

UTJECAJ KANALSKIH PROPUSTA NA IZMJENU MORA I VALOVANJE U AKVATORIJU MARINA

izv. prof. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb
gloncar@grad.hr

doc. dr. sc. Damir Bekić, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

doc. dr. sc. Dalibor Carević, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Damjan Bujak, mag. ing. aedif.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Ivana Bartolić, mag. ing. aedif.
Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel
Avenija Većeslava Holjevca 15, 10000 Zagreb

dr. sc. Gordana Beg Paklar
Institut za oceanografiju i ribarstvo,
Šetalište I. Meštrovića 63, 21000 Split

Prikazani su rezultati provedenih numeričkih simulacija cirkulacije i valne dinamike akvatorija marine koja u glavnom lukobranu ima izveden kanalski propust na četiri varijantne pozicije. Analizirana je hipotetska marina duljine 300 m, širine 150 m, širina ulaza 25 m, varijabilne dubine od 3 do 7 m. Varirane su pozicije (4 pozicije) i širine kanalskog propusta (5 m i 10 m) u lukobranu te kote dna (-1 m, -2 m, -3 m, -5 m, dno marine) marine. Model cirkulacije i izmjene mora je forsiran djelovanjem vjetra (smjerovi N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) s hipotetskom raspodjelom brzina (linearni prirast od 0 do 5 Bf i linearni pad od 5 Bf do 0) i plimnim oscilacijama tijekom simulacijskog razdoblja od 24 h. Analizirana je transmisija energije vjetrovnih valova kroz kanalski propust za valne visine $H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m i pripadne valne periode $T = 3,1$ s, 4.0 s i 4.9 s ispred lukobrana. Prikazani rezultati omogućuju izbor pozicije i geometrije kanalskog propusta za postizanje maksimalne izmjene mora uz postavljeni uvjet dopuštene valne pobude. Na primjeru Marine Zadar prezentirana je praktična primjena dobivenih rezultata.

Ključne riječi: kanalski propust, marina, Jadran, numerički model

1. UVOD

Najveći broj marina i luka na hrvatskoj obali Jadranskog mora šticećen je nasipnim ili gravitacijskim lukobranima koji ograđuju luku od okolne vode u svim slojevima vodenog stupca od površine do dna. Na taj način fizički je spriječena komunikacija između akvatorija marine i okolnog mora, što može dovesti do narušavanja kvalitete mora u šticećenom akvatoriju marine. Kako bi se spriječilo narušavanje kvalitete mora u marini, potrebno je omogućiti adekvatnu izmjenu mora, što se postiže uvođenjem prakse projektiranja i izvođenja cijevnih ili kanalskih propusta kroz tijela nasipnih i gravitacijskih lukobrana. Time se postiže bolja cirkulacija između marine i okolnog akvatorija te smanjuje vrijeme zadržavanja mora u šticećenom području.

Glavni utjecaj na izmjenu vode između luke i okolnog morskog područja imaju prirodni čimbenici poput morskih mijena, strujanja uzrokovanog vjetrom, vjetrovnih valova te razlike u gustoći mora (Fischer, 1979.;

Shwartz, 1989.; Nece, 1984.; Falconer, 1991.). U krškom priobalju istjecanje podzemnih voda također može imati utjecaj na izmjenu mora u lukama. Na cirkulaciju mora uvelike utječu i konstrukcijski parametri luke kao što su tlocrtna forma, dimenzije ulaza u luku, dubina vode i nagib dna (Nece, 1984., Falconer, 1991., CEM, 2002.). Izmjena vode u luci može biti poboljšana korištenjem cijevnih ili kanalskih propusta (Babić et al., 2016.). Primjena propusta je posebno opravdana u područjima s malim amplitudama morskih mijena (Jadransko more), gdje razlika između visokih i niskih voda nije dovoljna za dobru izmjenu vode u šticećenim akvatorijima marina, luka i lučica (Ozhan et al., 1992., Weston Solutions, 2013.). Doprinos cijevnih propusta u izmjeni vode pri strujanju generiranom djelovanjem vjetra, te u pobudi lučkih bazena na valovanje kroz transmisiju valne energije analiziran je u radovima Stamou et al. (2001., 2004.), Tsoukala et al. (2003., 2005., 2009., 2010, 2014.),

Fountoulis et al. (2005.), Stagonas et al. (2009.), Ozhan et al. (1992.), te Balas et al. (2010.). U radovima su prikazani rezultati numeričkog i fizikalnog modeliranja, te mjerenja u naravi, no bez sagledavanja kombiniranog utjecaja valovanja i hidrografskih čimbenika na stimulaciju cirkulacije vode kroz propuste.

U ovom su radu prikazani rezultati provedenih numeričkih simulacija cirkulacije i izmjene mora te valne transmisije kroz kanalski propust smješten u lukobranu marine. Za tlocrtnu dispoziciju hipotetske marine korištena je duljina 300 m i širina 150 m te ulaz u marinu širine 25 m. Navedene dimenzije su karakteristične za marine na hrvatskom Jadranu (Carević et al. 2014.) (slika 1). Numeričke simulacije su provedene uz varijaciju sljedećih geometrijskih obilježja kanalskog propusta te uvjeta valovanja ispred lukobrana marine:

- 4 pozicije propusta uzduž linije lukobrana (slika 1);
- 5 kota dna kanala propusta (-1 m, -2 m, -3 m, -5 m, dno marine);
- 2 širine kanala propusta (5 m i 10 m);
- 3 valne visine ($H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m) s pripadnim valnim periodama ($T = 3.1$ s, 4.0 s i 4.9 s) monokromatskih valova (istovjetna strmost 1:25).

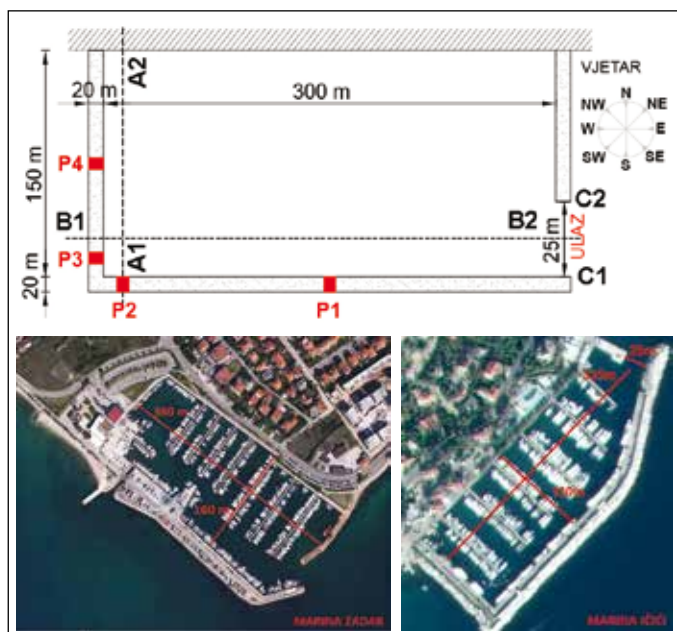
Za komparativni parametar učinka pojedinog rješenja (pozicija i geometrija kanalskog propusta) na cirkulaciju i izmjenu mora koristilo se smanjenje inicijalno postavljene homogene koncentracije traserske otopine u cijelom akvatoriju marine (bezdimenzionalna vrijednost 100). Utjecaj pojedinog rješenja kanalskog propusta na dinamiku marine uslijed transmisije valne energije sagledan je kroz primjenu kriterija postavljenog od strane Hrvatskog registra brodova (HRB), kojim je određena maksimalna dopuštena visina valova u

štićenom akvatoriju od $H_{DOP(PP2)} = 0.15$ m pri povratnom razdoblju od 2 godine, $H_{DOP(PP5)} = 0.3$ m pri povratnom razdoblju od 5 godina, te $H_{DOP(PP50)} = 0.5$ m pri povratnom razdoblju od 50 godina.

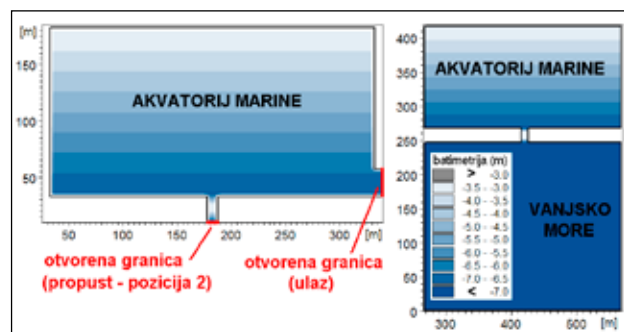
Primjena prikazanih rezultata omogućava odabir pozicije i geometrije kanalskog propusta s kojom se postiže maksimalna izmjena mora, uz zadovoljenje kriterija dopuštene valne pobude. Za prezentaciju praktične primjene odabrana je Marina Zadar.

2. NUMERIČKI MODELI

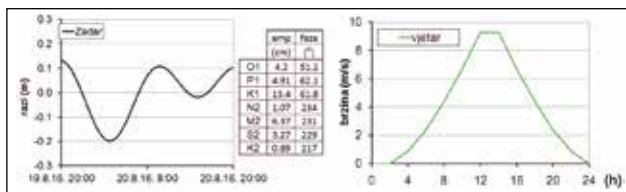
Za provedbu numeričkih simulacija cirkulacije i izmjene mora korišten je 3D numerički model Mike 3 (Lončar et al., 2007.) zasnovan na metodi konačnih diferencija. Modelska prostorna domena hipotetske marine (slika 1) u horizontalnom smjeru diskretizirana je strukturiranom proračunskom mrežom s korakom od 5 m u x i y smjeru te 0.5 m u vertikalnom smjeru (slika 2). Dno ima konstantni nagib, od 3 do 7 m dubine (slika 2). U numeričkim simulacijama su na jednoj od pozicija označenih na slici 1 (P1, P2, P3 i P4) postavljeni pravokutni propusti (širine 5 m ili 10 m) koji povezuju akvatorij marine s okolnim morem, a varirana je i kota dna kanalskog propusta (na 1, 3 i 5 m dubine). Srednja morska raz u marini je 0 m. Na otvorenim granicama modela cirkulacije i izmjene mora (ulaz, propust) korišten je vremenski niz morskih razi dobiven temeljem podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih konstituenata plimnog signala O1, P1, K1, N2, M2, S2 i K2 za lokaciju Zadar u razdoblju 19. 8. 2016. 20:00 – 20. 8. 2016. 20:00 (Janeković i Kuzmić, 2005., slika 3). Djelovanje homogenog polja vjetera na granici mora i atmosfere ima hipotetski karakter, pri čemu je u svakoj pojedinoj simulaciji brzina vjetera varirana na isti način (slika 3, linearni prirast i pad od 1 bf svaka 2 sata), uz zadržavanje konstantnog smjera vjetera tijekom simulacijskog razdoblja od 24 sata. Analizirano je 8 osnovnih smjerova vjetera – sa sjevera N, sjeveroistoka NE, istoka E, jugoistoka SE, juga S, jugozapada SW, zapada W i sjeverozapada NW. Početni uvjet za trodimenzionalno strujno polje je stanje mirovanja.



Slika 1: Shematski prikaz hipotetske marine s osnovnim geometrijskim obilježjima (gore) i slike Marine Ičići i Marine Zadar (dolje, prosječna dubina u Marini Ičići -5.1 m, u Marini Zadar -5.3 m). Na shematskom prikazu marine pozicije propusta označene s P1, P2, P3, P4.



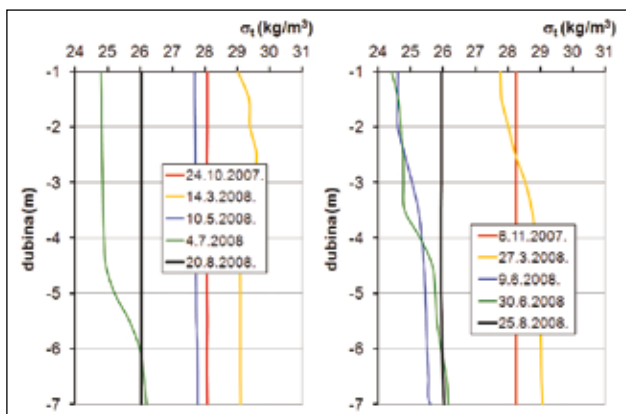
Slika 2: Prostorna diskretizacija modelske domene na batimetrijskoj podlozi (hipotetska marina, propust na poziciji 1, dno propusta na -3 m, lijevo – model cirkulacije i izmjene mora, desno – model valne dinamike)



Slika 3: Vremenski niz morskih razi korišten za rubni uvjet na otvorenim granicama (ulaz, propust) numeričkog modela cirkulacije i izmjene mora dobiven temeljem amplituda/faza 7 osnovnih konstituenata plimnog signala (O1...K2) za lokaciju Zadar (lijevo) i vremenski niz brzine vjetra tijekom simulacijskog razdoblja od 24 sata (desno)

Gustoća mora je usvojena kao homogena s vrijednost 1027 kg/m^3 ($\sigma_t = 27 \text{ kg/m}^3$). Ova vrijednost dobivena je usrednjavanjem izmjerene gustoće mora s CTD sondom (do 7 m dubine) na oceanografskim postajama ispred Marine Zadar i Ičići tijekom godišnjeg ciklusa (slika 4). Kako se sa slike 4 može uočiti, promjene gustoće mora u vertikalnom smjeru do dubina 7 m su relativno male, čak i u ljetnom razdoblju. Potrebno je napomenuti da gradijentne struje generirane razlikom u gustoći mora imaju svoj doprinos u cirkulaciji i izmjeni vode, no njihov utjecaj nije analiziran u ovom radu. Stoga su rezultati nastavno provedenih analiza i prezentiranih rezultata primjereniji za zimsko razdoblje u kojem prevladava homogeneri stupac gustoće mora.

Model zatvaranja Reynoldsovih jednadžbi oslanja se na $k-\epsilon$ formulaciju (Rodi, 1987.) u vertikalnom smjeru i koncept Smagorinskog (1993.) u horizontalnom smjeru. Faktori proporcionalnosti za polja turbulენტne kinetičke energije (TKE) i disipacije (ϵ) usvojeni su s vrijednostima 1 (TKE) i 1.3 (ϵ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Hrapavost i Smagorinsky koeficijent u modelu su usvojeni kao prostorno homogeneri s vrijednostima 0.01 m i 0.2. Za koeficijent povlačenja vjetra usvojena je vrijednost 0.0024 (Wu, 1994.).



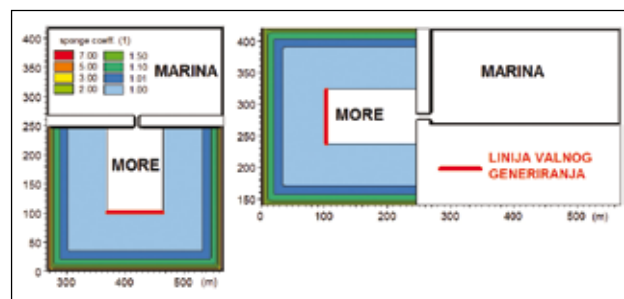
Slika 4: Vertikalne raspodjele gustoće mora izmjerene u CTD profilima do dubine 7 m ispred Marine Ičići (lijevo - $\varphi = 45,2499^\circ$; $\lambda = 14,2857^\circ$) i Marine Zadar (desno, $\varphi = 44,0667^\circ$; $\lambda = 15,2452^\circ$)

Usporedba doprinosa pojedinog kanalskog propusta u ukupnoj izmjeni mora oslanja se na pristupu opisanom u radu Cucco i Umgiesser (2006.). Štićeni akvatorij marine je inicijalno ispunjen traserskom otopinom s homogenom bezdimenzionalnom koncentracijom 100 (početni uvjeti), dok je u profilima otvorenih prema

granicama (ulaz i propust) postavljena homogena i stacionarna vrijednost koncentracije 0. Izmjena mora kroz otvorene granice uzrokuje smanjenje koncentracija u akvatoriju marine kroz mehanizam disperzije, a brzina pada srednje vrijednosti koncentracije u akvatoriju marine kvantificira učinak propusta u ovisnosti o njegovoj poziciji i geometriji.

Za numeričko modeliranje valne dinamike korišten je model Mike 21ems, zasnovan na metodi konačnih diferencija kojom se rješava valna jednadžba blagog nagiba (Berkhoff, 1972.; Doss i Miller, 1979.; Booij, 1983.; Madsen i Larsen, 1987.). Modelom su obuhvaćeni utjecaji efekta dubine, refrakcije, difrakcije, refleksije, loma valova i hrapavosti dna. Jednadžbe procesa s dodatnim objašnjenjima prikazane su u radu Lončar et al. (2012.). Modelska prostorna domena hipotetske marine (slika 1) u horizontalnom smjeru diskretizirana je strukturiranom proračunskom mrežom s korakom od 1 m u x i y smjeru (slika 2).

Na liniji valnog generiranja (slika 5) definirane su 3 valne visine i periodi monokromatskog vala ($H_1 = 0.6 \text{ m}$, $T_1 = 3,1 \text{ s}$; $H_2 = 1.0 \text{ m}$, $T_2 = 4.0 \text{ s}$; $H_3 = 1.5 \text{ m}$, $T_3 = 4,9 \text{ s}$) kojima je obuhvaćen raspon tipičnih valnih situacija koje se pojavljuju u kanalskom sustavu istočnog Jadrana pri vjetrovima brzine od 3 – 5 bf. Za koeficijent refleksije vanjskog ruba lukobrana usvojena je vrijednost $K_r = 0.3$, dok je za unutarnji rub korišten koeficijent refleksije $K_r = 0.9$. Željeni stupanj refleksije u modelu se ostvaruje primjenom refleksijsko – disipativnih slojeva (eng: *porosity layers*) s odgovarajućim baždarnim numeričkim koeficijentima. Sprječavanje refleksije valova od krutih granica numeričkog modela koje nisu prisutne u „stvarnosti“ ostvareno je primjenom disipativnih slojeva (eng: *sponge layers*) prikazanih na slici 5.

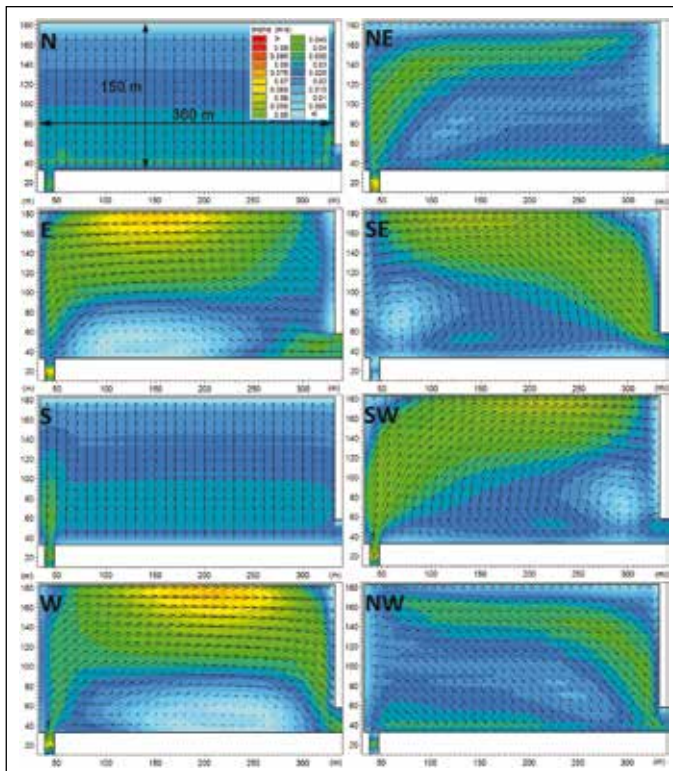


Slika 5: Disipativni slojevi (eng: *sponge layers*) za onemogućavanje refleksije od rubova modelske domene i pozicije linija generiranja monokromatskih valova s pripadnim valnim visinama i periodima (lijevo - propust na poziciji 1; desno - propust na poziciji 3)

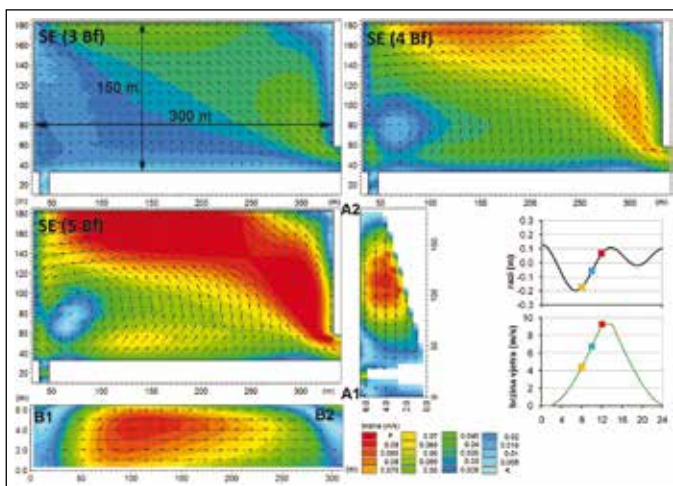
3. REZULTATI I RASPRAVA

Na slici 6 prikazana su usrednjena površinska polja strujanja za prvih 12 sati simulacijskog razdoblja u kojima se povećava brzina vjetra od 0 do 5 Bf (vidi sliku 3). Prikaz je dan za kanalski propust na poziciji 2 i kotom dna propusta na -1m. Na slici 7 prikazana su satno usrednjena površinska polja strujanja za vrijeme

djelovanja vjetra SE smjera s brzinama 3, 4 i 5 Bf, te satno usrednjena polja strujanja u vertikalnim profilima A-A i B-B (vidi sliku 1) za vrijeme djelovanja vjetra SE smjera s brzinom 5 Bf.



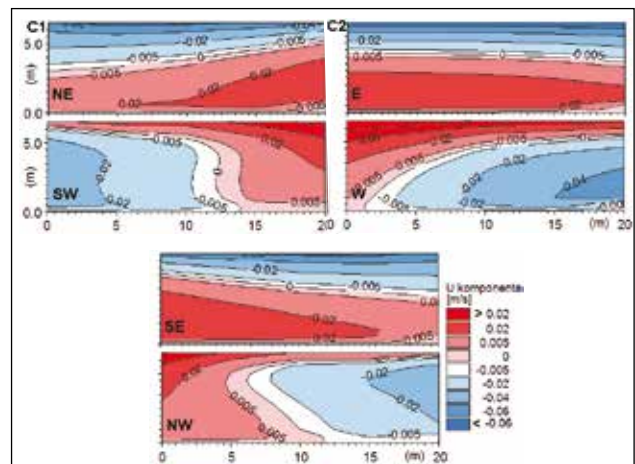
Slika 6: Usrednjena površinska polja strujanja za prvih 12 sati simulacijskog razdoblja u kojima se povećava brzina vjetra od 0 do 5 Bf (kanalski propust na poziciji 2, kota dna propusta na -1 m)



Slika 7: Satno usrednjena površinska polja strujanja za vrijeme djelovanja vjetra SE smjera s brzinama 3, 4, 5 Bf (8., 10. i 12. sat simulacije) i satno usrednjena polja strujanja u vertikalnim profilima A1-A2 i B1-B2 (vidi sliku 1) za vrijeme djelovanja vjetra SE smjera s brzinom 5 Bf (kanalski propust na poziciji 2, kota dna propusta na -1 m)

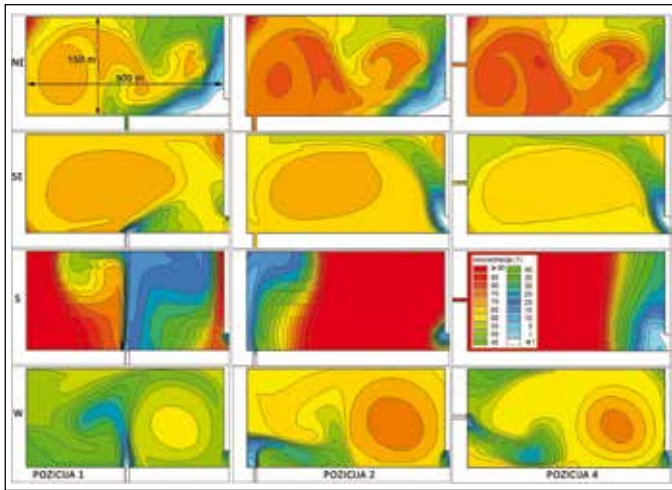
Sa slike 7 prepoznaje se strujanje „izlaznog“ i „ulaznog“ smjera u profilu ulaza (vertikalna kompenzacija). Pri djelovanju vjetra iz N, NE, E i SE smjerova more ulazi u akvatorij marine u površinskom sloju, dok je u situacijama djelovanja vjetra S, SW, W i NW smjera situacija obrnuta (slika 8). Površinski sloj

ulazne struje je manje debljine od intermedijalnog i pridnenog kompenzacijskog sloja, pa se shodno tome u površinskom sloju pojavljuju i veće brzine strujanja (slike 7 i 8). Debljina pojedinog sloja ovisi i o smjeru i o intenzitetu vjetra. Smjer površinskih struja, posebice maksimalnih, prati smjer djelovanja vjetra (slike 6 i 7), dok se u potpovršinskom sloju razvija strujanje suprotnog smjera. Odnos maksimalnih brzina strujanja u površinskom sloju i brzine vjetra može se izraziti koeficijentom proporcionalnosti $V_{MAX\ STRUJJA} / V_{VJETRA}$ koji poprima vrijednosti 0.01 (1%) za vjetrove SE, E, SW i W smjera, te 0.005 (0.5%) za vjetrove NE i NW smjera. Pri povećanju brzine vjetra iz SE smjera jača i generirani vrtlog u blizini propusta na poziciji 2 (slika 7), a čime se umanjuje intenzitet cirkulacije mora kroz kanalski propust. S druge strane, povećanje brzine vjetra SE smjera stimulira izmjenu mora u profilu ulaza u marinu (slika 7). Suprotna situacija pojavljuje se pri djelovanju vjetra SW smjera, kada se vrtlog razvija u blizini ulaza u marinu (slika 6). Pri tome se smanjuje izmjena mora u profilu ulaza, te se istovremeno pojačava unos vanjskog mora kroz propust (slika 6). Stoga se doprinos pojedine varijante propusta u izmjeni mora ne treba sagledavati samo kroz ostvareni protok u profilu propusta, već se treba osloniti na integralni parametar kojim se obuhvaća međudjelovanje propusta i ulaza, te kompletnog 3D polja strujanja. Upravo takav parametar je srednja koncentracija traserske otopine, odnosno praćenje brzine promjene te koncentracije tijekom simulacijskog razdoblja. Na slici 9 prikazana su polja vertikalno usrednjenih koncentracija traserske otopine na kraju simulacijskog razdoblja od 24 sata za nekoliko pozicija propusta i smjera djelovanja vjetra.

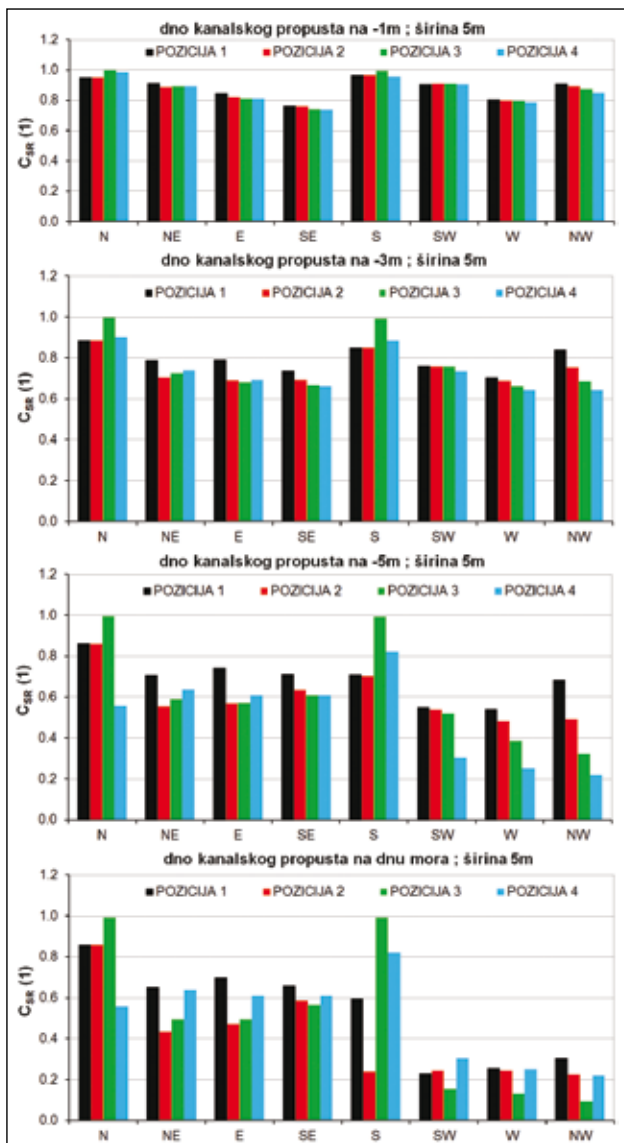


Slika 8: Polja U komponente brzine strujanja u vertikalnom profilu kroz ulaz u marinu (profil C1-C2, slika 1) pri djelovanju vjetra NE, E, SE, SW, W i NW smjera u terminu pojave maksimalnih brzina vjetra (12. sat simulacije, slika 7). Pozitivne vrijednosti odnose se na „izlazno“ strujanje

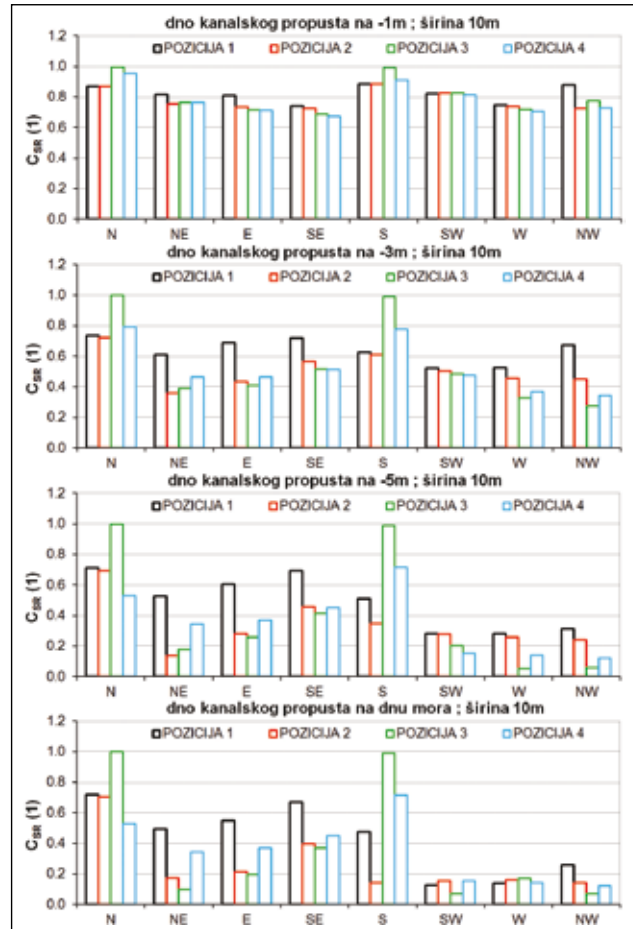
Na slikama 10 i 11 prikazana je usporedba srednjih vrijednosti koncentracije traserske otopine za cjelokupni štićeni akvatorij marine na kraju simulacijskog razdoblja (normirano s maksimalnom – „najlošijom“ vrijednosti iz svih analiziranih varijanti).



Slika 9: Polja vertikalno usrednjenih koncentracija traserske otopine na kraju simulacijskog razdoblja od 24 sata za pozicije propusta 1, 2 i 4 (od lijevo prema desno) te smjerove vjetra NE, SE, S i W (od gore prema dolje). Dno propusta je na dubini -3 m, a širina propusta 10 m.



Slika 10: Srednje vrijednosti koncentracije traserske otopine za cjelokupni štitići akvatorij marine na kraju simulacijskog razdoblja (normirano s maksimalnom – „najlošijom“ vrijednosti iz svih analiziranih varijanti). Širina propusta je 5 m.

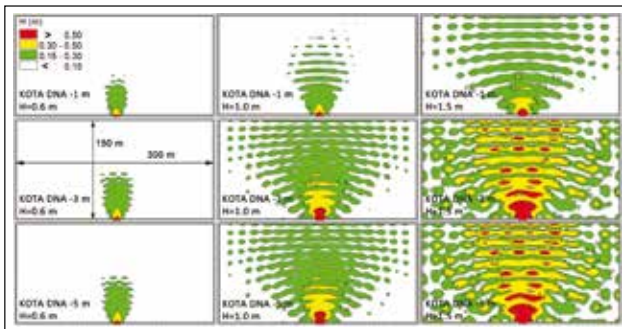


Slika 11: Srednje vrijednosti koncentracije traserske otopine za cjelokupni štitići akvatorij marine na kraju simulacijskog razdoblja (normirano s maksimalnom – „najlošijom“ vrijednosti iz svih analiziranih varijanti). Širina propusta je 10 m.

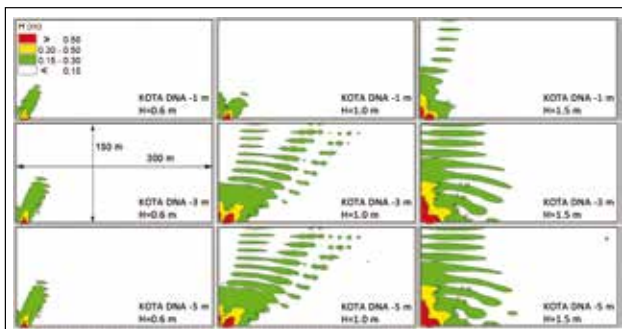
Promjena kote dna propusta sa -1 m na -3 m rezultira smanjenjem srednje koncentracije od 13% (prosječno za sve pozicije propusta, smjerove djelovanja vjetra i širine propusta). Smanjenje srednje koncentracije uslijed promjene kote dna propusta sa -3 m na -5 m još je izraženije, te iznosi prosječno 20% za sve pozicije propusta i smjerove djelovanja vjetra. Izbor pozicije 2 ili 4 čini se „optimalan“, obzirom da su srednje koncentracije nakon 24 sata simulacijskog razdoblja 10% manje nego u slučaju primjene propusta na poziciji 1, odnosno 5% manje nego u slučaju primjene propusta na poziciji 3 (prosječno za sve kote dna i širine propusta te smjerove djelovanja vjetra). Ukoliko se promatraju samo situacije vezane uz kotu dna propusta na -1 m, prethodno navedena smanjenja srednje koncentracije (10% i 5%) su znatno umanjena, te iznose 2% i 1%. Ovi rezultati ukazuju na činjenicu da izbor dubine kanalskog propusta (kote dna) značajnije utječe na intenzitet izmjene mora od izbora pozicije propusta. Povećanje širine propusta sa 5 m na 10 m rezultira smanjenjem srednje koncentracija za 20% (pozicija 1), 32% (pozicija 2), 31% (pozicija 3) i 27% (pozicija 4), prosječno za sve kote dna propusta i smjerove djelovanja vjetra. Prema tome, proširenje propusta ima najveći učinak (svrhu) ukoliko se propust izvede na poziciji 2 ili 3.

Na slikama 12, 13 i 14 prikazana su polja valnih visina za propuste na pozicijama 1 i 2, za širine propusta 5 m i 10 m, uz varijaciju kote dna propusta (-1 m, -3 m i -5 m) i valnih parametara ($H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m). Izbor boja u grafičkoj interpretaciji je usvojen na način da se ukaže na dio akvatorija marine u kojem je zadovoljen kriterij HRB-a za povratno razdoblje od 2 godine ($H < 0.15$ m), 5 godina ($H < 0.3$ m) i 50 godina ($H < 0.5$ m).

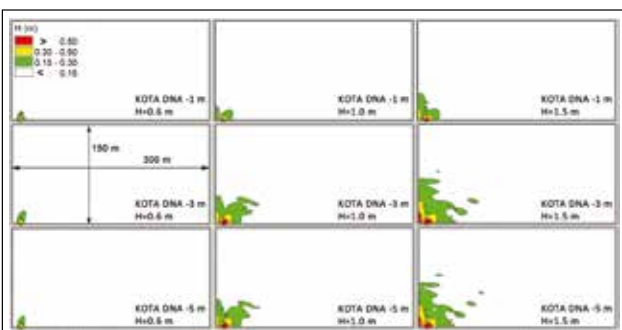
Potrebno je napomenuti da su rezultati modela valne dinamike (slike 12, 13 i 14) dobiveni za slučaj izoliranog utjecaja propusta na dinamiku valova u marini, bez interakcije s valovima koji penetriraju u štitično područje marine kroz ulaz u marinu. Kako bi se kvantificirao doprinos ulaza na dinamiku valova u samoj marini, provedene su i analize s proširenom domenom modela (slika 15) koja omogućuje valnu agitaciju kroz ulaz u marinu. Analizama je obuhvaćen slučaj propusta širine 5 m na poziciji 1 i dnom propusta na dubini -1 m. U tom slučaju utjecaj ulaza na valnu dinamiku unutar marine je najintenzivniji u relativnom smislu. Proračunata polja valnih visina prikazana su na slici 16.



Slika 12: Polja valnih visina za propust širine 10 m na poziciji 1 uz varijaciju kote dna propusta (gore prema dole: -1 m, -3 m i -5 m) i valnih parametara (lijevo prema desno: $H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m)



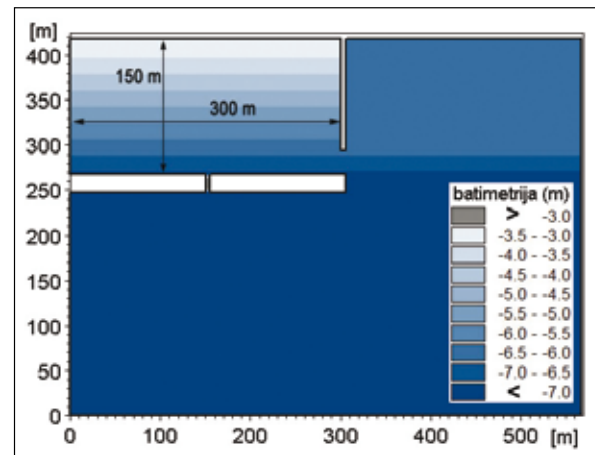
Slika 13: Polja valnih visina za propust širine 10 m na poziciji 2 uz varijaciju kote dna propusta (gore prema dole: -1 m, -3 m i -5 m) i valnih parametara (lijevo prema desno: $H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m)



Slika 14: Polja valnih visina za propust širine 5 m na poziciji 2 uz varijaciju kote dna propusta (gore prema dole: -1 m, -3 m i -5 m) i valnih parametara (lijevo prema desno: $H = 0.6$ m, 1.0 m i 1.5 m)

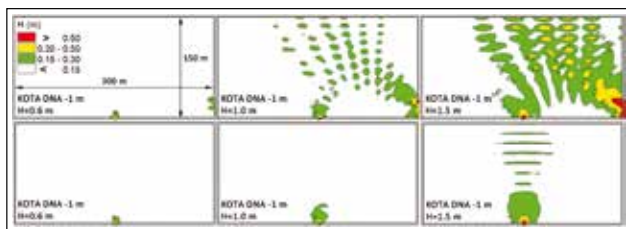
Na slikama 12, 13 i 14 može se uočiti da produbljenje kote dna propusta uzrokuje povećanje valnih visina u štitičnom akvatoriju marine, kao posljedica pojačane transmisije valne energije kroz profil propusta, odnosno smanjenja refleksije i disipacije valne energije uslijed loma valova. Interesantno je uočiti da povećanje dubine dna kanala s -1 m na -3 m ima puno veće značenje za valnu dinamiku akvatorija marine od daljnjeg produbljenja do -5 m. Nadalje, valna pobuda je bitno manja u slučaju primjene propusta sa širinom 5 m u odnosu na primjenu propusta širine 10 m (slike 13 i 14). Propusti na pozicijama 1 i 4 omogućuju simetrično širenje valne energije nakon prolaska vala kroz propust u akvatorij marine. Zbog toga izvedba propusta na poziciji 2 ili 3 rezultira manjom površinom akvatorija s pojačanim valovanjem (slike 12 i 13). Slijedom navedenog može se zaključiti da kanalski propust na poziciji 2 ili 3, dubine 1 m (kota dna kanala na -1 m) i širine 5 m, osigurava lokalizaciju valne pobude u prihvatljivo malom dijelu akvatorija marine, u kojem treba predvidjeti sidrenje samo većih plovila. Kako bi se kvantificirali izneseni navodi, vezani uz proračunata valna polja, dodatno su uvedeni pojmovi ukupne korisne površine marine ($A_M = 300$ m 150 m) i površina koje su pokrivene s valnim visinama < 0.15 m (A_{PP-2}), < 0.3 m (A_{PP-5}) i < 0.5 m (A_{PP-50}).

Dobiveni rezultati pokazuju da pozicija 2 predstavlja najpovoljniju varijantu obzirom na 2-godišnji ($H < 0.15$ m), 5-godišnji ($H < 0.3$ m) i 50-godišnji ($H < 0.5$ m) kriterij dopuštenih valnih visina u štitičnom akvatoriju marine. U tom su slučaju vrijednosti A_{PP-2}/A_M , A_{PP-5}/A_M i A_{PP-50}/A_M manje za prosječno 20%, 10% i 17% nego u slučaju izvedbe propusta na pozicijama 1, 3 i 4.



Slika 15: Proširena prostorna modelska domena na batimetrijskoj podlozi (propust na poziciji 1, dno propusta na -1 m) za analizu utjecaja ulaza na valnu agitaciju akvatorija marine

Sa slikom 16 se može uočiti da pri valnim visinama $H = 0.6$ m ulaz u marinu ima minorni doprinos u valnoj dinamici unutar štitičnog akvatorija. S druge strane, pri valnim visinama $H = 1.5$ m doprinos ulaza je izraženiji, te rezultira povećanjem površine s prekoračenjem valnih visina od 0.15, 0.3 i 0.5 m za 5, 20 i 7 puta (redosljedno) u odnosu na situaciju bez utjecaja ulaza u marinu.



Slika 16: Usporedba polja valnih visina za slučaj sa (gore) i bez utjecaja ulaza u marinu (dolje) te proširena domena numeričkog modela za provedbu analiza sa utjecajem ulaza (propust širine 5 m na poziciji 1, kota dna propusta na -1 m, ulaz u marinu širine 25 m)

Obzirom na veliki broj mogućih pozicija ulaza u marinu i širine sekundarnih lukobrana, u nastavku se komentiraju samo situacije valovanja bez utjecaja ulaza u marinu.

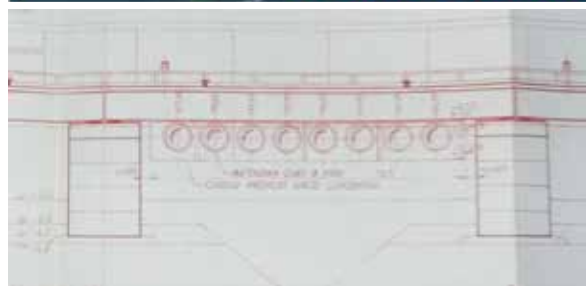
Ukoliko se prikazani rezultati žele primijeniti na realnu marinu (primjer Marine Zadar i Marine Ičići, slika 1), potrebno je raspolagati s podacima tipično prezentiranim u sklopu elaborata vjetrovalne klime za predmetnu lokaciju (tablice kontingencije za vjetar i valne visina/periode po incidentnim smjerovima i povratnim razdobljima). Uvidom u podatke o prognoziranom spektrima dubokovodnih valova ispred Marine Ičići, za povratna razdoblja 2, 5 i 50 godina (tablica 1, Hydroexpert, 2012.), može se konstatirati da izvedba kanalskog propusta analiziranih geometrija (širina 5 m ili 10 m, dubina 1 m, 3 m ili 5 m) ne predstavlja prihvatljivo rješenje niti na jednoj poziciji, te da se poboljšanje izmjene mora treba predvidjeti cijevnim propustima. Razlog tomu su velike valne visine koje se pojavljuju s incidentnim smjerovima SW i SE. Potrebno je napomenuti da je u glavnom lukobranu i izveden cijevni propust sačinjen od 8 kružnih cijevi promjera 1 m (slika 17). Prema anketi na terenu, transmisija valne energije kroz te cijevne propuste nije do sada uzrokovala ugrožavanje sidrenih plovila.

Tablica 1: Spektralna obilježja dubokovodnih valova (H_s – značajne valne visine, T_p – vršni periodi) za lokacije Marine Ičići (Hydroexpert, 2012.) i Zadar (Hydroexpert, 2005.).

PR (god.)	Ičići		Zadar	
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)
50	3.2	5.6	1.0	3.0
5	2.8	5.3	0.9	2.8
2	2.5	5.0	0.8	2.6

Prognozirani spektri dubokovodnih valova ispred Marine Zadar imaju obilježja prezentirana u tablici 1 (Hydroexpert, 2005.). Ruža vjetra za Zadar u ljetnoj sezoni ukazuje na najveću učestalost SE i NW smjera vjetra s brzinama u rasponu 1 Bf - 5 Bf (Kraljev i Gajić-Čapka, 1995.). Smjerovi vjetra SE i NW u rotiranom X-Y koordinatnom sustavu hipotetskog modela odgovaraju analiziranim situacijama s djelovanjem vjetra iz smjerova E i W. Nadalje, sam smještaj Marine isključuje mogućnost fizičke izvedbe propusta na pozicijama 3 i 4 (slika 1). Temeljem prethodno prikazanih rezultata numeričkih simulacija (slike 10 i 14), projektantu bi se sugerirala izvedba kanalskog propusta na poziciji 2, sa širinom 5 m i

dnom propusta u razini morskog dna. Također se napominje da je u glavnom lukobranu Marine Zadar izveden kanalski propust u širini 5 m, te do dubine 1 m (slika 18).



Slika 17: Presjek i pogled na poziciju cijevnih propusta izvedenih u glavnom lukobranu Marine Ičići na poziciji 2 (Građevinski fakultet, 1989.)



Slika 18: Pozicija i pogled na kanalski propust u Marini Zadar (pozicija 2)

4. ZAKLJUČAK

Provedeno je numeričko istraživanje izmjene vode kroz kanalske propuste marina te valne dinamike akvatorija marine. U okviru numeričkog modela cirkulacije i izmjene mora obuhvaćen je utjecaj smjera i brzine vjetrova, plimnih oscilacija, pozicije kanalskih propusta, te kote dna i širine kanalskog propusta na izmjenu mora između akvatorija marine i otvorenog mora. Utjecaj prostornog i vremenskog varijabiliteta temperature i saliniteta mora nije uzet u obzir, pa su zbog usvajanja homogenog vodnog stupca gustoće 1027 kg/m^3 ($\sigma_t = 27 \text{ kg/m}^3$) rezultati ove analize primjereniji za zimsko razdoblje. Transmisija energije vjetrovnih valova i posljedična valna dinamika u zoni štice akvatorija marine analizirana je zasebnim modelom valnih deformacija. Primijenjena valna obilježja (valne visine i periodi) ispred lukobranske konstrukcije nalaze se u rasponu okolišnih uvjeta karakterističnih za kanalski sustav istočnog dijela Jadrana.

Pri analizi valne dinamike istraživanje je fokusirano na izolirani utjecaj propusta na dinamiku valova u marini, bez interakcije s valovima kroz ulaz u marinu. Doprinos ulaza na dinamiku valova u akvatoriju marine analiziran je samo za slučaj propusta širine 5 m na poziciji 1 i dnom propusta na dubini -1 m, kada je utjecaj ulaza na valnu dinamiku naspram utjecaja propusta najizraženiji. Pri valnim visinama $H > 1 \text{ m}$ doprinos ulaza u valnoj dinamici štice akvatorija postaje značajan te rezultira višestrukim uvećanjem površine na kojoj je premašen kriterij funkcionalnosti postavljen od strane HRB-a.

Dobiveni i prikazani rezultati mogu poslužiti kao smjernica u izboru pozicije i geometrije kanalskog propusta pri postavljenom uvjetu dopuštene valne dinamike. Marina Zadar je predstavljena kao primjer dobre inženjerske prakse u primjeni kanalskih propusta za stimulaciju izmjene vode.

Vjetar ima primarni utjecaj na prostornu raspodjelu strujanja u akvatoriju marine i izmjenu vode kroz kanalske propuste. Rezultati modela cirkulacije i izmjene vode pokazali su da se maksimalni učinak kanalskih propusta ostvaruje njihovom izvedbom na pozicijama 2 ili 4. Uzimajući u obzir i valnu dinamiku kao parametar u donošenju odluke o „optimalnoj“ poziciji kanalskog propusta, pozicija 2 se pokazala kao najprimjerenija. Povećanje širine kanalskog propusta ostvaruje maksimalni učinak u slučaju izvedbe propusta na poziciji 2 ili 3. Sama pozicija propusta pokazala se manje bitnom za intenzitet izmjene vode od izbora kote dna ili širine kanalskog propusta.

Produbljenje kanala sa -1 m na -3 m rezultira izraženim porastom valnih visina u štice akvatoriju marine, a izvedba propusta na poziciji 2 ili 3 rezultira manjom površinom akvatorija s pojačanim valovanjem nego izvedba propusta na pozicijama 1 ili 4.

Zaključno, u uvjetima umjerene valne klime s valnim visinama do 1 m predlaže se primjena kanalskog propusta u širini 5 m do dubine 1 m. ■

LITERATURA

- Babić, A.; Andročec, V.; Lončar, G.; Carević, D. (2016.): The impact of the culverts on sea water exchange in the marinas, Annual 2015 of the Croatian Academy of Engineering, 20, str. 27-39.
- Balas, L.; Inan, A. (2010.): Modelling of Induced Circulation, *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 5 (3), str. 132-143.
- Berkhoff, J.C.W. (1972.): *Computation of combined refraction-diffraction*, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vancouver 1972, ASCE, New York, Vol. 1, Chap. 24, 471-490.
- Booij, N. (1983.): A note on the accuracy of mild-slope equation, *Coastal Engineering*, 7, 191-203.
- Carević, D.; Lončar, G.; Kuspilić, N. (2014.): Tehničko ekonomski parametri marina u Hrvatskoj, *Građevinar*, 66 (10), str. 909-915.
- Doss, S.; Miller, K. (1979.): Dynamic ADI methods for elliptic equations, *Journal on Numerical Analysis*, 16 (5), 837-856.
- Cucco, A.; Umgieser, G., (2006.): Modeling the Venice lagoon residence time, *Ecological modelling*, 194, 34-51.
- Falconer, R.A.; Gouping, Y. (1991.): Effects on depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory model harbor, *Proc. Institution civil engineers, Part 2 research & theory*, 91, str. 561-576.
- Fischer, H.B.; List, E.J.; Koh, R.C.Y.; Imberger, J.; Brooks, N.H. (1979.) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, London, 483 str.
- Fountoulis, G.; Memos, C. (2005.): Optimization of openings for water renewal in a harbor basin, *Journal of Marine Environmental Engineering*, 7 (4), str. 297-306.
- Hydroexpert (2005.): *Studija vjetrovne i valne klime ispred Luke Zadar – Gaženica*, Zagreb, 25 str.
- Hydroexpert (2012.): *Analiza hidrodinamike mora za Luku Opatija – vjetrovalna klima*, Zagreb, 27 str.
- Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (1989.): *Izmjena i dopuna projekta za izvođenje pomorskih konstrukcija*, Nautičko turistički centar Ičići – marina (2320-30/2A).
- Janeković, I.; Kuzmić, M. (2005.): Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.*, 23, 3207-3218.
- Kraljević, D.; Gajić-Čapka, M. (1995.): *U okrilju sunca i mora – klimatološka monografija Zadra*, Zadiz, Zadar, 67 str.
- Lončar, G.; Andričević, R.; Petrov, V. (2007.): Numerički modeli zajedničkog rada podzemskih ispusta otpadnih voda, *Građevinar*, 59 (11), str. 955-965.
- Lončar, G.; Leder, N.; Paladin, M. (2012.): Periodi vlastitih oscilacija u akvatorijima Bakra, Malog Lošinja, Ista, Starog Grada i Vela Luke, *Hrvatske vode*, 20 (82), str. 201-210.

- Madsen, P.A.; Larsen, J. (1987.): An Efficient Finite-Difference Approach to the Mild-Slope Equation, *Coastal Engineering*, 11, 329-351.
- Nece, R.A. (1984.): Planform effects on tidal flushing of marinas, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110 (2), str. 251-269.
- Oakey, N. S.; Elliott, J. A. (1982.): Dissipation Within The Surface Mixed Layer, *J. Phys. Oceanography*, 12, str. 171-185.
- Ozhan, E.; Tore, E. (1992.): *Studies for improving flushing ability of Marmaris marina*, Publ. by Comp. Mech. Publ, Southampton, 267 str.
- Rodi, W. (1987.): Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *Journal of Geophysical Research*, 92(C5), str. 5305-5328.
- Schwartz, R.A. (1989.): Flushing behavior of a coastal marina, *21rd Coastal Engineering Conference*, Malaga, Spain, str. 2626-2640.
- Smagorinsky, J. (1993.): *Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities*, In: Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows, B. Galperin and S. Orszag (eds.), Cambridge University Press, str. 1-34.
- Stagonas, D.; Gerald, M.; Magagna, D.; Warbrick, D. (2009.): Fundamental investigation of water flow in harbors through a flushing culvert, 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Van Cuver, Canada, str. 7257 – 7265.
- Stamou A I.; Kapetanaki M.; Christodoulou G.; Rajar R.; Cetina M. (2001.): Mathematical Modeling of Flow and Pollution in Marinas, *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Environmental Science and Technology*, Syros, Greece, str. 830-837.
- Stamou, A.I.; Katsiris, I.K.; Moutzouris, C.I.; Tsoukala, V.K. (2004.): Improvement of marina design technology using hydrodynamic models, *Global Nest journal*, 6 (1), str. 63-72.
- Tsoukala V.K.; Katsardi, V.; Belibassakis, K.A. (2014.): Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures, *Ocean Engineering*, 89, str. 211-229.
- Tsoukala, V.K.; Moutzouris, C.I. (2003.): Field measurements of marina flushing and dissolved oxygen penetration in a harbor basin through water entrance channels, *3rd Panhellenic Conference of Harbor Works*, Athens, Greece, str. 607-619.
- Tsoukala, V.K.; Moutzouris, C.I. (2005.): Field measurements of dissolved oxygen in the Piraeus Harbor basin, *Journal of Marine Environmental Engineering*, 7 (4), str. 307-316.
- Tsoukala, V.K.; Moutzouris, C.I. (2009.): Wave transmission in harbors through flushing culverts, *Ocean Engineering*, 36, str. 434-445.
- Tsoukala, V.K.; Gaitanis, C.K.; Stamou, A.I.; Moutzouris, C.I. (2010.): Wave and dissolved oxygen transmission analysis in harbors using flushing culverts: an experimental approach, *Global nest journal*, 12 (2): str. 152-160.
- US Army Corps of Engineers (2002.): *Coastal Engineering Manual (CEM)*, EM 1110-2-1100.
- Weston Solutions, Inc. (2013.): *Shelter Island Yacht Basin Tidal Flushing Modeling and Engineering Feasibility Study*, Port of San Diego 3165 Pacific Highway San Diego, California, 29 str.
- Wu, J. (1994.): The sea surface is aerodynamically rough even under light winds, *Boundary layer Meteorology*, 69, str. 149-158.

The impact of culverts on the seawater exchange and wave action in marina waters

Abstract. The paper presents the results of the conducted numerical simulations of circulation and wave dynamics in the marine waters whose main pier contains a constructed culvert in four variant positions. A hypothetical marina with a length of 300 m, width of 150 m, entrance width of 25 m and variable depths from 3 to 7 m was analysed. The culvert positions (4) and widths (5m and 10m) in the pier were varied as well as the seabed elevations (-1 m, -2 m, -3 m, -5 m, marina seabed) of the marina. The model of seawater circulation and exchange was forced by wind action (of N, NE, E, SE, S, SW, W, NW directions) with a hypothetical distribution of velocities (linear increase from 0 to 5 Bf and linear decrease from 5 Bf to 0) and tidal oscillations during the 24-hour simulation period. The transmission of wind wave energy through the culvert was analysed for the wave heights $H = 0.6$ m, 1.0 m and 1.5 m and associated wave periods $T = 3.1$ s, 4.0 s and 4.9 before the pier. The presented results facilitate such selection of the position and geometry of the culvert as to achieve the maximal seawater exchange with the set condition of the permitted wave disturbance. The practical application of the obtained results was presented on the example of the Zadar marina.

Key words: culvert, marina, Adriatic Sea, numerical model

Einfluss der Kanalablässe auf Meereswechsel und Wellenausbreitung in Marina-Seegebieten

Zusammenfassung. Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Simulationen der Zirkulation und Wellendynamik des Seegebietes einer Marina werden dargestellt, in deren Hauptmole Kanalablass gebaut worden ist. Eine hypothetische 300 m lange, 150 m breite und 3 bis 7 m tiefe Marina mit dem 25 m breiten Eingang wurde analysiert. Die Variationen schließen vier Standorte des Kanalablasses ein sowie verschiedene Breiten des Kanalablasses (5 m bzw. 10 m) und verschiedene Höhepunkte des Meeresbodens (-1 m, -2 m, -3 m, -5 m, Meeresboden). Im Modell der Meereszirkulation und -wechsels wurde ein Windfeldantrieb (Richtungen N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) verwendet mit einer hypothetischen Verteilung von Geschwindigkeiten (lineare Zunahme von 0 bis 5 Bft und linearer Abstieg von 5 Bft bis 0) und Gezeitenoszillationen im Laufe des Simulationszeitraums von 24 Stunden. Die Übertragung von Windwellenenergie durch den Kanalablass wurde für die Wellenhöhen $H = 0.6$ m, 1.0 m und 1.5 m und für die entsprechenden Zeiträumen $T = 3,1$ s, 4.0 s und 4.9 s vor der Mole analysiert. Die dargestellten Ergebnisse erleichtern die Wahl des Standortes und der Geometrie des Kanalablasses, mit denen ein maximaler Meereswechsel unter der Bedingung der erlaubten Wellenanregung erzielt werden kann. In Anlehnung an das Beispiel der Marina Zadar ist die praktische Anwendung der ermittelten Ergebnisse dargestellt worden.

Schlüsselwörter: Kanalabfluss, Adria, numerisches Modell