

Primljen / Received: 13.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 2.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 16.3.2018.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

Analiza izmjene vode kroz cijevne propuste u marini Opatija

Autori:



¹**Damjan Bujak**, mag. ing. aedif.
dbujak@grad.hr



¹Doc.dr.sc. **Dalibor Carević**, dipl.ing. građ.
car@grad.hr



¹**Ratko Ramušćak**, mag. ing. aedif.
ratko.ramuscak@student.grad.hr



¹**Tin Kulić**, mag. ing. aedif.
tin.kulic@student.grad.hr



²**Ivana Bartolić**, mag. ing. aedif.
ibartolic@tvz.hr

¹Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

²Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel

Stručni rad

Damjan Bujak, Dalibor Carević, Ratko Ramušćak, Tin Kulić, Ivana Bartolić

Analiza izmjene vode kroz cijevne propuste u marini Opatija

U područjima s malim oscilacijama plime i oseke (npr. Sredozemno more), izmjena vode u lučicama može se poboljšati pomoću cijevnih propusta ugrađenih u lukobranima. Utjecaj prirodnih čimbenika na izmjenu vode ispituje se pomoću terenskih mjerenja provedenih u marini Opatija. Ustanovljeno je kako protok u djelomično potopljenom cijevnom propustu raste dvostruko više u odnosu na protok u potpuno potopljenom cijevnom propustu. U razdoblju bez vjetera i valova, približno 3 % ukupnog volumena cirkulira kroz cijevni propust tijekom jedne plimne oscilacije.

Ključne riječi:

izmjena vode, cijevni propusti, vjetar, lukobran, valovi generirani vjetrom

Professional paper

Damjan Bujak, Dalibor Carević, Ratko Ramušćak, Tin Kulić, Ivana Bartolić

Analysis of water exchange via pipe culverts in Opatija marina

In areas with small tidal oscillations (such as the Mediterranean Sea), the exchange of water in harbours can be improved by pipe culverts incorporated in breakwaters. The effect of natural factors on water exchange was tested via in-situ measurements conducted in Opatija marina. It was established that the flow in partly submerged pipe culverts exceeds by two times the flow in a fully submerged pipe culvert. In the period without wind and waves, almost three percent of the total volume circulates through a pipe culvert during a single tidal oscillation.

Key words:

water exchange, pipe culverts, wind, breakwater, wind-generated waves

Fachbericht

Damjan Bujak, Dalibor Carević, Ratko Ramušćak, Tin Kulić, Ivana Bartolić

Analyse des Wasseraustauschs durch die Rohrdurchlässe in der Marina Opatija

In den Gebieten mit geringen Flut- und Ebbschwankungen (z. B. Mittelmeer) kann der Wasseraustausch in den Häfen durch Rohrdurchlässe, die in den Hafendamm eingebaut sind, verbessert werden. Der Einfluss natürlicher Faktoren auf den Wasseraustausch wird mithilfe von Feldmessungen, die in der Marina Opatija durchgeführt wurden, untersucht. Festgestellt wurde, dass der Durchfluss in den teilweise versenkten Rohrdurchlässen im Vergleich zum Durchfluss in vollständig versenkten Rohrdurchlässen doppelt so stark ansteigt. Im Zeitraum ohne Wind und Wellen fließen etwa 3% des Gesamtvolumens durch die Rohrdurchlässe während einer Flutschwankung.

Schlüsselwörter:

Wasseraustausch, Rohrdurchlass, Hafendamm, durch Wind generierte Wellen

1. Uvod

Kakvoća vode u akvatorijima može degradirati zbog rastućih ljudskih aktivnosti koje se odvijaju u njima.

Marine i luke, u blizini gradskih područja duž obale, pod visokim su antropogenim utjecajem, čime se utječe na kakvoću vode u njima [1]. Visok antropogeni utjecaj u blizini gradskih područja kroz ekonomske i komercijalne aktivnosti rezultira zagađenjem okoliša. Kontaminacija mijenja kakvoću morske vode i njenih prirodnih svojstava, stoga se koncentracije onečišćenja trebaju pratiti i ukloniti. Narušena kakvoća mora može dovesti do smanjene količine otopljenog kisika, što pogoduje razvoju algi te posljedično može ugroziti ekosustav [2, 3]. Smanjena kakvoća vode u lučicama uvjetovana je posljedica međudjelovanja nekoliko vrsta lučkih aktivnosti. Aktivnosti poput prometa plovila, promet kontejnerskog tereta, silosi goriva i druge aktivnosti određuju potencijalno narušavanje kakvoće mora.

Štetni učinci na kakvoću vode unutar luke mogu se izbjeći održavanjem optimalne izmjene vode ili smanjenjem potencijalnih izvora onečišćujućih tvari [4]. Izmjena vode u marinama pokazala se kao ključni čimbenik koji kontrolira ponašanje kemijskih i bioloških varijabli ekosustava [5, 6]. Izmjena vode zatvorenih domena kontrolirana je odgovarajućim prirodnim utjecajima (morske mijene, trenje vjetra o površinu mora, valovi, vanjske struje, slatkovodne vrulje itd.). Razumijevanje cirkulacije vode omogućuje istraživanje efikasnosti hidrodinamičkih djelovanja u svrhu uklanjanja bilo koje supstancije unutar vodnog tijela [7].

Znanstvena literatura nudi različita rješenja i empirijske metode za izračunavanje sposobnosti izmjene vode, zasnovana na hidrodinamičkim ili morfološkim karakteristikama. Većina metoda za predviđanje izmjene vode temelji se na plimnim oscilacijama kao dominantom generatoru izmjene vode [8-10], što omogućuje diferencijaciju marina i luka smještenih na različitim geografskim širinama. Na brzinu izmjene vode utječu i strukturni čimbenici kao geometrijski oblik luke i dimenzije ulaza, dubina vode, nagib dna itd., što je do sada dobro istraženo [11-13]. U područjima kao što su Sredozemno i Jadransko more, oscilacije plime i oseke su znatno manje, pa je stoga i izmjena vode smanjena. U tim područjima je uobičajeno koristiti propuste za izmjenu vode (cijevne ili pravokutne otvore u tijelu lukobrana promjera/dimenzija $D-1$ m) [14, 15] kako bi se poboljšala izmjena vode. Vjerojatno naj snažniji mehanizam izmjene morske vode u lučicama s niskim plimnim oscilacijama omogućava vjetar. Ispitivanja u numeričkim modelima otkrivaju da se povoljan utjecaj na izmjenu vode (u dva ulazna akvatorija) može pojaviti s vjetrom koji uzrokuje nagib razine mora unutar akvatorija [16]. Na primjer, u Veneciji, vjetar koji puše sa sjeveroistoka stvara nagib površine od sjevernog područja prema južnom. Kada je nagib prisutan, stvara se stabilna cirkulacija u kojoj voda ulazi u sjeverni ulaz i napušta južni, poboljšavajući izmjenu vode [17]. Također je zaključeno da vjetar ne utječe značajno na izmjenu vode u zatvorenim akvatorijima s jednim ulazom gdje će vjetar isključivo uzrokovati miješanje zaštićenog mora, za razliku od

studija provedenih u Venecijanskoj laguni gdje postoji više ulaza [16, 18]. Učinkovitost miješanja je funkcija morfologije bazena, utjecaja vjetra i stratifikacije mora. Eksperimentalno istraživanje provedeno je u valnom kanalu kako bi se istražio prijenos energije valova kroz cijevne propuste, jer valovi također mogu imati značajnu ulogu u obnavljanju vode kroz cijevne propuste [14]. Česta je pretpostavka da transmisiju valne energije prati protok vode kroz propust, no neke studije prikazuju kako možda i ne postoji međusobna korelacija [19]. Nije iznenađenje da je većina istraživanja u hidromehanici propusta provedena na području Sredozemnog mora, jer su niske plimne oscilacije čest problem. Svrha propusta je omogućiti izmjenu otvorene morske vode i morske vode koja se nalazi u zaštićenoj pomorskoj zoni. Propusti su najučinkovitija metoda poboljšanja izmjene vode u lučicama koja se primjenjuje u pomorskom inženjerstvu.

Postoje opsežne studije o projektiranju i primjeni cijevnih propusta kao dijela riječne hidraulike glede koeficijenata gubitka na ulazu i izlazu i njihove osjetljivosti na oštećenje propusta i promjene razine vode ispred propusta [20-23]. Nitko nije potvrdio njihovu primjenjivost u morskim uvjetima.

U ovom se radu istražuje utjecaj raznih prirodnih generatora na vrijeme izmjene pomoću mjerenja provedenih u terenskim uvjetima u ACI marini Opatija. Promatrane su i analizirane izmjerene količine morske vode koje prolaze kroz propust, u odnosu na podatke o vjetru.

2. Terenska mjerenja

Terenska mjerenja provedena su u ACI marini Opatija u Hrvatskoj (slika 1.). Marina ima sustav od 8 paralelnih ugrađenih cijevnih propusta promjera od 1 m, smještenih u lukobranu. U toj marini izgrađeni su propusti zbog niskih plimnih oscilacija kako bi izmjena vode mogla biti učinkovitija. Vrh propusta je smješten na srednjoj razini mora. Sami propusti su ugrađeni na suprotnoj strani marine s obzirom na ulaz i nisu u istom smjeru poput ulaza (smjer propusta i smjer ulaza ugrubo daju pravi kut.). Amplituda plimnih oscilacija je uglavnom oko 0,4 metra tijekom mjernog perioda. Zaštićeno područje (oko 40 000 m²) proteže se oko 350 m duž obale i 150 m okomito na obalu, a prosječna dubina u akvatoriju je 5 m. Marina je povezana s Jadranskim morem s jednim ulazom širokim 30 m te s 8 cijevnih propusta. Marina Opatija također ima povoljan položaj glede izmjene vode, jer se nalazi na lokaciji vrlo čestog vjetra poput juga (J) i bure (S). Mjerenjem u prirodi može se dobiti uvid u procese koji se teško mogu stvoriti i mjeriti u laboratoriju, poput utjecaja vjetra, kombiniranog utjecaja vjetra i djelovanja valova ili nekog drugog fenomena koji se može promatrati samo u prirodi. Pet strujomjera (ADCP), jedan prijenosni sustav za mjerenje protoka (PCM4), jedan anemometar, jedna CTD sonda i kamera smješteni su u ACI marini Opatija 15. veljače 2017. i kontinuirano su mjerili do 31. ožujka 2017. do datuma kada su mjerni uređaji izvađeni iz mora (slika 1.). Mjerenja PCM-a završila su ranije zbog brže potrošene baterije (21. ožujka 2017.)

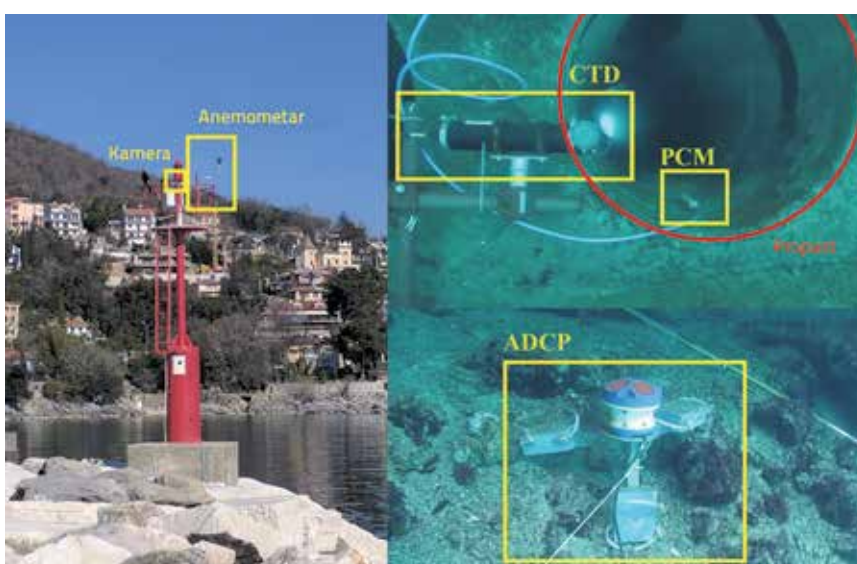
Dva od pet strujomjera postavljena su na obje strane cijevnih propusta (ADCP1 i ADCP2), jedan je postavljen u središtu marine



Slika 1. Situacijski pogled na ACI marinu Opatija s lokacijama mjernih uređaja

Tablica 1. Učestalost uzorkovanja i zapisivanja mjerenih vrijednosti po pojedinim uređajima raspoređenih u ACI marini Opatija

Mjerni uređaj	Učestalost uzorkovanja	Učestalost zapisivanja
ADCP 1, 2	1 sekunda	valovi - 15 minuta, struje - 10 minuta
ADCP 3, 4, 5	1 sekunda	struje - 10 minuta
CTD	1 sekunda	1 sekunda
Anemometar	1 sekunda	1 sekunda
PCM	varira ovisno o hidrauličkim i fizičkim uvjetima	2 minute



Slika 2. Mjerni uređaji (ADCP2, PCM, CTD, anemometar i kamera) postavljeni na odgovarajuće pozicije u ACI marini Opatija

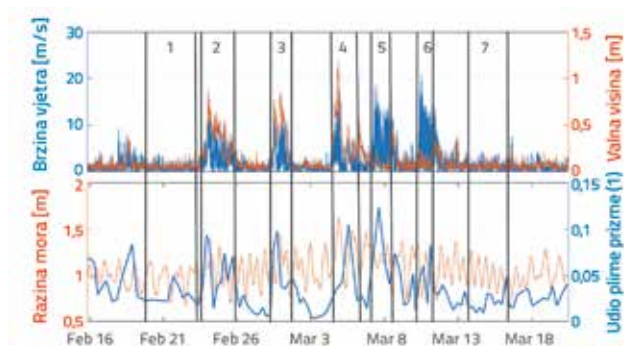
(ADCP 5), jedan na ulazu u marinu (ADCP 4) i zadnji 100 metara zapadno od primarnog lukobrana (ADCP 3). ADCP 1 i ADCP 2 mjerili su valne parametre (visina vala, valni period i smjer) i morske struje, dok su drugi mjerili samo morske struje. PCM senzor je smješten unutar jednog od osam cijevnih propusta u marini, te je bilježio brzine, protoke i razine unutar propusta. PCM će dati vrijedne podatke o brzini protoka koji se kasnije mogu povezati s učincima različitih prirodnih generatora protoka (npr. vjetra, valova i plimnih oscilacija). Anemometar je postavljen na povišenu poziciju na glavi lukobrana, tako da ga ne zaklanja infrastruktura marine. Anemometar je mjerio brzinu vjetra i smjerove u horizontalnoj ravnini. Broj plovila i njihov raspored tijekom mjerenja zabilježen je kamerom koja je smještena pored anemometra (slika 2.). CTD mjerenja na propustu upućuju na stratificirano stanje u marini. Ispod dubine od 30 cm slanost je bila konstantna u iznosu od 38 g/kg, no u blizini površine salinitet je pao gotovo na 15 g/kg. Temperatura nije pokazala nikakvu varijabilnost s dubinom tijekom mjerenja. Ova izričita promjena slanosti na površini vjerojatno je posljedica prethodno dokumentiranih slatkodvodnih izvora prisutnih na dnu akvatorija i obalnom zidu. Slatka voda je vjerojatno uzrokovana kišom u unutrašnjosti koja se može brzo perkolorirati kroz tlo i potom formirati tanki sloj svježje vode na površini mora unutar akvatorija. Zasad nema dostupnih procjena o količini slatke vode koja ulazi u akvatorij tijekom suhih ili kišnih razdoblja.

Učestalost uzorkovanja i zapisivanja mjernih uređaja varirala je ovisno o potrošnji baterije i raspoloživosti električne energije za pojedine uređaje (tablica 1.). Sirovi podaci svih uređaja najprije su podvrgnuti satnom osrednjavanju. Ova se pretpostavka smatra razumnom jer vrijeme izmjene kod većine luka i marina iznosi oko deset dana.

3. Rezultati i diskusija

Tijekom razdoblja mjerenja bilo je pet karakterističnih razdoblja sa značajnim vjetrom (karakteristična razdoblja od 2 do 6 na slici 3. i tablici 2.) koji su zabilježeni

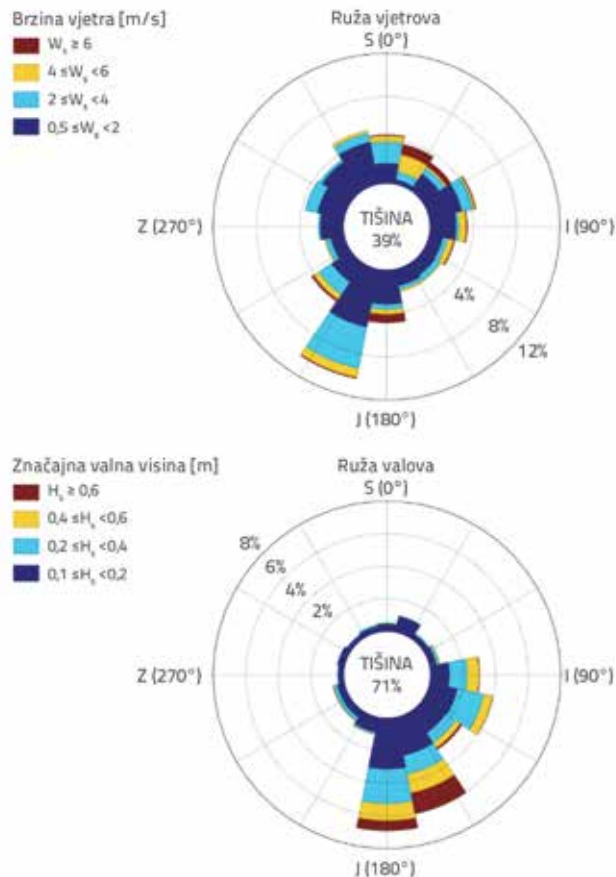
sa svim mjernim uređajima (mjerni uređaj protoka PCM imao je svoju bateriju već potpuno ispražnjenu 21. ožujka 2017., dok su ostali instrumenti nastavili bilježiti do 31. ožujka 2017., slika 3.).



Slika 3. Vremenska serija brzine vjetra (bilježena na poziciji glave lukobrana), značajne valne visine (mjerene na poziciji ADCP1), razine mora (unutar propusta mjerena pomoću PCM) i udio volumena (s obzirom na plimnu prizmu) koji protječe kroz propust tijekom jedne plimne oscilacije; sa sedam označenih karakterističnih razdoblja

Također će se dva reprezentativna razdoblja bez vjetra uzeti u obzir, radi promatranja protoka kroz propust prouzročen samo plimnim oscilacijama i baroklinom cirkulacijom (karakteristična razdoblja su označena brojevima 1 i 7 na slici 3. i tablici 2.). Može se uočiti da visoke vrijednosti značajne valne visine (izmjerene pomoću ADCP 1 ispred propusta) ne slijede uvijek trendove brzine vjetra. Prva tri karakteristična razdoblja sa značajnim vjetrom (2, 3 i 4) uzrokuju značajne valne visine do 1,2 metra uz dobro podudaranje između visine valova i brzine vjetra. Zadnja dva karakteristična razdoblja s vjetrom (5 i 6) uglavnom nisu uzrokovala znakovite valne visine. Zamjetni su valovi koji dolaze iz JII smjera na kraju oba karakteristična razdoblja 5 i 6. Valovi su se pojavili jer je vjetar promijenio smjer krajem vjetrovnih razdoblja vjetra 5 i 6 iz SSI prema JII, gdje je dovoljno dugačka duljina privjetrišta bila dostupna za generiranje valova.

Dijelovi karakterističnih razdoblja sa sjever-sjeveroistočnim vjetrom (5 i 6) na koja također utječu valovi nisu uključeni u daljnju analizu kako bi učinci vjetra bili izolirani. Neusklađenost između smjera vjetra i valova može biti uočena iz ruža (slika 4.).



Slika 4. Ruža vjetrova i ruža valova izrađene pomoću podataka prikupljenih tijekom perioda mjerenja (srednje satne vrijednosti vjetrovnih i valnih parametara)

Naime, vjetrovi iz JJZ (slika 4.) uzrokuju valove iz smjera JII. Objašnjenje otklona kuta je u specifičnoj strujnoj slici vjetra u sjevernom dijelu Hrvatske. Prethodna motrenja područja detektirala su značajan utjecaj strme obale i gorja iza obale kanalizacijom vjetra paralelno s obzirom na obalu. Dok izmjereni vjetrovi prilaze marini iz jugoistoka, na otvorenom moru navedeni vjetrovi vjerojatno dolaze iz opsežnijeg smjera između jugoistoka i jugozapada i imaju značajnu dužinu privjetrišta od 20 km gdje se mogu producirati značajni vjetroviti valovi. Kada

Tablica 2. Karakteristični periodi tijekom mjerenja u veljači i ožujku 2017.

Karakteristični period	Datum i vrijeme početka	Datum i vrijeme kraja	Smjer vjetra	Valovi
1.	19.2.17., 16:00	22.2.17., 22:00	Nema vjetra	Ne
2.	23.2.17., 13:00	25.2.17., 20:00	JJZ	Da
3.	28.2.17., 5:00	1.3.17., 17:00	JJZ	Da
4.	4.3.17., 7:00	6.3.17., 6:00	JJZ	Da
5.	7.3.17., 2:00	8.3.17., 1:00	SSI	Ne
6.	10.3.17., 5:00	11.3.17., 7:00	SSI	Ne
7.	14.3.17., 0:00	16.3.17., 9:00	Nema vjetra	Ne

južni vjetrovi priđu brdovitoj obali, kanaliziraju se u smjeru SSW, paralelno s obalom. Vjetrovi koji pušu iz smjera NNE imaju malu dužinu privjetrišta od 5 km, a smjer vjetra paralelan je s obalom što dodatno sprječava produkciju vjetrovnih valova.

Najčešći su vjetrovi iz smjera jugozapada (10 %), a najjači s juga i sjeveroistoka (0,5 % zabilježenih satnih srednjih brzina vjetra imalo je jakost veću od 6 m/s) (slika 4.). Sjever-sjeveroistočni vjetra je istog smjera kao i ulaz u marinu, što može uzrokovati nešto veći utjecaj na strujanje unutar marine tijekom navedenih vjetrova. Mirna razdoblja (kada je intenzitet vjetra ispod 0,5 m/s) prisutna su tijekom 39 % perioda mjerenja. Valna situacija se veći dio mjernog perioda (71 % promatranog razdoblja je značajna valna visina bila ispod vrijednosti od 0,1 m) smatrala mirnim, a smjer valova je uglavnom varirao između istoka i juga. Tijekom značajnijih valnih situacija, valovi su uglavnom dolazili iz juga i jugoistoka (valni uvjeti su značajnom valnom visinom iznad 0,6 m). U odnosu na smjer propusta (135°), incidentni kutovi valova uglavnom su između -45° i +45°, pri čemu su valovi većih valnih visina prilazili pod kutom od +15° do +45°. Očekuje se da će valovi koji nailaze pri incidentnom valnom kutu većem od 0° uzrokovati manju transmisiju valne energije i protok [24].

Razina mora prikazana je s obzirom na dno propusta, stoga razini mora pri vrhu cijevnog propusta odgovara vrijednost od 1 m što također odgovara promjeru propusta (slika 3.). Tijekom mjerenja raspon plimnih oscilacija je uglavnom bio oko 0,4 m, dok je najniža zabilježena vrijednost iznosila 0,7 m, a najviša 1,6 m od dna propusta.

Volumen mora koji protječe kroz propust promatra se pomoću apsolutne integrativne vrijednosti tijekom svake plimne oscilacije (plime i oseke). Također se pretpostavlja da se morska voda, koja izlazi iz marine tijekom prethodne oseke, ne vraća kroz propust iz okolnog mora (povratni protok (b) jednak 0 [10]) i da je morska voda koja ulazi u marinu trenutačno izmiješana unutar akvatorija. To je prihvatljiva pretpostavka u malim dobro izmiješanim akvatorijima [25]. Integrirani volumen tijekom jedne plimne oscilacije stavljen je u vezu s plimnom prizmom (engl. *tidal prism*) marine (uobičajena metoda za izračun srednje veličine plimne prizme jest pomnožiti srednji raspon plimnih oscilacija i površinu akvatorija pri srednjoj razini mora – površina zaštićenog akvatorija marine, uzet u izračun, iznosi 40 000 m²). Sve je to obavljeno kako bi se procijenila količina mora koja prolazi kroz propust u odnosu na količinu koja cirkulira kroz cijelu marinu tijekom svake plime. Udio plimne prizme koji protječe kroz propust tijekom razdoblja bez vjetra u rasponu je od 2 % do 4 %. Tijekom karakterističnih vjetrovnih razdoblja ta je vrijednost značajno veća i može doseći 12 %. Budući da se u ACI marini Opatija nalazi 8 cijevnih propusta i ako pretpostavimo linearno skaliranje volumena koji prolazi kroz propust s obzirom na njihov broj, stižemo do vrijednosti od 96 % . Dobivena vrijednost je iznimno visoka, a posljedica je različitih generatora cirkulacije poput vjetra i valova koji nisu uzeti u obzir tijekom procjene plimne prizme (ako postoje vjetrovi i valovi, ukupna količina cirkulirajuće vode kroz marinu u jednoj plimnoj oscilaciji prelazi 100 % plimne prizme). Tijekom mirnih karakterističnih razdoblja,

kombinirani protok od 8 propusta jednak je 24 % plimne prizme. Ova vrijednost upućuje na znatan utjecaj propusta u cirkulaciji morske vode u slučaju plimnih oscilacija.

Promatrajući utjecaj razine mora na protok, mogu se definirati dva različita slučaja (slika 5.): slučaj kad je razina mora iznad 1 metar (propust je potpuno potopljen u morskoj vodi) i slučaj kad je ispod 1 metar (propust je djelomično uronjen u morsku vodu ostavljajući dio propusta ispunjenog zrakom). U prvom slučaju, količina morske vode koja prolazi kroz propust prouzročena samo plimnim djelovanjem (karakteristična razdoblja 1 i 7) do dva je puta manja u usporedbi s drugim slučajem. Isti učinak razina je uočen i za karakteristična razdoblja u kojima se pojavljuju vjetrovi iz NNE smjera (karakteristični periodi 5 i 6), protok je znatno povećan s padom razine vode ispod vrha propusta. Utjecaj razine vode tijekom karakterističnog razdoblja 6 usporediv je s karakterističnim razdobljima bez vjetra (karakteristični periodi 1 i 7), protok se povećao dva puta s padom razine vode. U karakterističnom razdoblju 5, iako razina mora nikad ne padne ispod jednog metra, dalje je vidljiv upečatljiv trend rasta protoka s padom razine mora. Vjetar koji puše iz NNE smjera (različitog intenziteta) ipak može rezultirati trostruko većim protokom u usporedbi s razdobljem bez vjetra. To može biti posljedica površinskih struja uzrokovanih vjetrom ili pojavom nagiba vodnog lica, što rezultira situacijom gdje je razina morske vode unutar akvatorija viša od razine mora na vanjskoj strani lukobrana. Može se uočiti da maksimalno volumen od 120 m³ protječe kroz propust u jednom satu ako postoji samo gibanje uzrokovano plimnim oscilacijama (karakteristična razdoblja 1 i 7 na slici 5.).

Terenska mjerenja korištena su za kalibriranje analitičkog modela za protok unutar propusta tijekom karakterističnih razdoblja bez vjetra i valova prisutnih u marini. Uobičajeno je da su lokalni gubitci energije na ulazu i izlazu dominantni uzroci gubitka energije u kratkim cijevima i propustima [20, 26]. Ako se brzine morskih struja u okolici propusta smatraju zanemarivima u usporedbi s brzinama unutar propusta, uobičajeno je dodijeliti vrijednost 1 koeficijentu lokalnog gubitka na izlazu [20]. Prethodna istraživanja o hidrauličkim načelima propusta na vodotocima pokazala su da lokalni koeficijent gubitka na ulazu može varirati s promjenama razine vode ispred propusta, posebice za razine vode za koje vrijedi $H/D < 1,5$ (H - razina vode izmjerena od dna propusta, D - promjer propusta) [21, 22]. Koeficijent lokalnog gubitka na ulazu raste s porastom razine vode za većinu oblikovanja ulaza u propust. Stoga je koeficijent gubitka ulaza odabran kao parametar kalibracije u ovoj analizi zbog svoje varijabilne prirode. Preporuke za hidrauličko oblikovanje ulaza propusta [27] često daju sljedeću formulaciju za proračun ukupnog gubitka energije prema izrazu (1):

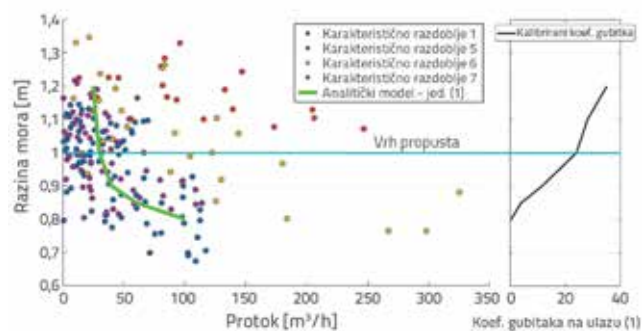
$$H = \left(k_{izlaz} + k_{ulaz} + \frac{19,63 \cdot n^2 \cdot L}{R^{1,33}} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

gdje je:

H - ukupni gubitak energije

- k_{izlaz} - koeficijent lokalnog gubitka na izlazu (uzet kao konstanta jednaka 1)
 k_{ulaz} - koeficijent lokalnog gubitka na ulazu
 n - Manningov koeficijent hrapavosti materijala od čega je izrađen propust (iznosi 0,013 za betonske cijevi)
 L - duljina propusta (u marini Opatija dužina propusta je 18 m)
 R - hidraulički radijus propusta
 V - brzina unutar propusta
 g - gravitacijska konstanta (jednaka 9,81 m/s²).

Brzina unutar propusta i hidraulički radijus variraju ovisno o razini mora i mogu se izvesti iz predočenog analitičkog modela koji odgovara izmjerenim podacima u marini Opatija za protok kroz propust s plimnim oscilacijama kao jedinog generatora protoka (slika 5.). Nadalje, pretpostavljen je konstantan ukupan gubitak energije u svim situacijama, jer zasad nisu dostupni precizni podaci o razlikama u razini mora između vanjske i unutarnje strane lukobrana. Pretpostavljen ukupni gubitak energije iznosi 0,15 mm, čime koeficijent gubitka na ulazu ostaje jedina nepoznata varijabla u jednadžbi (1). Proračunom jednadžbe (1) za različite razine mora može se izračunati kalibrirani koeficijent gubitka energije na ulazu kao funkcije morske razine (slika 5.).



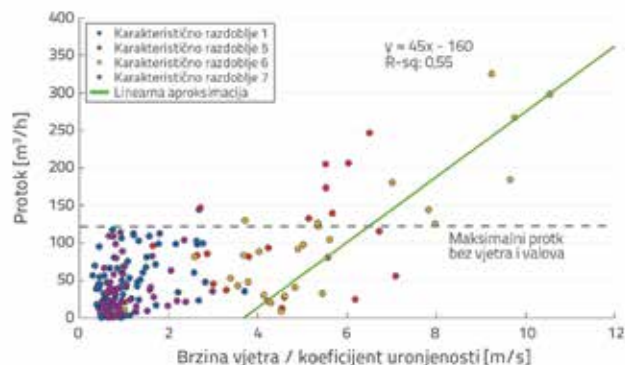
Slika 5. Mjereni satni protoci kroz propust u odnosu na razinu mora; kalibrirani koeficijent lokalnog gubitka na ulazu u funkciji razine mora

Kalibrirane vrijednosti koeficijenta gubitka na ulazu za mjerene vrijednosti protoka unutar propusta znatno variraju za različite razine mora. Najniža izračunana vrijednost koeficijenta iznosi 0,4, a najviša 35. Veliki raspon koeficijenta posljedica je nekoliko nepredvidivih učinaka. Prije svega, u hidraulici propusta na vodotocima očekuje se da smjer kretanja vode bude u smjeru propusta, što ne mora biti slučaj u pomorskim uvjetima. Morske struje u obalnim područjima pretežno se gibaju paralelno s obalom i u slučaju marine Opatija, okomito na smjer propusta (slika 1.). Prethodna istraživanja također su zaključila da se koeficijent gubitka može povećati za oko 48 %, ovisno o razini oštećenja propusta u terenskim uvjetima [23]. Dodatno, krivulja lokalnog gubitka energije na ulazu u prethodnim je studijama dramatično varirala s obzirom na geometrijske karakteristike propusta, pa se može očekivati da lukobran ima specifičan učinak

na krivulju koeficijenta lokalnog gubitka energije [21, 22]. Dok su prethodno navedene studije hidraulike propusta uzimale u obzir u potpunosti turbulentni tok, propust u marini Opatija nije u zoni potpune turbulencije već u prijelaznoj zoni između laminarnog i turbulentnog toka [28]. Specifični hidrodinamički uvjeti također mogu imati neočekivani utjecaj na kalibrirani koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu. Navedeni neusklađeni učinci su svi obuhvaćeni u kalibracijskoj krivulji koeficijenta gubitka ulaza (slika 5.).

Utjecaj razine vode, u odnosu na vertikalni položaj propusta, nadalje će se prikazivati koeficijentom uronjenosti (w). Koeficijent se definira kao omjer satno uprosječne razine vode definirane od dna propusta i promjera propusta. Taj omjer rezultira bezdimenzijskim koeficijentom koji može uzeti u obzir utjecaj razine mora. Razina vode je detektirana kao veliki utjecaj na protok vode koja prolazi kroz propust.

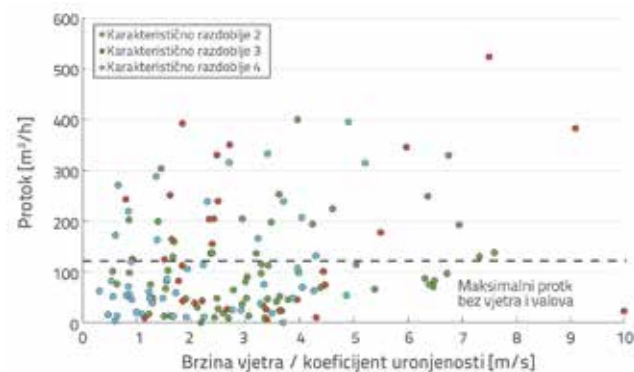
Nadalje, može se zaključiti da veći omjer prosječne satne jakosti vjetra i pripadajućeg koeficijenta uronjenosti rezultira većom vrijednosti protoka (slika 6.).



Slika 6. Mjereni satni protoci kroz propust u funkciji odnosa brzine vjetra i koeficijenta uronjenosti (Karakteristična razdoblja s prisutnim valovima)

Tijekom mirnih karakterističnih razdoblja (karakteristična razdoblja 1 i 7) omjer nikada ne raste iznad vrijednosti 4 jer su jakosti vjetra niske. Samo se tijekom karakterističnih razdoblja sa značajnim vjetrom omjer povećava iznad vrijednosti od 4, ali na količinu volumena vode koja protječe kroz propust utječe tek kada je omjer viši od 6. Prikazana je linearna aproksimacija o odnosu rasta omjera i rasta volumena vode koji protječe kroz propust. Pri izradi linearne aproksimacije uzete su u obzir samo mjerene vrijednosti s omjerom većim od 4. Rast omjera za vrijednost od 1 m/s rezultira povećanjem protoka u vrijednosti od 45 m³/h kroz propust. Pretpostavlja se da trajanje vjetra značajno utječe na promatrani odnos. Kao posljedica toga, trajanje vjetra u kombinaciji s već spomenutim omjerom trebalo bi dati preciznije rezultate. Međutim, pokazalo se da je to teško uklopiti prilikom analize podataka s terenskih mjerenja jer se vjetar neprestano mijenja u prirodi (intenzitet i smjer vjetra). Utjecaj trajanja vjetra treba istražiti pomoću opsežnih testova s numeričkim modelom.

U karakterističnim razdobljima u kojima se vjetar približava s juga i jugozapada, nema vidljive korelacije između omjera jakosti vjetra i koeficijenta uronjenosti s protijekom koji protječe kroz propust (slika 7.). Stoga se protjecanje unutar propusta ne može predvidjeti samo pomoću podataka o vjetru. Potrebno je uzeti u obzir i druge generatore toka, od čega su najznačajniji valovi. Vremenski intervali tijekom kojih se pojavljuju valovi na kraju SSI vjetrovnih razdoblja (karakteristična razdoblja 5 i 6), protjecanje unutar propusta također se pokazalo vrlo nepredvidljivima s prethodno prikazanom linearnom aproksimacijom (slika 6). Zabilježeni protoci su tijekom karakterističnih razdoblja s prisutnim JJZ vjetrom svakako veći nego u karakterističnim razdobljima sa SSI vjetrom, te dostižu vrijednosti četiri puta veću od razdoblja bez vjetra. Potrebno je provesti daljnja ispitivanja hidrodinamike u propustima koji su pokrenuti kombinacijom vjetra i valova, korištenjem 3D numeričkih modela.



Slika 7. Mjereni satni protoci kroz propust u funkciji odnosa jakosti vjetra i koeficijenta uronjenosti (Karakteristična razdoblja s prisutnim valovima)

Valja uzeti u obzir da postoji mogućnost značajne transmisije valne energije kroz propust u akvatorij marine. Stoga horizontalnu i vertikalnu poziciju propusta treba odabrati uzimajući u obzir valne uvjete prisutne na lokaciji marine. Problem velikih brzina koje se pojavljuju u akvatoriju kroz propust kod valnih događaja treba razmotriti i zato da se ne bi u marini pojavljivali veliki vrtlozi.

4. Zaključak

Smanjena kakvoća vode ponajprije je problem na lokacijama gdje su slabo izražene plimne oscilacija, poput Sredozemnog

mora. Već je ustanovljeno da dostatna izmjena vode poboljšava kvalitetu vode unutar luke. Dovoljna razina procesa izmjene vode definirana je kao izmjena vode koja osigurava da koncentracije onečišćujućih tvari unutar marine budu ispod kritične razine ekosustava (npr. kritična koncentracija cvjetanja algi ili otopljenog kisika). Propusti su standardno inženjersko rješenje, u područjima s niskim plimnim oscilacijama, kojima se poboljšava cirkulacija mora i izmjena vode.

Terenska mjerenja provedena su u ACI marini Opatija na sjevernom Jadranu, te su trajala mjesec i pol kako bi se otkrili temeljni procesi koji produciraju izmjenu vode. Tijekom razdoblja s manjom jačinom vjetra, otprilike 3 % plimne prizme cirkulira kroz propust u jednoj plimnoj oscilaciji. S 8 propusta u marini i pretpostavljenim linearnim skaliranjem protoka, ta vrijednost dostiže 24 %, što predstavlja značajan utjecaj na cirkulaciju marina. Vjetar i generatori valova uvećavaju udio plimne prizme do četiri puta. Ovu vrijednost valja uzeti s oprezom jer u uvjetima s prisutnim vjetrom i valovima ukupna cirkulacija je znatno veća od plimne prizme.

Razina mora uvelike utječe na količinu volumena koji teče kroz cijevni propust. Smanjenje razine mora ispod vrha propusta povećava protok do dva puta i u mirnim i u uvjetima s jačim vjetrom. Analitički model je bio korišten u hidraulici propusta kako bi se usporedio s rezultatima mjerenja. Koeficijent lokalnoga gubitka energije na ulazu primijenjen je kao varijabla kalibracije. Koeficijent je varirao u velikom rasponu od 0,4 do 35. Nekoliko nepredvidivih učinaka moglo bi značajno utjecati na kalibrirani koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu. Količina protoka može se predvidjeti u karakterističnim razdobljima, bez prisutnih incidentnih valova, s linearnom aproksimacijom. Omjer jačine vjetra i koeficijenta uronjenosti treba iznositi najmanje 6 (ako se primjerice pretpostavi da je razina mora pri vrhu propusta, a brzina vjetra 6 m/s), kako bi vjetar mogao značajnije utjecati na cirkulaciju u marini. Ova procjena se ne može primijeniti na karakteristična razdoblja u kojima pušu vjetrovi s juga i jugozapada (prisutni su valovi s jugoistoka), jer je nelinearna interakcija između vjetra i valova, što utječe na protok u propustu, znatno složenija.

Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2014-09-6774.

LITERATURA

- [1] Di Franco, A., Graziano, M., Franzitta, G., Felling, S., Chemello, R., Milazzo, M.: Do small marinas drive habitat specific impacts? A case study from Mediterranean Sea, *Mar. Pollut. Bull.*, 62 (2011), pp. 926–933. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.053>.
- [2] Gaitanis, C.K., Douka, E., Tsoukala, V.K., Stamou, A.I., Moutzouris, C.I.: Dissolved Oxygen Transmission in Harbor Basins Through Flushing Culverts, in: *Proc. 11th Int. Conf. Environ. Sci. Technol.*, pp. 285–292, 2009.

- [3] Tsoukala, V.K., Gaitanis, C.K., Stamou, A.I., Moutzouris, C.I.: Wave and dissolved oxygen transmission analysis in harbors using flushing culverts: An experimental approach, *Glob. Nest J.* 12 (2010) 152–160.
- [4] Schwartz, R.A., Imberger, J.: Flushing Behaviour of a Coastal Marina, *Coast. Eng. Proc.*, 1 (1988), pp. 2626–2640.
- [5] Ferreira, J.G., Wolff, W.J., Simas, T.C., Bricker, S.B.: Does biodiversity of estuarine phytoplankton depend on hydrology, *Ecol. Modell.* 187 (2005), <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.013>.
- [6] Borja, Á., Rodríguez, J.G., Black, K., Bodoy, A., Emblow, C., Fernandes, T.F., Forte, J. Karakassis, I. Muxika, I., Nickell, T.D., Papageorgiou, N., Pranovi, F., Sevastou, K., Tomassetti, P., Angel, D.: Assessing the suitability of a range of benthic indices in the evaluation of environmental impact of fin and shellfish aquaculture located in sites across Europe, *Aquaculture*, 293 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.04.037>.
- [7] Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H.: Mixing in inland and coastal waters, *Acad. San Diego Calif.* 114 (1979), pp. 315–316. <https://doi.org/10.1017/S002211208223028X>.
- [8] DiLorenzo, J.L., Ram, R.V., Huang, P., Najarian, T.O.: Pollution susceptibility of well-mixed tidal basins, *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* 120 (1994), pp. 404–422.
- [9] Nece, B.R.E., Asce, F.: Planform Effects on Tidal Flushing, *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, 110 (1984), pp. 251–269. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:2\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:2(251)).
- [10] Sanford, L.P., Boicourt, W.C., Rives, S.R.: Model For Estimating Tidal Flushing of Small Embayments, *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, 118 (1992), pp. 635–654.
- [11] Nece, B.R.E., Asce, F.: Planform effects on tidal flushing of marinas, *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, 110 (1984), pp. 251–269. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:2\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:2(251)).
- [12] Falconer, R.A., Guoping Yu.: Effects of depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory model harbour, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 91 (1991) 2, pp.561–576.
- [13] US Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Manual*, 2002.
- [14] Tsoukala, V.K., Moutzouris, C.I.: Wave transmission in harbors through flushing culverts, *Ocean Eng.*, 36 (2009), pp. 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.01.005>.
- [15] Katsardi, V., Boundris, G., Tsoukala, V.K., Belibassakis, K.A.: Study of wave transformation due to flushing culverts in coastal structures, *Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf.*, 4 (2012), pp. 1356–1363.
- [16] Umgiesser, G., Ferrarin, C., Cucco, A., De Pascalis, F., Bellafiore, D., Ghezzi, M., Bajo, M.: Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling, *J. Geophys. Res. Ocean*, pp. 9026–9032, 2014, <https://doi.org/10.1002/2014JC010066>. Received.
- [17] Cucco, A., Umgiesser, G.: Modeling the Venice Lagoon residence time, *Ecol. Modell.* 193 (2006), pp. 34–51, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.043>.
- [18] Canu, D.M., Solidoro, C., Umgiesser, G., Cucco, A., Ferrarin, C.: Assessing confinement in coastal lagoons, *Mar. Pollut. Bull.*, 64 (2012), pp. 2391–2398, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.007>.
- [19] Stagonas, D., Müller, G., Magagna, D., Warbrick, D.: Fundamental investigation of water flow in harbors through a flushing culvert, in: *Water Eng. a Sustain. Environ. Ranging*, pp. 7288–7295, 2009.
- [20] Tullis, B.P., Robinson, S.C.: Quantifying culvert exit loss, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 134 (2008), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(263\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(263)).
- [21] Tullis, B.P., Anderson, D.S., Robinson, S.C.: Entrance loss coefficients and inlet control head-discharge relationships for buried-invert culverts, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 134 (2008), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:6\(831\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:6(831)).
- [22] Smith, C.D., Oak, A.G.: Culvert inlet efficiency, *Can. J. Civ. Eng.*, 22 (1995).
- [23] Keils, J.: Hydraulic performance of damaged-end corrugated steel pipe culverts, *Can. J. Civ. Eng.*, 35 (2008), <https://doi.org/10.1139/L08-055>.
- [24] Tsoukala, V.K., Moutzouris, C.I.: A 3-D experimental study on the beneficial role of flushing culverts in sea water quality, in: *Proc. Coast. Eng. Conf.*, 2009.
- [25] Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V., Monismith, S.G.: A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales, *Limnol. Oceanogr.*, 47 (2002), pp. 1545–1553, <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>.
- [26] Board, E.: *National Academies of Sciences and Medicine, Hydraulic Loss Coefficients for Culverts*, The National Academies Press, Washington, DC, 2012, <https://doi.org/10.17226/22673>.
- [27] U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, *Hydraulic design of highway culverts*, Third Edit, 2012.
- [28] Fung, Y.C.: *Biomechanics - Motion, flow, stress and growth*, Springer-Verlag, New York, 1990.