni čolni (gliserji) dolžine ca. 7 m. Podane so tudi enačbe za določitev parametrov vetrnih valov. Končno so opisane tudi enačbe, s katerimi izračunamo strižno napetost kombiniranega delovanja valov in toka na brežine ali dna jezer, kar se uporablja za izračune možne erozije.

Summary | Small recreational boats are more and more often used on natural and artificial lakes. They cause waves that can damage the shores by erosion. A simple method is described for the determination of the height and length of such waves and

the comparison with wind waves is presented as well. The additional phenomenon that can sometimes increase erosion is the jet, caused by the engines. In literature, there are many references describing waves, caused by big ships, as these are often high and can present a threat to the shores and people in the vicinity. Not much literature can be found about waves due to small recreational boats. Therefore, a group of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering, together with members of the Faculty of Maritime Studies and Transport, University of Ljubljana, carried out some measurements on the sea at Portorož. The results of measurements are compared with the computational results according to the equations of Riedner and Wu. The agreement is relatively good. Greater differences are at very small boat velocities, so a correction of the equation is proposed for this region. On the basis of the mentioned reference and measurements, the equations determining the wave height for vessels, which are most commonly used on natural and artificial lakes, i.e. motor boats approximately 7 meters long are proposed. The basic equations for the determination of the height of wind waves are also presented. Further on, the equations for the calculation of the shear stress and erosion of combined effect of wind and waves caused by boats that might damage both the banks and the bottom of the lake are presented.

1 • UVOD

Z izboljševanjem življenjskega standarda se vsaj v razvitem svetu šport in rekreativna dejavnost povečujeta. Plovba z manjšimi plovili, bodisi motornimi čolni ali jadrnicami, je vse bolj priljubljena. Razen na morju se ta dejavnost vrši na naravnih jezerih, prav tako tudi na umetnih jezerih, ki jih gradijo na rekah pri gradnji hidroelektrarn ali pa kot zadrževalnike visokih voda.

Taka plovila pri plovmi povzročajo valove, ki lahko motijo ljudi ali živali na jezerih ali ob obali, večji problem pa je, da lahko povzročajo erozijo bregov in nestabilnost brežin. Naš prispevek je namenjen predvsem določanju višine valov in tudi določanju povzročenih strižnih napetosti, medtem ko se ne spušča v podrobno obravnavo varstva pred erozijo zaradi teh valov. Seveda je aktivnost plovil bistveno večja na morju, vendar so tam praviloma vetrni valovi bistveno pomembnejši kot valovi zaradi rekreacijskih plovil, medtem ko so na naravnih ali umetnih jezerih valovi zaradi plovil navadno enaki ali celo pomembnejši kot valovi zaradi vetra.

Treba je omeniti, da lahko erozijo brežin sicer povzroča več možnih dejavnikov:

1. Pri umetnih akumulacijskih jezerih na rekah je eden najpomembnejših vzrokov erozije tok vode skozi bazen, posebno ob visokih vodah. Problem hitrosti toka in ustreznega varstva brežin pred erozijo

mora biti obravnavan že pri projektu za gradnjo pregrade oziroma zadrževalnika.

2. Pri umetnih akumulacijah na rekah, kjer je na začetku ali/in koncu bazena hidroelektrarna, ta spreminja pretok glede na energijske potrebe in ekonomičnost proizvodnje. Zaradi sprememb pretoka nastajajo t.i. »obratovalni valovi«, hkrati pa tudi tok vode v gorvodni ali dolvodni smeri. Tudi ti valovi morajo biti obravnavani že pri projektu hidroelektrarn.
3. Valovi zaradi vetra lahko v določenih primerih nevarno erodirajo bregove. Ta problem je delno obravnavan v tem prispevku, predvsem z vidika primerjave teh valov z valovi zaradi plovil.
4. Manjša rekreacijska plovila, ki se uporabljajo na takih jezerih, lahko povzročajo valove, ki so navadno visoki od 10 do 30 cm, v ekstremnih primerih tudi preko 50 cm. Možne erozijske poškodbe brežin so razen od višine valov in njihove valovne dolžine odvisne tudi od frekvence uporabe plovil.
5. Dodaten pojav, ki lahko povzroča erozijo brežin, je curek, ki ga povzročajo pogonski motorji. Zaradi omejitev plovbe neposredno ob obali je navadno plovilo dovolj oddaljeno od bregov, da ta curek ni nevaren, lahko pa bi povzročal probleme v ožjem področju pristanišč. Zato podajamo tudi načrbe za izračun hitrosti v takih curkih.

Rekreacijska plovila na takih jezerih so v grobem treh vrst:

- a. Jadrnice, čeprav so večinoma tudi opremljene z motorji, ne povzročajo večjih valov. Navadno imajo namreč zelo dobro hidrodinamično obliko, njihovi motorji pa niso zelo močni, saj so namenjeni le za pomožni pogon ob brezvetrju ali za vplivitev v pristanišče.
- b. Veliki splavi, ki jih včasih uporabljajo na jezerih za rekreacijske namene, imajo sicer razmeroma močne motorje, vendar je njihov upor izredno velik (velik prečni podvodni presek in neugodna oblika), tako da so hitrosti majhne in valovi, ki jih povzročajo, so navadno manjši kot pri hitrih motornih čolnih.
- c. Praviloma največje valove na jezerih povzročajo hitri motorni čolni – gliserji. Taki čolni so večinoma dolžine med 4 in 10 metri, na naših jezerih so le izjemoma daljši. Motorji so večinoma nekje do moči 66 ali celo do 75 kW (85 do 100 KM). Ker povzročajo precejšen hrup in delno tudi onesnaževanje z ostanki goriva, so na mnogih naravnih in umetnih jezerih prepovedani, tako npr. na Blejskem in Bohinjskem jezeru. Naš prispevek je namenjen predvsem določanju valov zaradi takih plovil.

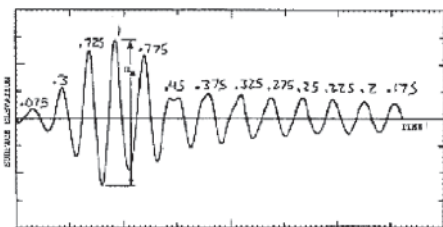
2 • MATEMATIČNO MODELIRANJE POJAVA

2.1 Pojav

Za drsne motorne čolne, gliserje, je po izkušnjah znano, da v glavnem s povečevanjem hitrosti plovila višina povzročeni valov pada. Vzrok je v tem, da čoln do neke mejne hitrosti pluje v t.im. izravnem (vzgonskem) režimu, nato pa zadrsi (»izglisira«) in pri tem izpodriva bistveno manj vode. Z meritvami smo ugotovili, da plovila povzročajo največje valove ravno na začetku drsenja, nato pa se s hitrostjo višina valov manjša.

V svetovni literaturi je možno najti veliko študij o valovih, ki jih povzročajo velike, predvsem tovorne, delno tudi potniške ladje. To je razumljivo, saj lahko take ladje povzročajo valove visoke do 3 metre, in ker so plovne poti včasih preko ozkih prelivov ali kanalov ali v bližini privezov za majhna plovila, so taki valovi lahko celo nevarni kopalcem ali manjšim plovilom. Malo pa je literature o valovih zaradi manjših rekreacijskih plovil.

Najtemeljitejšo obravnavo tega problema opisuje prispevek Bhowmika in soavtorjev (Bhowmik, 1991). Na zgornjem delu reke Missisipi in na reki Illinois v ZDA so opravili 246 meritev z 12 različnimi plovili, večinoma gliserji dolgi 3 do 15 metrov. Ugotovili so, da plovilo pri enem plovu povzroči od 4 do 40 valov, večinoma pa od 10 do 20 (slika 1). Od teh valov je eden največji. Ti valovi lahko trajajo od 6 do 40 sekund, včasih celo več. Povprečna višina teh valov je bila med 0,01 do 0,25 m, največji val pa je bil celo 0,60 m. Na višino valov vpliva tudi dolžina plovila in velikost ugreza. Znano je tudi, da se višina valov manjša z oddaljenostjo od plovila. Vpliv vseh parametrov na višino valov je podrobneje obravnavan v nadaljevanju. Avtorji so se ukvarjali tudi s pogostostjo (frekvenco) plovice, saj je erozija zelo odvisna tudi od trajanja delovanja valov na brežine.



Slika 1 • Relativne višine valov glede na največjo višino H_m (Riedner, 2002)

Iz vseh rezultatov meritev so z regresijsko analizo določili enačbo za višino valov v od-

visnosti od glavni vplivnih parametrov. Ta funkcijska odvisnost je obravnavana v nadaljevanju.

Riedner in Wu (Riedner, 2002) prav tako obravnavata določitev valov zaradi rekreacijskih plovil. Vendar pa uporabljata isto enačbo kot Bhowmik in sodelavci. Več pišeta o valovih zaradi vetra.

V našem prispevku smo izsledke in rezultate iz obeh prispevkov povezali z meritvami valov, ki smo jih opravili v Portorožu skupaj s člani Fakultete za pomorstvo in promet, z njihovim plovilom, gliserjem dolžine 7 m. Ujemanje meritev s podanimi enačbami Bhowmika in sodelavcev je razmeroma dobro, le za zelo majhne hitrosti plovil so razlike večje, kar obravnavamo v nadaljevanju.

2.2 Izračun višine in energije valov zaradi plovil

Bhowmik in sodelavci (Bhowmik, 1991) so iskali enačbe za določitev največje višine vala (in ne npr. značilne – signifikantne višine vala), ker je to najvažnejši parameter za določitev možne erozije, kot tudi morebitnega vpliva na ljudi ob jezeru ali ob bregovih. Iz meritev in izkušenj so ugotovili, da na največjo višino vala H_m vplivajo sledeči parametri:

- V – hitrost čolna (m/s)
- X – razdalja od čolna (m)
- L – dolžina čolna (m)
- W_0 – teža čolna (N)
- d – ugrez čolna (m)
- hp – moč motorja (Nm/s)
- D – globina vode (m)

Z dimenzijsko analizo so dalje dobili skupine vplivnih brezdimenzijskih parametrov. Dalje so na osnovi meritev analizirali velikost vpliva posameznih parametrov. Ker so skušali dobiti čim bolj praktično uporabno enačbo, so uvedli določene poenostavitve.

Točnejše funkcije bi dobili, če bi analizirali vsak tip čolnov posebej, v cilju poenostavitve pa so ugotovili, da obravnavanje vseh tipov skupaj točnosti ne zmanjša bistveno. Izločili so tudi parameter hp (moč motorja), ker je vsaj do sprejemljive natančnosti že zajet v skupini treh parametrov: teža čolna, ugrez in hitrost. Ugrez čolna se spreminja s hitrostjo, vendar je ta odvisnost komplicirana in seveda odvisna od vrste čolna, zato so v enačbah upoštevali le začetni ugrez ob mirovanju plo-

vila. Globina vode sicer do neke mere vpliva na višino valov, vendar je znano, da je opažen vpliv globine lahko le v področju, kjer je razmerje globine in valovne dolžine manjše od približno 1 : 1 (Rajar, 1984). Ker so vpliv globine v enačbah izpustili, moramo privzeti, da je enačba veljavna v področju, ko je globina najmanj enaka ali večja od valovne dolžine. To pa je v večini praktičnih primerov izpolnjeno.

Predlagana enačba za izračun največje višine vala H_m je sledeča (pomen posameznih parametrov v enačbi je podan na začetku razdelka):

$$H_m = 0,537 V^{-0,346} X^{-0,345} L^{0,56} d^{0,355} \quad (1)$$

Analiza veljavnosti te enačbe je obravnavana v poglavju 3.

Energijo vsakega vala valovnega niza (kg/s²), ki doseže obalo, izračunamo po enačbi:

$$E_m = \rho g (H_m/2)^2/2 \quad (2)$$

Izraz po (2) pomeni energijo valov zaradi plovil na enoto površine, tako da je direktno primerljiva z energijo vetra po en. (7). Energijo posameznih valov valovnega niza lahko seštejemo in rezultat pomnožimo s številom plovil, ki vsak dan povzročajo valove. Tako dobimo skupno energijo valov zaradi plovice na obravnavanem področju. Tako lahko ocenimo velikost vpliva valov zaradi plovil v primerjavi z vetrnimi valovi.

2.3 Določitev periode valov zaradi plovil

Valovi na vodni površini so lahko strmi in kratki ali pa položni in dolgi, kar je odvisno od vzroka in načina nastanka vala. Karakteristike vala so definirane z dvema parametroma: H_m – višina vala (pri valovih na morju ali jezerih je to višina, merjena med vrhom in dolom vala), drugi parameter pa je bodisi perioda vala T_w (čas, v katerem val preide razdaljo ene valovne dolžine) ali pa valovna dolžina L_w . Vpliv parametra T_w (perioda vala) na pojav erozije je bistven, zato ga je treba poznati. Pri valovih v globoki vodi, ki jih tukaj večinoma obravnavamo, kjer je h (globina vode) večja od $L_w/2$, je zveza med T_w in L_w določena po enačbi (Rajar, 1984):

$$L_w = g (T_w)^2 / 2\pi \quad (3)$$

Za valove zaradi vetra je periodo vala možno izračunati po empiričnih enačbah (enačba 6), kjer je T_w odvisen od hitrosti vetra in

dolžine privetrišča. Za valove zaradi plovil so le zelo redke informacije o izračunu periode. Tako Sorensen (Sorensen, 1997) podaja enačbo, po kateri je perioda vala direktno odvisna od hitrosti plovila. Vendar obravnava samo velike ladje in samo v območju izrivne plojbe, kjer torej ni nikakršnega drsenja.

Zato smo izvednotili merjene periode valov pri izvedenih meritvah. Pokazalo se je, da perioda vala ne pokaže nobene značilne odvisnosti niti od hitrosti plovila niti od razdalje od plovila. Višina vala se z oddaljenostjo od plovila sicer manjša, perioda pa se le zelo malo spreminja.

Za vsako hitrost plovila, ki smo jo izvedli pri meritvah, smo ugotovili povprečno vrednost periode za vse meritve, te pa smo kot funkcijo hitrosti plovila prikazali na sliki 3. Ker je bilo vseh meritev samo 28, ti rezultati sicer ne morejo biti popolnoma splošno veljavni, vendar krivulja na sliki 3 kaže, da se perioda ne spreminja bistveno s hitrostjo plovila.

Za vseh 28 meritev vrednosti periode ležijo med 1,0 in 1,9 sekunde, 86 % vseh vrednosti leži med 1,3 in 1,8 sekunde. Povprečna vrednost vseh meritev je $T_{w, \text{povpr.}} = 1,5$ s.

Za obravnavane vrste plovil na naših naravnih ali umetnih jezerih zato predlagamo, da se pri izračunih erozije na dnu in bregovih (poglavje 4) upošteva povprečna vrednost trajanja periode valov zaradi plovil $T_w = 1,5$ sekunde.

2.4 Teoretične osnove računa hitrosti curka zaradi pogonskih agregatov

Vijak (propeler) pogonskega agregata – pri vodnih skuterjih pa že sam način pogona – povzroča vodni curek, ki po zakonu akcije in reakcije poganja plovilo. Hitrosti curka se zmanjšujejo tako s horizontalno razdaljo od vijaka kot tudi z vertikalno razdaljo od osi curka. Ker lahko tak curek pri velikih ladjah doseže velike hitrosti, s tem povzroča probleme pri re-suspenziji sedimentov in eroziji dna ali brežin. Zato je v literaturi ta problem dokaj dobro obdelan. Osnovno enačbo za hitrosti curka povzemamo po literaturi (Moffati&Nichol, 2005).

$$U_0 = 1,15 [P / (\rho D_0^2)]^{0,333}, \quad (4a)$$

kjer pomeni:

U_0 ... hitrost curka tik za propelerjem (m/s)

P ... moč motorja (W)

ρ ... gostota vode (kg/m³)

D_0 ... premer propelerja (m)

V osi curka se hitrost spreminja z razdaljo X po enačbi:

$$U(X) = U_0 D_0 / (2 X C_1), \quad (4b)$$

kjer je C_1 empirična konstanta z vrednostjo 0,18.

S prečno razdaljo od osi curka se hitrosti še manjšajo, vendar je za erozijo brežin

pomembna največja hitrost v osi curka, podana v enačbi 4b, kajti upoštevati moramo najneugodnejši primer, da je os motorja obrnjena pravokotno na brežino.

2.5 Enačbe za izračun višine in energije valov zaradi vetra

Parametre valov zaradi vetra lahko izračunamo po naslednjih empiričnih enačbah (Eagleson, 1966):

$$H_w = 0,555 \sqrt{u_w^2 F_e} \quad (5)$$

$$T_w = 0,5 \sqrt[4]{u_w^2 F_e} \quad (6)$$

Pri tem pomeni F_e privetrišče (v navtičnih miljah, 1 N. M. = 1852 m), u_w hitrost vetra v vozlih (1 vozle = 1 N. M./h), H_w značilno (signifikantno) višino vala v čevljih in T_w periodo vala v sekundah (»značilna višina vala« pomeni povprečno višino tretjine najvišjih valov).

Energijo vetrnega vala lahko izračunamo po enačbi (Riedner, 2002), pri tem so vse količine podane v SI-enotah:

$$E_w = 1/16 \rho g H_w^2 \quad (7)$$

Če energijo vala delimo s periodo T_w (s) in pomnožimo s 86.400 s, dobimo energijo, ki jo veter sprosti na enoto površine na dan, ta energija pa je neposredno primerljiva z energijo, ki jo obala prejme zaradi plovil.

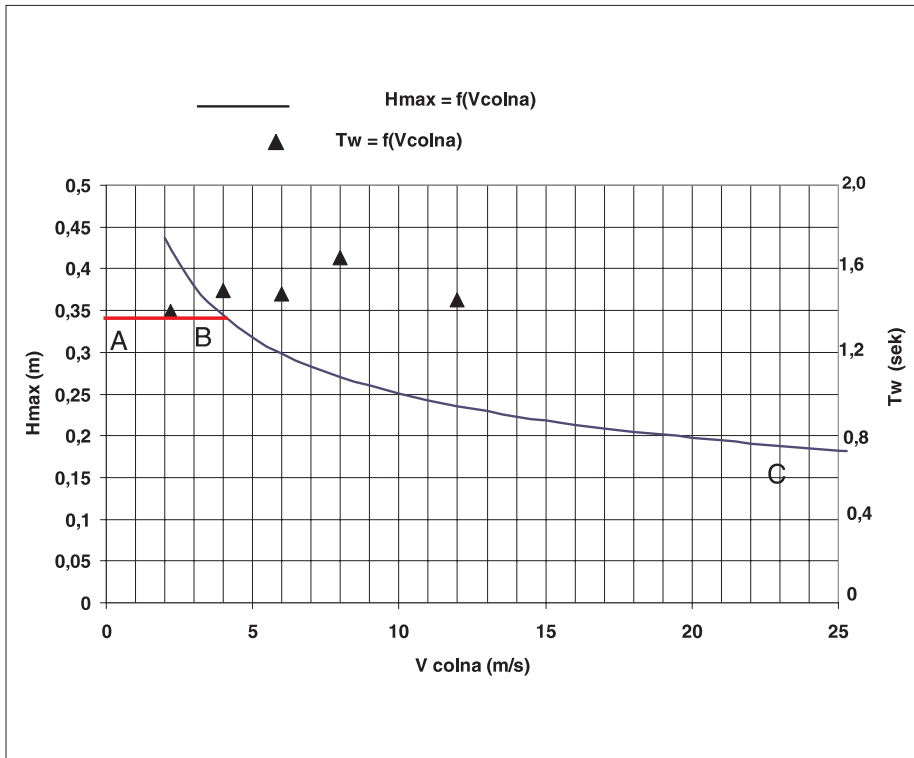
3 • MERITVE IN PRIMERJAVA Z ENAČBAMI

Zaradi majhnega števila študij, ki obravnavajo vpliv valov zaradi t.i. rekreativne plovbe na brežine umetnih ali naravnih jezer, smo izvedli dodatne meritve s pomočjo Fakultete za pomorstvo in promet v Portorožu, kjer so nam omogočili meritve s precizno mersko opremo (DGPS) in plovilom, s katerim smo povzročali valove. Meritve so potekale na popolnoma mirnem morju, in sicer 26. in 28. januarja 2008.

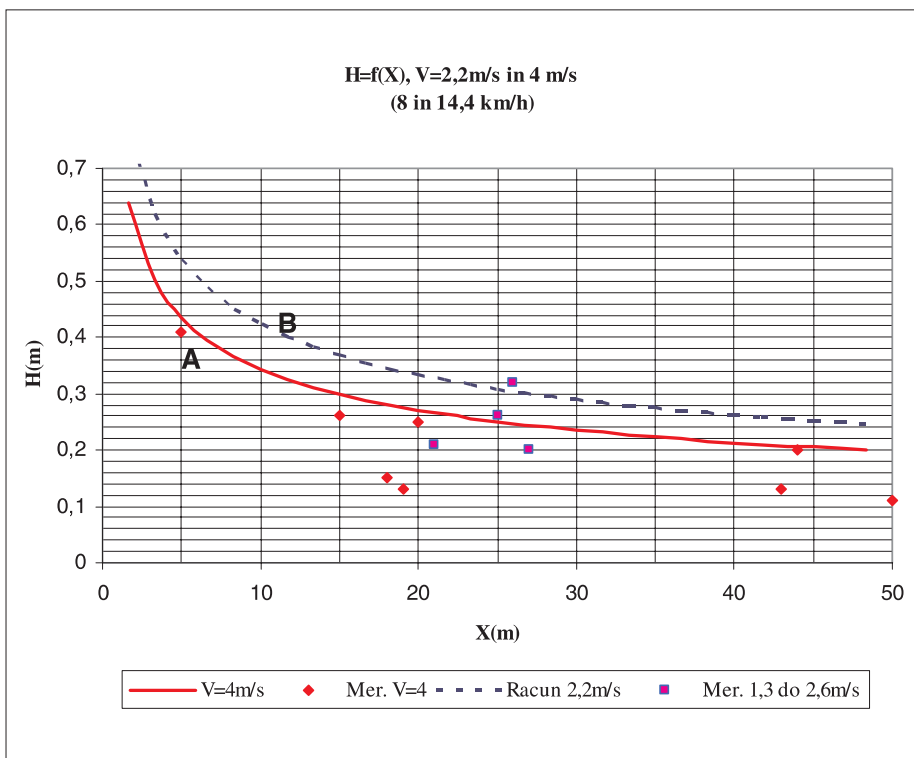
Valove je generiral čoln dolžine 7 m, z maso ca. 1500 kg in motorjem moči 175 KM oz. 130 kW (slika 2), ki je plul z različnimi hitrostmi in na različnih oddaljenostih od merilne naprave. Merilno mesto smo spreminjali in izmerili višino valov na globini ca. 8 m in ob obali (globina 2 m). Za grobo kontrolo smo na pomolu ročno merili višino valov. Vertikalno gibanje z opremo GPS je bilo merjeno s stacionarne točke na pomolu.



Slika 2 • Povzročanje valov z motornim čolnom in merjenje višine valov



Slika 3 • Največja višina vala v odvisnosti od hitrosti (Riedner, 2002). Rdeča črta A-B je predlagani popravi funkcije. Trikotne točke so povprečne merjene vrednosti period pri pripadajoči hitrosti čolna



Slika 4 • Največje višine vala v odvisnosti od razdalje X za hitrosti čolna 2,2 m/s in 4 m/s. Krivulja B bi veljala za $V = 2,2$ m/s po originalni enačbi Riednerja in Wuja, z upoštevanjem predlaganega popravka enačbe pa krivulja A velja za obe hitrosti

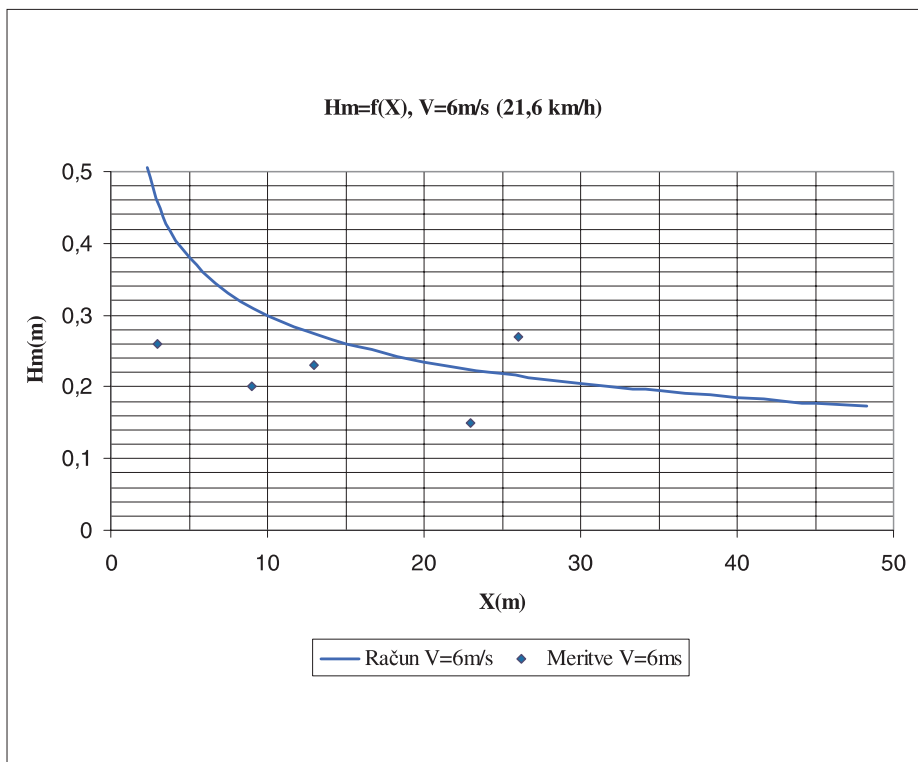
Izvedba meritev je bila sledeča. Na stiroporni plovec smo togo pritrdili v skupno ohišje vstavljene enofrekvenčni sprejemnik GPS (FlexPak, NovaTel) ter dva miniaturna pospeškometra (ADIS 16201), katerih rezultati so se po radijski zvezi ob hitrosti prenosa 38.400 bit/s stekali v prenosni računalnik, s katerim smo rezultate zgolj beležili. Čas vzorčenja vseh podatkov je znašal 0,2 s. Od izmerjenih vrednosti položaja avtonomnega sprejemnika GPS smo v prvem približku upoštevali zgolj odčitek višine.

Na odčitek višine zelo vpliva medsebojna razporejenost satelitov glede na uporabniški sprejemnik (VDOP), zahajanje satelitov in motnje v ionosferi. Dodatno je odčitek moten zaradi guganja ob valovih in ob nagibu antene prisotnih odbojih od morske površine, zato smo poleg polinomske regresije za odpravljanje trendov za ocenitev dinamike uporabili še rezultate pospeškometrov. Z nadaljnjo obdelavo rezultatov smo pridobili čase trajanja posameznih valov, upoštevaje časovni premik smo primerjali podatke, ki jih je beležil samodejni sistem na čolnu AIS (Automatic Identification System). Hitrost širjenja posameznih valov je zaradi neskladnosti nekaterih časov in položajev AIS in sprejemnika GPS na plovcu zgolj iz dobljenih rezultatov manj zanesljiva.

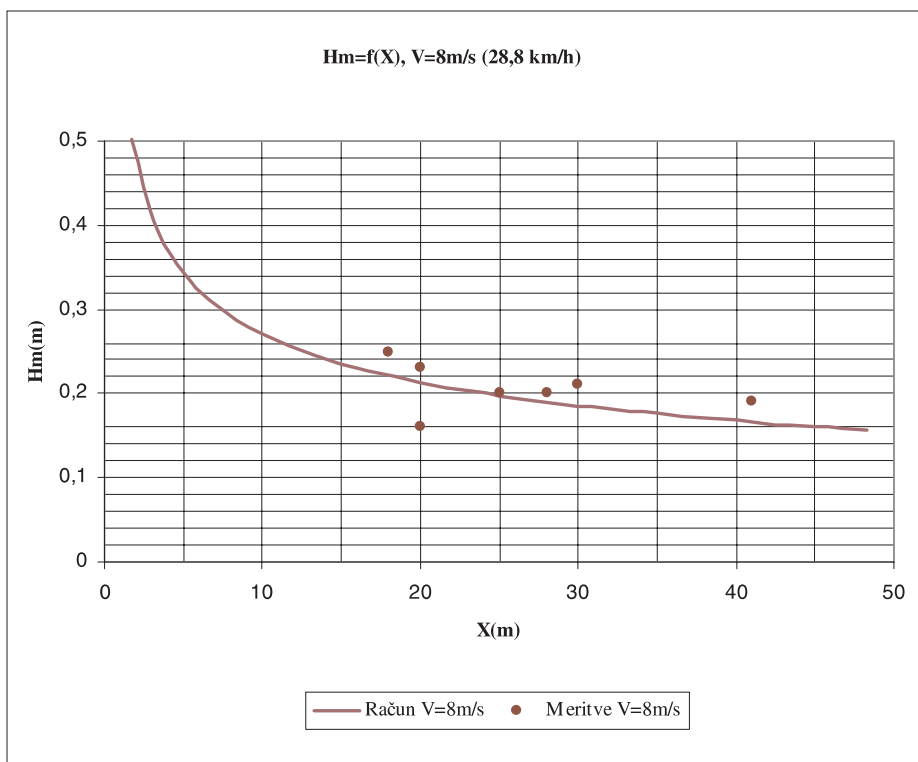
Kvalitativno je opazovanje potrdilo teorijo, da se najvišji val pojavi ob začetku drsenja. Ko čoln začne drseti, pa se višina valov s povečevanjem hitrosti manjša. Hitrost na začetku drsenja je odvisna od oblike in mase čolna in jo je treba določiti za vsak primer posebej. Vsekakor pa težji čoln z večjim ugrezom povzročijo večje valove, saj je količina izpodrinjene vode, ki povzroči prvi val ob začetku drsenja, večja.

Rezultati meritev višine vala v odvisnosti od oddaljenosti plovila (pri konstantni hitrosti plovbe) se večinoma razmeroma dobro ujemajo s teoretičnimi rešitvami Riednerja in Wuja, kar za različne hitrosti plovbe kažejo slike 4 do 7. Ujemanje je bilo nekoliko slabše pri hitrosti 12 m/s oziroma 43,2 km/h (slika 7), vendar tako velike hitrosti na jezerih navadno niso dovoljene in zato meritev pri takšnih hitrostih nismo ponavljali ali poskušali napako upravičiti ali razložiti. Na območju hitrosti med 8 km/h in 30 km/h je ujemanje meritev in enačb razmeroma dobro.

Opazili pa smo odstopanje meritev navzdol pri nižjih hitrostih (slika 4). Na podlagi meritev in opazovanj smo ugotavljali, da enačba Riednerja in Wuja (funkcija na sliki 3) za hitrosti pod ca. 4 m/s ni pravilno formulirana, saj je popolnoma nelogično, da bi se



Slika 5 • Največja višina vala v odvisnosti od oddaljenosti X pri hitrosti 21,6 km/h (6 m/s)



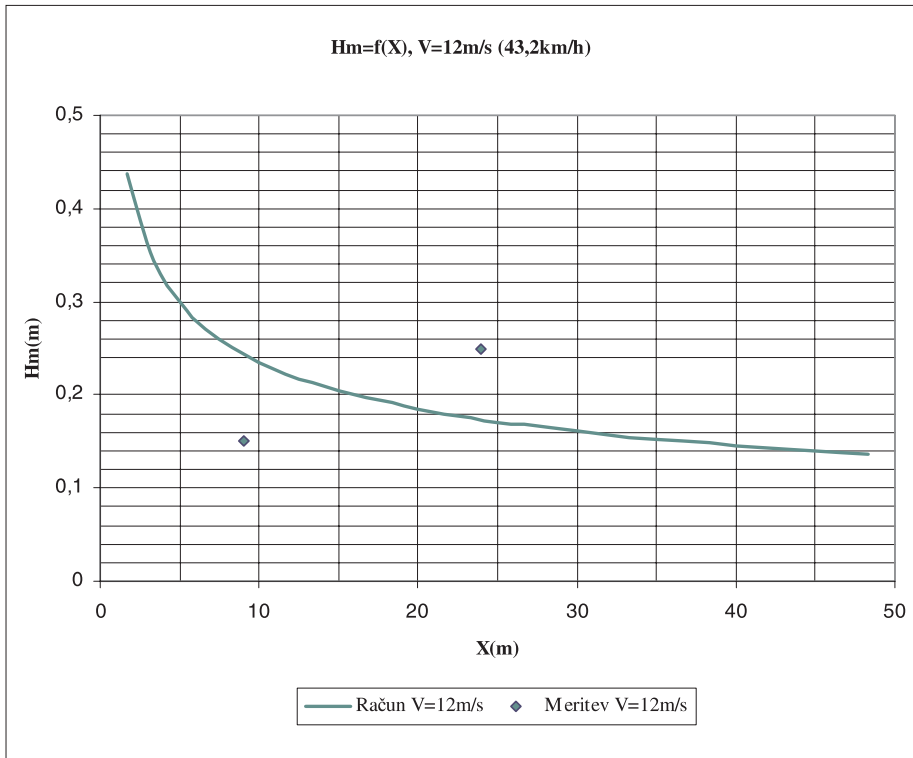
Slika 6 • Največja višina vala v odvisnosti od oddaljenosti X pri hitrosti 28,8 km/h (8 m/s)

pri majhnih hitrostih (še popolnoma v fazi izrivne plovbe, torej precej pod mejo drsenja) z zmanjševanjem hitrosti plovbe višina vala večala.

Riedner in Wu se z veljavnostjo funkcije pri majhnih hitrostih ne ukvarjata, ker očitno smatrata, da tako majhne hitrosti čolna za povzročanje valov niso pomembne. Vendar pa lahko enačba (1) v določenih primerih pripelje do napačnih rezultatov. Kot je omenjeno, meritve in opazovanja kažejo, da največje višine valov nastanejo ob začetku drsenja. Pri manjših hitrostih, torej pri izravnem načinu plovbe, pa se višina valov z manjšanjem hitrosti nekoliko manjša, vendar ne bistveno. Hitrost, pri kateri plovilo začne drseti, je odvisna od več parametrov, med drugim od moči motorja ter teže in oblike plovila, zato je treba to mejno hitrost ugotoviti pri vsakem plovilu posebej. Za prvi približek pa predlagamo, da se upošteva mejno hitrost 4 m/s. Pod to hitrostjo ostane višina vala konstantna ne glede na hitrost. Ta popravek je prikazan na sliki 3.

Slike 4 do 7 kažejo, da so izračunane višine valov primerljive z merjenimi, vsaj pri izvedenih meritvah. Merjene višine so večinoma pod izračunanimi, kar pomeni, da smo z izračunanimi na varni strani.

Ujemanje naših meritev z enačbami Riednerja in Wuja pa ni povsod dobro, večje razlike so n.pr. pri hitrosti 6 m/s (slika 5). Razlog za to je gotovo v dejstvu, da so pozamezni čolni, ki so bili uporabljeni pri naših meritvah in pri meritvah Riednerja in Wuja vsaj nekoliko različni v dveh parametrih enačbe (1): globini ugreza (d) in tudi dolžini čolna (L). Ker so bile meritve Riednerja in Wuja mnogo bolj številne, razen za zelo majhne hitrosti čolna nismo predlagali sprememb enačbe 1. Naše meritve so služile bolj za grobo testiranje pravilnosti enačbe (1).



Slika 7 • Največja višina vala v odvisnosti od oddaljenosti X pri hitrosti 43,2 km/h (12 m/s)

4 • IZRAČUN STRIŽNIH NAPETOSTI NA PODLAGO ZARADI KOMBINIRANEGA DELOVANJA VALOV IN TOKA

Pri znani višini in periodi valovanja ter poznani hitrosti toka lahko strižne napetosti ob dnu zaradi valovanja in toka izračunamo po enačbah, ki jih povzemamo po literaturi (Van Rijn, 1993). Valovno dolžino izračunamo po enačbi

$$\left[\frac{L'}{T_w} - \bar{u} \cdot \cos \Phi \right]^2 = \frac{g \cdot L'}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L'} \quad (8)$$

kjer pomeni h globino vode (m), L' je valovna dolžina (m), Φ kot med smerjo valov in toka (stopinje), \bar{u} pa po globini povprečna hitrost v izbrani točki (m/s).

Sledi račun reducirane periode vala T_r :

$$T_r = \frac{T_w}{1 - \frac{\bar{u} \cdot T_w \cdot \cos \Phi}{L'}} \quad (\text{sek}) \quad (9)$$

in račun vršne hitrosti vala $U_{d,p}$ in vršne amplitude vala $A_{d,p}$

$$U_{d,p} = \frac{\pi \cdot H_w}{T_r \cdot \sinh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L'} \right)} \quad (\text{m/s}) \quad (10a)$$

$$A_{d,p} = \frac{U_{d,p} \cdot T_w}{2 \cdot \pi} \quad (\text{m}) \quad (10b)$$

Nato izračunamo še koeficient trenja f_w ki je odvisen od režima toka, in znaša

$$f_w = 2 \cdot \left(\frac{U_{d,p} \cdot A_{d,p}}{\nu} \right)^{-0.5} \quad \dots \text{laminarni tok} \quad (11a)$$

$$f_w = 0.09 \cdot \left(\frac{U_{d,p} \cdot A_{d,p}}{\nu} \right)^{-0.2} \quad \dots \text{hidravl. gladki turbulentni tok} \quad (11b)$$

$$f_w = \exp \left[-6 + 5.2 \cdot \left(\frac{A_{d,p}}{3 \cdot D_{90}} \right)^{-0.19} \right] \quad \dots \text{hidravl. hrapavi turbulentni tok} \quad (11c)$$

Strižne napetosti zaradi valov $\tau_{b,w}$ izračunamo po enačbi

$$\tau_{b,w} = 0.25 \cdot \rho \cdot (U_{d,p})^2 \cdot f_w \quad (\text{N/m}^2) \quad (12)$$

Strižno hitrost zaradi toka določimo po enačbah

$$u'_* = \left| \frac{\sqrt{g}}{C'} \cdot \bar{u} \right|, \quad (13)$$

pri čemer velja, da je koeficient

$$C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_b}{3 \cdot D_{90}} \right) \quad (14)$$

V gornjih enačbah pomeni R_b hidravlični radij po Vanoni-Brooksu, D_{90} pa premer 90 % zrna na presejni krivulji materiala dna. Pri tem velja naslednja relacija med strižnimi hitrostmi in strižnimi napetostmi ob dnu:

$$u'_* = \sqrt{\frac{\tau_{b,c}}{\rho}} \quad (15)$$

Pri tem je treba upoštevati, da toka in valovanje le redko delujeta v isti smeri in je zato potrebno obe dobljeni strižni napetosti – $\tau_{b,w}$ zaradi valovanja in $\tau_{b,c}$ zaradi toka – vektorsko sešteti. Iz zgornjih enačb je tako možno izračunati tudi strižno napetost kombiniranega delovanja valov in curka motorja na dno ali brežine jezer.

5 • PRIPOROČILA IN SKLEPI

Za praktično uporabo, kadar hočemo oceniti višino valov zaradi možnega povzročanja erozije na bregovih, priporočamo uporabo enačbe (1), v kateri je upoštevana tako hitrost plovila kot razdalja plovila od obravnavane točke. Za hitrosti plovila pod 4 m/s (14,4 km/h) pa priporočamo, da se upošteva nespremenjena višina valov, enaka, kot je dobljena ob hitrosti 4 m/s. Popravljen funkcija je prikazana na sliki 3. Vsa našeta priporočila pa veljajo za hitre motorne čolne, ki na gladini drsijo (»glisirajo«).

Hitrost 4 m/s smo v našem primeru ocenili kot hitrost, pri kateri plovilo zadrši. Bolje je še, če poznamo, ali izmerimo hitrost pri začetku drsenja, za obravnavano plovilo, izračunamo višino vala po enačbi 1 za to hitrost, za vse manjše hitrosti pa potem upoštevamo enako, tj. konstantno višino vala.

Če nadalje ocenimo, da bo plovilo z normalnim (nezmanjšanim) delovanjem motorja plulo nevarno blizu obale, po enačbi 4a izračunamo hitrost toka v curku tik za vijakom in nato po enačbi 4b hitrost curka na

razdalji X , kar je predvidena razdalja motorja od obale, v smeri osi curka.

Dalje na osnovi teorije o eroziji (poglavje 4) izračunamo kombiniran vpliv valov in curka na možno erozijo brežin. Tu lahko upoštevamo valove zaradi plovil ali/in valove zaradi vetra. Kot dodatno literaturo o teoriji erozije priporočamo knjigo van Rijna, o učinkih valov direktno na erozijo brežin pa članek (Pilarczyk, K. W., 2001).

6 • LITERATURA

- Bhowmik, N. G., Soong, T. W., Reichelt, W. F., Seddik, N. M. L., Waves generated by recreational traffic on the upper Missisipi river system, Research Report 117, Illinois state WATER SURVEY, Dept. of energy and natural resources, 68, 1991.
- Eagleson, R. G., Dean, C. L., Bretschneider, F., Raichlen, D. R. F., Harleman, J. W., Johnson, A. T., Ippen, G. H., Keulegan, H. B., Simmons in A. T., Ippen, editor, Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill Book Company Inc, 1966.
- Moffatt&Nichol, Propeller wash study, Sept. 6, Kitimat LNG import terminal (7–19), 2005.
- Pilarczyk, K. W., Design of revetments, Dutch Public Works Department (RWS), Hydraulic Engineering Division, Delft. P. O. Box 5044, 2600 GA Delft, The Netherlands, k.w.pilarczyk@dww.rws.minvenw.nl, 2001.
- Rajar, R., Hidravlika nestalnega toka, Učbenik, FAGG, Ljubljana, 279, 1984.
- Riedner, E., Wu, C., Effects of Wind Waves and Boat Generated Waves on the Shoreline of Crystal Lake, Crystal Lake, Sheboygan County, www.lake-link.com, 4, 2002.
- Sorensen, R. M., Prediction of Vessel-Generated Waves with Reference to Vessels Common to the Upper Mississippi River System, Upper Mississippi – Illinois Waterway System Navigation Study, ENV Report 4, 43, 1997.
- Van Rijn, L. C., Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua publications, Amsterdam, 417, 1993.