

# ANALIZA UTJECAJA VJETRA, PLIMNIH OSCILACIJA I RAZDIOBE GUSTOĆE NA IZMJENU MORA KROZ PROPUSTE U MARINAMA: PRIMJER MARINE IČIĆI

**prof. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet  
Kačićeva 26, Zagreb  
gloncar@grad.hr

**doc. dr. sc. Dalibor Carević, dipl. ing. građ.**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet  
Kačićeva 26, Zagreb

**Damjan Bujak, mag. ing. aedif.**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet  
Kačićeva 26, Zagreb

**Ivana Bartolić, mag. ing. aedif.**

Tehničko veleučilište Zagreb, Graditeljski odjel  
Avenija Većeslava Holjevca 15, Zagreb

**dr. sc. Gordana Beg Paklar**

Institut za oceanografiju i ribarstvo  
Šetalište I. Meštrovića 63, Split

Prikazani su rezultati provedenih 3D numeričkih simulacija cirkulacije i izmjene mora s ciljem kvantifikacije doprinosa cijevnih propusta u izmjeni mora iz akvatorija marine s morem iz okolnog područja. Osim djelovanja vjetra i plimnih oscilacija u numeričkom modelu uvažena je i prostorno/vremenska promjenjivost temperature i saliniteta u profilima otvorenih granica modela, propusta i ulaza u marinu. Prvotno je analizirana marina hipotetskih geometrijskih obilježja: duljina 300m, širina 150m, varijabilne dubine od 3 do 7m. Varirana je širina ulaza u marinu (25m i 50m), pozicije cijevnih propusta (4 pozicije), smjer i brzina vjetra (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW ; 1, 3, 5 Bf), geografska lokacija (sjeverni jadransko – Rovinj ; južni jadransko – Dubrovnik), doprinos gradijenta gustoće mora. Nastavno su provedene numeričke simulacije za marinu Ičići, uzimajući u obzir stvarnu geometriju zaštitnih građevina (lukobrana), realistične oceanografske uvjete (dubine, dinamika morskih razi, temperatura i salinitet mora) i djelovanje vjetra. Temeljem dobivenih rezultata predložena je i praktična metodologija za izbor pozicije cijevnih propusta u tijelu zaštitne građevine marine.

**Ključne riječi:** cijevni propust, marina, Jadran, numerički model

## 1. UVOD

Nautički turizam je sa zakonskog aspekta definiran kao plovidba i boravak turista na plovnim objektima, kao i boravak u lukama nautičkog turizma radi odmora i rekreacije. Hrvatska je zbog svoje razvedenosti obale i velikog broja otoka izuzetno pogodna za razvoj ove turističke oblasti. Uslijed velikog broja otoka, hrvatska obala je zaštićena od velikih valova otvorenog mora što omogućuje gradnju luka manjih dimenzija. Razvoj nautičkog turizma zahtijeva osiguranje sljedećih dužobalnih usluga: zaštita plovila od nevremena, odmorište i usluge pri čemu je primarna uloga marina, lučica i luka zaštita plovila od nepoželjnog djelovanja mora uzrokovanog valovanjem. Funkcionalnost marine/lučice/luke u širem

kontekstu ostvaruje se izvedbom pomorskih gradnji (zaštitne građevine) kojima se smanjuje intenzitet valovanja u štitićenom akvatoriju.

Prvenstveni kriterij koji se razmatra pri odabiru lokacije za buduću marinu je prirodni stupanj zaštićenosti lokacije i dubina mora. S obzirom da najveći udio u cijeni marine ima lukobran, cilj je smanjiti njegovu veličinu u najvećoj mjeri odabirom djelomično ili potpuno zaštićene lokacije. S druge strane cijena lukobrana raste progresivno s dubinom mora pa je stoga ekonomično razmatrati lokacije s dubinom manjom od 10 m. Relativno blaga valna klima na hrvatskoj obali Jadranskog mora omogućuje gradnju lukobrana manjih dimenzija

(visine i širine) nego što je to slučaj na izloženim obalama Sredozemlja i otvorenih oceana. Među najčešće upotrebljivanim tipovima lukobrana u Hrvatskoj su nasipni lukobran, lukobran tipa zid, lukobran na pilotima s AB valnom pregradom, polupropusni gravitacijski lukobran sa AB valnom pregradom te pontonski lukobran.

Bez obzira na način izvedbe zaštitne građevine (pontoni, djelomično uronjeni valobran, lukobran, valolom itd.) željeno smanjenje intenziteta valovanja postiže se pregrađivanjem mora u profilu konačne duljine i dubine. Takvim zahvatom smanjuje se intenzitet strujanja u štichenom akvatoriju te dolazi do narušavanja prirodnih uvjeta okoliša. Kako bi se izbjegle ili umanjile nepoželjne posljedice građevnih zahvata na matičnu akvatičku biocenozu u sklopu „novijih“ projekata predviđa se primjerice izvedba lukobrana u formi konstrukcije na pilotima s djelomično uronjenim ekranima do odgovarajuće dubine (primjeri u Umagu i Dubrovniku – Gruž). Takva rješenja principijelno su prihvatljiva u uvjetima blage valne klime te velikih dubina na kojima je potrebno izvesti lukobrane. S druge strane, u Hrvatskoj je najveći broj marina, lučica i luka štichen nasipnim ili gravitacijskim lukobranima koji pregrađuju cijelu dubinu mora te na taj način fizički odvajaju akvatorij marine od okolnog mora te sprečavaju prirodnu cirkulaciju i izmjenu vode.

Marine imaju povećane zahtjeve na kvalitetu mora iz razloga što nautičari redovito borave na svojim plovilima u marinama. Prepoznavanje problema smanjene cirkulacije mora u zatvorenim akvatorijima rezultiralo je uvođenjem prakse projektiranja i izvođenja cijevnih propusta kroz tijela nasipnih i gravitacijskih lukobrana. Svrha izvođenja cijevnih propusta je omogućavanje izmjene mora između štichenog akvatorija i mora.

Cirkulacija vode između luke i okolnog mora je generalno rezultat prirodnih čimbenika kao što su morske mijene, strujanje uzrokovano vjetrom, gravitacijski vjetrovni valovi i razlike u gustoći vode (Fischer, 1979, Shwartz, 1988, Nece, 1984, Falconer, 1991). Ovisno o geografskoj lokaciji, jedan ili više ovih čimbenika mogu dominirati izmjenom vode u luci. Ako se dopusti da koncentracija zagađenja naraste iznad kritične razinenarušava se kvaliteta mora unutar luke. Takvo nepovoljno djelovanje na ekosustav marine može se izbjeći smanjenjem potencijalnih izvora onečišćenja ili/i održavanjem izmjene mora. Izmjena mora je uvjetovana konstrukcijskim parametrima kao što su tlo-crtna dispozicija luke, dimenzije ulaza u luku, dubina vode, nagib dna (Nece, 1984, Falconer, 1991, CEM, 2002). Izmjena vode u luci može biti poboljšana korištenjem cijevnih propusta (cijevi ili pravokutni otvori u tijelu lukobrana, promjer/dimenzija  $D \sim 1\text{m}$ ), što je najjeftinija metoda korištena u lučkom inženjerstvu. Uloga propusta je da omogućuje izmjenu lučke vode s vodom izvan luke. Funkcioniranje cijevnih propusta u lukama i marinama nije dovoljno istraženo. Primjena propusta je opravdana u područjima s malim amplitudama morskih mijena (kao što su Jadransko

i Egejsko more) gdje razlika između najviših i najnižih razina mora nije dovoljna za dobru izmjenu mora u lukama (Ozhan et al., 1992) ili u poluzatvorenim i zatvorenim zaljevima gdje je plimna cirkulacija slaba (Weston Solutions, 2013). Zbog ovih razloga, sva ozbiljna istraživanja povezana sa cijevnim propustima dolaze iz zemalja sa sličnim oceanografskim prilikama, iz Grčke i Turske u Egejskom moru (Stamou i sur., 2001., 2004., Tsoukala i sur. 2003., 2005., 2009., 2010, 2014., Fountoulis i sur., 2005., Stagonas i sur, 2009., Özhan i sur., 1992., Balas i sur., 2010.). Radovi Stamou i sur. (2004.), Fountoulis i sur. (2005.), Stagonas i sur. (2009.), Balas i sur. (2010.), Tsoukala i sur. (2010, 2014.) djelomično prikazuju osnove fizikalne procese u funkcioniranju cijevnih propusta te su koncentrirani samo na analizu učinkovitosti propusta u uvjetima strujanja generiranog direktnim djelovanjem vjetra te indirektno putem transmisije valne energije kroz cijevne propuste (djelovanjem gravitacionih vjetrovnih valova). Djelovanje plimnih oscilacija je izostavljeno kao nedovoljno učinkovito za procese izmjene vode.

## 2. GENERIČKI PRIMJER IZMJENE VODENE MASE U MARINI

### 2.1. Definiranje ispitnih varijanti propusta i domene toka

U ovom radu prikazani su rezultati provedenih numeričkih simulacija s ciljem kvantifikacije doprinosa cijevnih propusta u izmjeni mora u akvatorijima marina. Numeričke simulacije su provedene uz sljedeće promjene geometrije hipotetske marine (duljina marine 300m, širina 150m – karakteristične dimenzije za marine na hrvatskom jadranskom (Carević i sur., 2014) i okolišnih uvjeta (slika 1):

- 2 širine ulaza u luku (25m i 50 m);
- vjetar iz 8 smjerova (N, NE, E, SE, S, SW, W i NW);
- 3 jačine vjetra (1, 3 i 5 Bf);
- 4 pozicije propusta uzduž linije lukobrana;
- 2 geografske lokacije (sjeverni jadransko – Rovinj, južni jadransko – Dubrovnik);
- sa i bez utjecaja prostorne promjenjivosti temperature i saliniteta mora (uvjeti
- homogene i nehomogene gustoće mora).

Kao komparativni parametar za određivanje kvalitete pojedinog analiziranog rješenja s pripadnom pozicijom cijevnih propusta koristio se ukupni volumen mora koji je protekao kroz cijevne propuste tijekom simulacijskog razdoblja od 24 sata. Dobiveni rezultati poslužili su za prijedlog metodologije koja se može primijeniti pri izboru pozicije cijevnih propusta u sklopu izrade projektne dokumentacije. Primjena predložene metodologije verificirana je na primjeru marine Ičići.

Za provedbu numeričkih simulacija korišten je 3D numerički model Mike 3fm (www.dhigroup.com). Mo-

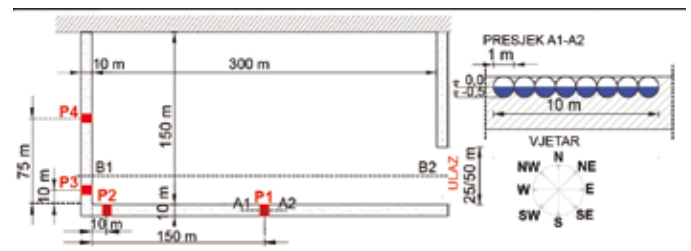
delska prostorna domena hipotetske marine (slika 1 i 2) u horizontalnom smjeru diskretizirana je nestrukturiranom diskretizacijskom mrežom s trokutnim konačnim volumenima (ćelijama) prosječne tlocrtnne površine 25m<sup>2</sup> (slika 2), dok je u vertikalnom smjeru korištena diskretizacija sa 7 sigma slojeva (Song i Haidvogel, 1994.). Dno ima konstantni nagib, od 3 do 7m dubine. Na svakom pojedinom položaju propusta (P1-P4) postavljena je serija od 8 kružnih cijevi promjera 1m i ukupne duljine 10m (slika 1). Donja kota cijevi propusta je položena na dubini 0.5 m od srednje razine mora koja ima vrijednost 0. Na kontaktu mora i vertikalne krute granice brzine su definirane s vrijednosti 0 okomito na krutu granicu.

## 2.2. Definiranje rubnih i početnih uvjeta

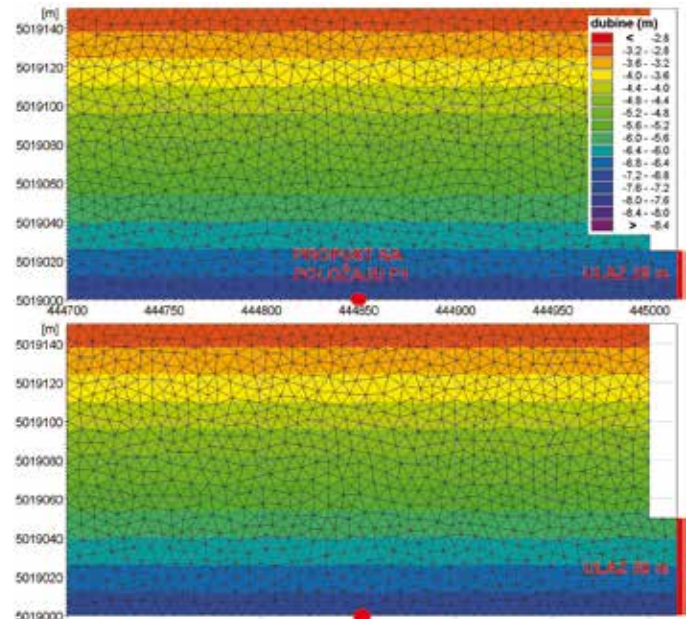
Morske razi su varijabilne tijekom provedenih simulacija a vremenski nizovi morskih razi dobiveni su temeljem realnih podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih konstituenata plimnog signala za lokacije Rovinj, Bakar (Ičići) i Dubrovnik (Janeković i Kuzmić, 2005., tablica 1, slika 3). Osim toga, u profilima otvorenih granica numeričkog modela (propust, ulaz) korištena su i realna polja temperature i saliniteta mora dobivena mjerenjem s CTD sondom na obližnjim oceanografskim postajama na kraju kolovoza 2008. godine (slika 3). Na kontaktu mora i atmosfere model je forsiran homogenim i stacionarnim vjetrom s odabranim vrijednostima smjera i brzine (N, NE, E, SE S, SW, W i NW smjerovi te intenziteti 1, 3 i 5 Bf).

Početni uvjet za trodimenzionalno strujno polje je stanje mirovanja. Početni uvjeti za skalarna polja temperature i saliniteta mora u vertikalnom smjeru usvojeni su temeljem izmjerenih vrijednosti prikazanih na slici 3, te homogenom raspodjelom temperature i saliniteta mora u horizontalnom smjeru za područje cijele modelske domene.

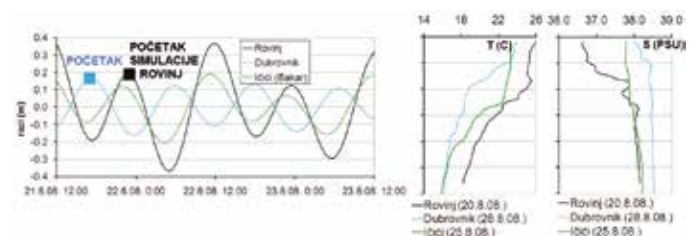
Turbulentno strujanje u programskom paketu Mike 3fm se bazira na  $k$ - $\epsilon$  modelu (Rodi, 1987.) u vertikalnom smjeru i Smagorinsky koncept (1993.) u horizontalnom smjeru. Koeficijenti turbulentne disperzije za skalarna polja temperature i saliniteta definirani su faktorima proporcionalnosti (Prandtllov broj) 0.8 u vertikalnom smjeru i 0.2 u horizontalnom smjeru. Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije ( $k$ ) i disipacije ( $\epsilon$ ) usvojeni su s vrijednostima 1 ( $k$ ) i 1.3 ( $\epsilon$ ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Hrapavost i Smagorinsky koeficijent u modelu su usvojeni kao prostorno



Slika 1: Shematski prikaz hipotetske marine s osnovnim geometrijskim obilježjima i položajima propusta P1, P2, P3 i P4 (presjek A1-A2 kroz propust, B1-B2 vertikalni presjek kroz simetralu ulaza)



Slika 2: Prostorna diskretizacija modelskih domena s trokutnim ćelijama (hipotetska marina, propust P1, gore - ulaz u marinu 25 m, dole - ulaz u marinu 50 m)



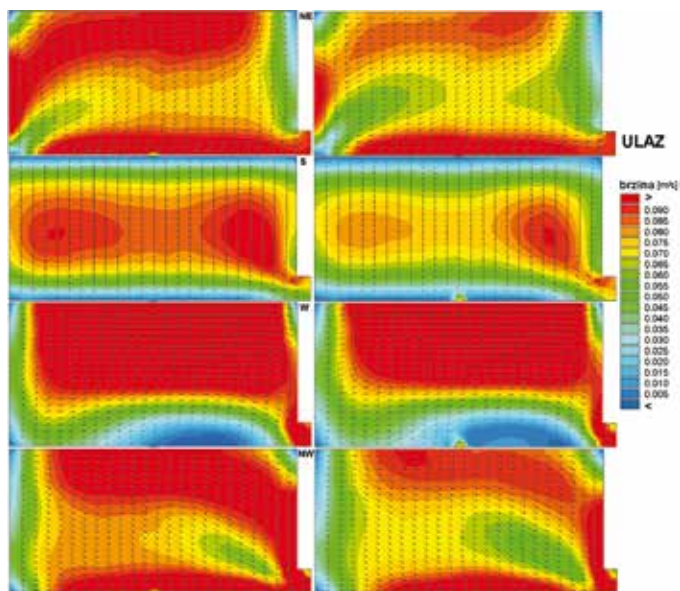
Slika 3: Vremenski niz morskih razi korišten za rubni uvjet na otvorenoj granici numeričkog modela (Rovinj, Dubrovnik) i vertikalne distribucije temperature i saliniteta mora dobivene mjerenjima CTD sonde ispred Rovinja ( $\varphi = 450 58,637''$ ;  $\lambda = 130 42,874''$ ), Ičići ( $\varphi = 450 15,5''$ ;  $\lambda = 140 19,0''$ ), i Dubrovnika ( $\varphi = 420 38,000''$ ;  $\lambda = 180 4,710''$ )

homogeni s vrijednostima 0.01 m i 0.2. Obzirom da simulacijsko razdoblje pokriva samo 24 sata, te da se kroz transekt ulaza u marinu unosi znatna količina mora, toplinska izmjena s atmosfere-

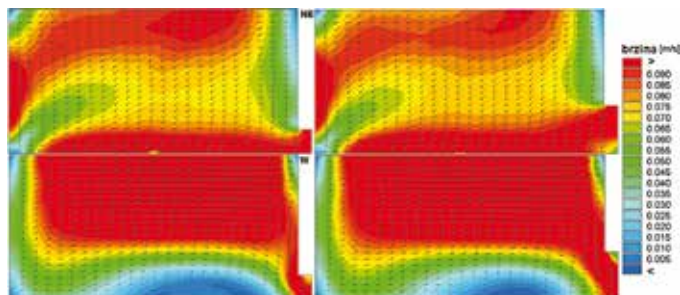
Tablica 1: Amplitude i faze plimnih konstituenata za lokacije Rovinj (prvi red), Bakar (drugi red) Dubrovnik (treći red)

O1		P1		K1		N2		M2		S2		K2	
amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	Faza	amp	faza
(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)
4.85	56.8	5.70	61.9	16.71	68.4	3.29	271.4	18.51	270.4	10.94	276.7	2.97	272.0
4.41	53.1	5.00	65.4	14.06	67.4	1.96	252.0	10.32	250.1	5.75	250.4	1.71	235.4
1.82	41.4	1.85	55.4	5.03	57.0	1.38	101.6	9.43	102.8	5.81	107.4	1.84	104.6

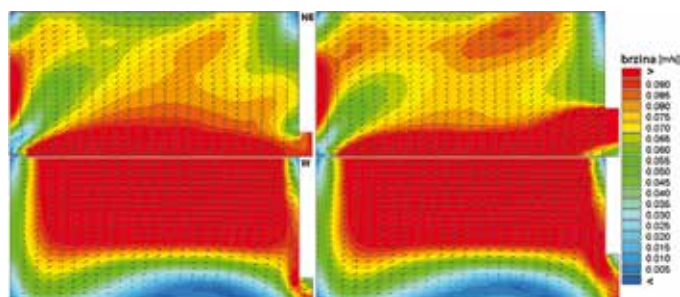




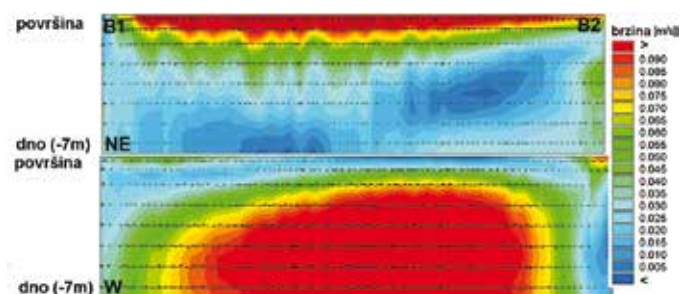
Slika 4: Površinska polja brzine u 19. (oseka - lijevo) i 24. (plima - desno) satu simulacije pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra (smjerovi NE, S, W i NW, jačina 5 Bf) za marinu sa širinom ulaza 25m i propustom P1 (lokacija Rovinj, bez varijacije gustoće)



Slika 5: Površinska polja brzine u 19. satu simulacije (oseka) pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra (smjerovi NE i W, jačina 5 Bf) za marinu sa širinom ulaza 25m (lijevo) i 50m (desno) te propustom P1 (lokacija Dubrovnik, bez varijacije gustoće)



Slika 6: Površinska polja brzine u 19. satu simulacije (oseka) pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra (smjerovi NE i W, jačina 5 Bf) za marinu sa širinom ulaza 25m (lijevo) i 50m (desno) te propustom P2 (lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)



Slika 7: Polja brzine u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B1-B2, slika 1) za 19. sat simulacije (oseka) pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra jačine 5 Bf za marinu sa širinom ulaza 25m i propustom P2 (lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće, gore - vjetar NE, dole - vjetar W)

rom ne predstavlja bitan doprinos u bilanci topline i nije uzeta u obzir. Za koeficijent povlačenja vjetra usvojena je vrijednost 0.0024 (Wu, 1994.).

### 2.3 Polje brzine bez varijacije gustoće

Na slikama 4 i 5 prikazana su površinska polja brzine za 19. (oseka) i 24. (plima) sat numeričke simulacije pri djelovanju vjetra iz smjerova NE, S, W i NW s intenzitetom 5 Bf, uz varijaciju širine ulaza u marinu (25m i 50m) i lokacije (sjeverni Jadran – Rovinj, južni Jadran – Dubrovnik). Sa slike 4 je razvidno da se polje brzine u akvatoriju marine malo mijenja u ovisnosti o fazi morskih mijena (plima ili oseka), pri čemu se u terminu plime pojavljuju malo manje brzine strujanja. Isto se može zaključiti i u slučaju varijacije širine ulaza te lokacije (vidi slike 4 i 5, lokacije Rovinj i Dubrovnik, širine ulaza 25m i 50m). Nešto manje brzine strujanja pojavljuju se na lokaciji Dubrovnik, kao posljedica manjih oscilacija morskih razi. Proširenje ulaza sa 25m na 50m uzrokuje promjene strujnog polja samo u blizini ulaza. Dobiveni rezultati (slike 4 i 5) pokazuju da vjetar intenziteta 5 bf, neovisno o smjeru djelovanja, ima značajniji utjecaj na cirkulaciju mora u akvatoriju marine od plimnih oscilacija. Ovaj zaključak je istovjetan i u slučaju djelovanja vjetra s brzinom od 1 bf ili 3 bf (polja brzina nisu prikazana u ovom radu).

### 2.4 Polje brzine za slučaj varijacije gustoće

Na slici 6 prikazana su površinska polja brzine za 19. (oseka) sat numeričke simulacije pri djelovanju vjetra iz smjerova NE i W s intenzitetom 5 Bf, uz varijaciju širine ulaza u marinu (25m i 50m) za lokaciju Dubrovnik. Utjecaj temperature i saliniteta ima uočljivo veći utjecaj na površinsko strujno polje od plimnih oscilacija (slike 5 i 6), pri čemu maksimalne promjene nastupaju pri djelovanju vjetra NE smjera a minimalne pri djelovanju vjetra E i W smjera. Uloga širine ulaza na strujno polje također je izraženija u slučaju prisustva gradijenta gustoće mora (slika 6). Rezultati pokazuju da položaj propusta nema važan utjecaj na formiranje polja brzine.

Polja brzine strujanja u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B-B) prikazana su na slici 7. U profilu ulaza odvija se baroklino strujanje (vertikalna kompenzacija), pri čemu se u površinskom sloju pojavljuje ulazna struja pri vjetru iz smjerova NE, E, SE i S, te izlazna struja pri vjetru iz smjerova SW, W, NW i N. Obzirom da je debljina sloja površinske ulazne/izlazne struje značajno manja od debljine kompenzacijskog intermedijalnog i pridnenog sloja, brzine struja u površinskom sloju ulaznog profila su značajno veće (slika 7).

Polja gustoće mora u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B-B) prikazana su na slici 8. Slika 8 ukazuje na homogenizaciju gustoće u stupcu mora uslijed „upwelling“ i „downwelling“ procesa. Naime, pri djelovanju vjetra NW smjera dolazi do odizanja (upwelling) „gušćeg“ pridnenog mora ka površini, dok se pri djelovanju SE vjetra odvija poniranje (downwelling) „rjeđeg“ mora iz povr-

šinskog sloja u pridnene „gušće“ slojeve. Stoga se u vertikalnom profilu (slika 8, simetrala kroz ulaz, presjek B-B) homogenizira raspodjela gustoće s vrijednostima koje su bliske površinskom sloju „vanjskog“ mora (pri djelovanju vjetra SE smjera), odnosno s gustoćama bliskim pridnenom sloju „vanjskog“ mora (pri djelovanju vjetra NW smjera). Nadalje, pri djelovanju vjetra iz ostalih analiziranih smjerova (N, NE, E, S, SW, W) proces odizanja/poniranja u akvatoriju marine je manje intenzivan, a vertikalni gradijent gustoće je jače izražen (slika 8, smjer NE). Pri djelovanju vjetra NW smjera pojačava se horizontalni gradijent gustoće mora između unutarnje i vanjske strane lukobrana u površinskom sloju mora u kojem se nalaze i cijevi propusta. Time se dodatno pospješuje protjecanje kroz cijev propusta. Suprotan efekt se postiže pri djelovanju vjetra SE smjera, kada je horizontalni gradijent gustoće u površinskom sloju mora između unutarnje i vanjske strane lukobrana marine najmanje izražen. Potrebno je napomenuti da ovaj efekt ima minornu ulogu u usporedbi s ostalim generativnim mehanizmima strujanja kroz cijev propusta.

Na slici 9 dan je komparativni prikaz polja gustoće mora u vertikalnom presjeku ulaza u marinu za situacije djelovanja vjetra iz N i W smjera, nakon 2 i 12 sati simulacijskog razdoblja. Prikazani rezultati pokazuju da se proces miješanja i homogenizacije odvija znatno brže pri djelovanju vjetra W smjera, kao posljedica brže izmjene vanjskog i unutarnjeg mora kroz profil ulaza u marinu.

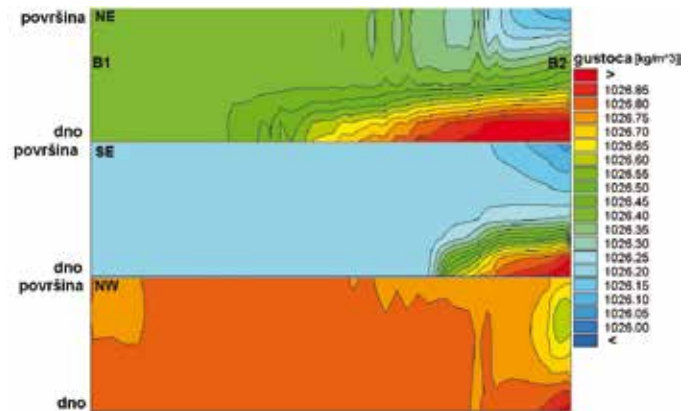
Omjer volumena izmijenjenog mora kroz propuste u simulacijama sa i bez varijacije gustoće iznosi prosječno 1.22 (ulaz 25 m) i 1.28 (ulaz 50 m) za sve smjerove i brzine vjetra te pozicije propusta na lokacijama Rovinj i Dubrovnik. Ovi rezultati ukazuju na pozitivan učinak prostorne i vremenske promjenjivosti temperature i saliniteta mora (gustoće) na izmjenu mora kroz propuste.

### 2.5 Polje turbulentne kinetičke energije

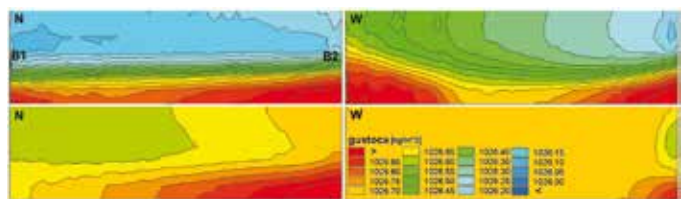
Polja turbulentne kinetičke energije  $k$  u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B-B) prikazana su na slici 10. Prostorna raspodjela turbulentne kinetičke energije (slika 10) ukazuje na mjesta njezinog generiranja i difuznog pronosa. Pri vjetru smjera NW pojavljuje se najintenzivniji prodor  $k$  u dublje slojeve, a što ubrzava izmjenu vertikalnog gradijenta gustoća te doprinosi bržoj homogenizaciji gustoće stupca mora. Prema rezultatima istraživanja prezentiranih u radu Oakey i Elliott (1982.) odnos integrirane vrijednosti disipacije  $k$  po dubini stupca mora i kubne vrijednosti brzine vjetra na 10m od površine mora je linearan. Za provjeru usvojenih vrijednosti u okviru modelske parametrizacije odabran je vertikalni profil u težištu akvatorija marine, te su integrirane proračunate vrijednosti disipacije  $k$  pri djelovanju vjetrova NE, SW i S smjera s intenzitetima 1, 3, 4 i 5bf (slika 11). Sa slike 11 je razvidan uspostavljeni linearni odnos za cijeli raspon brzina od 1 do 5 bf.

### 2.6 Analiza izmjene vodene mase

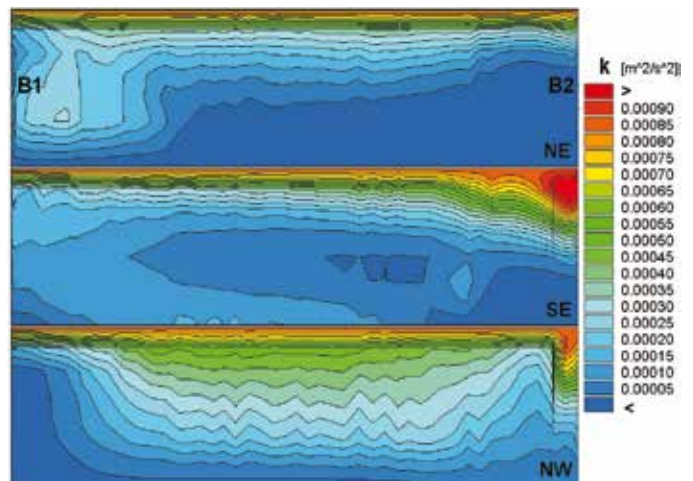
Obzirom da izmjena mora kroz propuste primarno



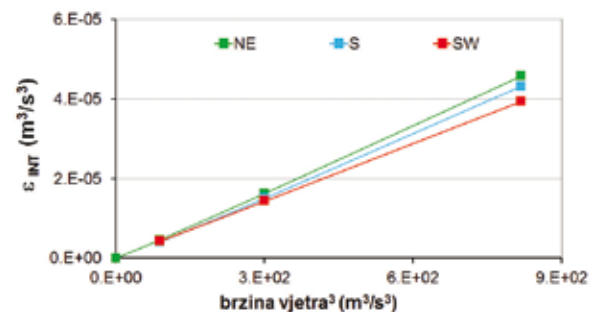
Slika 8: Polja gustoće mora u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B1-B2, slika 1) za 19. sat simulacije (oseka) pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra (smjerovi NE, SE i NW, jačina 5 Bf) za marinu sa širinom ulaza 25m i propustom P2 (lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)



Slika 9: Polja gustoće mora u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B1-B2, slika 1) za 2. (gore) i 12. (dolje) sat simulacije pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra N (lijevo) i W (desno) smjera i brzine 5 Bf za marinu sa širinom ulaza 25m i propustom P2



Slika 10: Polja turbulentne kinetičke energije (lijevo) u vertikalnom presjeku kroz simetralu ulaza (presjek B-B) za 19. sat simulacije (oseka) pri djelovanju stacionarnog i homogenog polja vjetra (smjerovi NE, SE i NW, jačina 5 Bf) za marinu sa širinom ulaza 25m i propustom na P2 (lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)



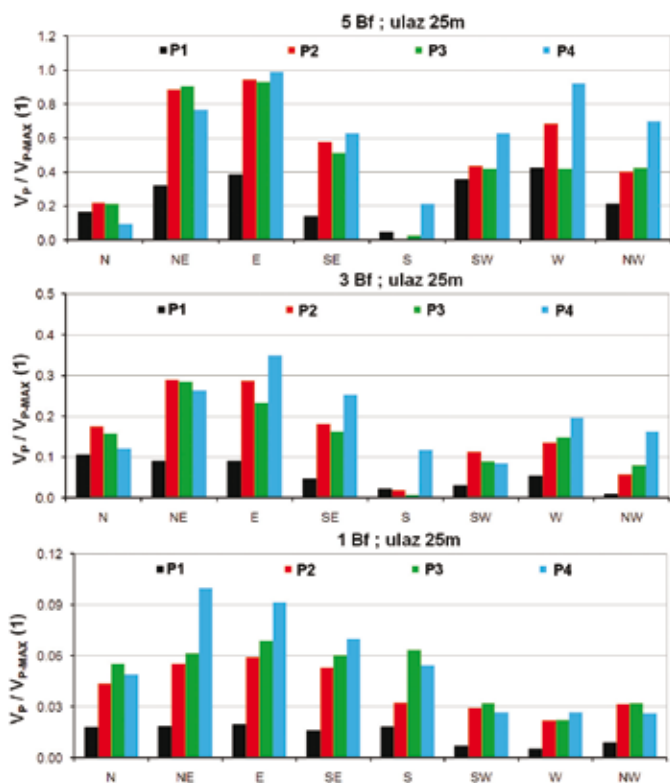
Slika 11: Odnos integrirane vrijednosti disipacije  $k$  po dubini stupca mora ( $\epsilon_{INT}$ ) i kubne vrijednosti brzine vjetra na 10m od površine mora



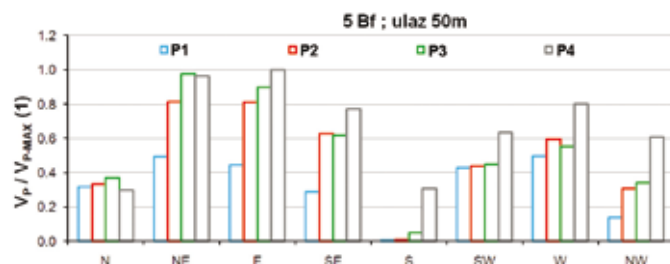
ovisi o brzini i smjeru vjetra te položaju samog propusta i širini ulaza u marinu, u daljnjoj prezentaciji rezultata fokus će biti stavljen samo na lokaciju Dubrovnik i ljetno razdoblje s vertikalno raslojenim vodenim stupcem.

Na slikama 12 i 13 prikazana je usporedba volumena izmijenjenog mora (normirano s vrijednosti maksimalnog volumena iz svih analiziranih varijanti) kroz profil propusta na kraju simulacijskog razdoblja od 24h, pri varijaciji položaja propusta (P1-P4), širine ulaza u marinu (25m i 50m), te smjera i intenziteta djelovanja vjetra (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW; 1, 3, 5 Bf).

Na slikama 12 i 13 je vidljivo da se najpovoljnija situacija izmjene mora javlja pri izvedbi propusta P4, u smislu ostvarenja maksimalnog volumena izmjene mora. Za širinu ulaza 25m izmjena mora je prosječno (za sve smjerove i brzine vjetra) 1.65, 0.2 i 0.28 puta (165%, 20% i 28%) veća nego u slučaju izvedbe propusta P1, P2 i P3. Za širinu ulaza 50m izmjena mora je prosječno (za sve smjerove i brzine vjetra) 1.27, 0.38 i 0.28 puta (127%, 38% i 28%)



Slika 12: Usporedba volumena izmijenjenog mora kroz propust pri varijaciji brzine i smjera vjetra te položaja propusta (širina ulaza 25m, lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)



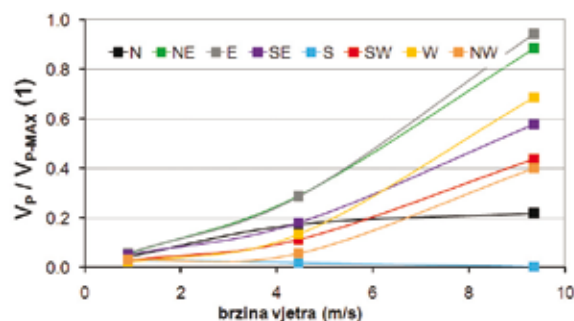
Slika 13: Usporedba volumena izmijenjenog mora kroz propust pri vjetru brzine 5bf, uz varijaciju smjera djelovanja vjetra i položaja propusta (širina ulaza 50m, lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)

veća nego u slučaju izvedbe propusta P1, P2 i P3. Širina ulaza u marinu utječe na izmjenu mora kroz propuste ovisno o položaju propusta. Tako proširenje ulaza sa 25 m na 50 m osigurava veću izmjenu mora kroz propuste P1, P3 i P4 za prosječno (svi smjerovi i brzine vjetra) 0.25, 0.06 i 0.07 puta (25%, 6% i 7%). Za slučaj propusta P2, proširenje ulaza rezultira smanjenjem izmjene mora za prosječno 0.06 puta (6%). Potrebno je napomenuti da se marine često puta izvode uvučene u kopno, a pri čemu izostaje mogućnost postavljanja propusta na položaj P3 i/ili P4.

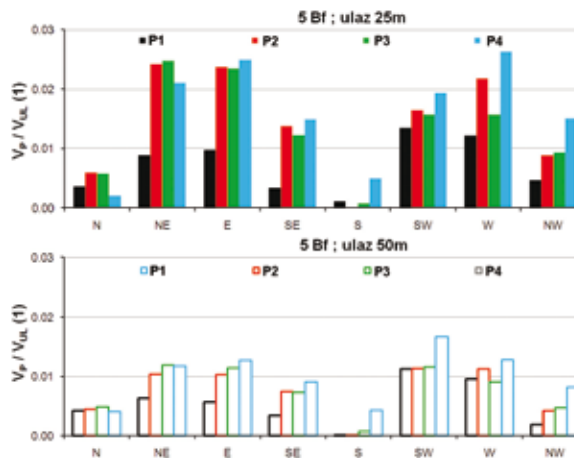
Interesantno je prikazati i ovisnost ukupnog volumena izmijenjenog mora kroz propust o brzini vjetra po smjerovima (slika 14). Rezultati sa slike 14 ukazuju na nelinearan odnos između brzine vjetra i intenziteta izmijenjene mora za sve analizirane smjerove vjetra.

Najznačajniji doprinos izmjeni između okolnog mora i marine ostvaren je proširenjem ulaza. Za analiziranu hipotetsku geometriju marine povećanje širine ulaza s 25 m na 50 m znači povećanje ulazne površine za 90%. Prema rezultatima proračuna, time je ostvareno prosječno povećanje izmjene mora kroz transekt ulaza za 0.74 puta (74%), za sve analizirane brzine i smjerove vjetra.

Na slici 15 prikazan je omjer ukupnog volumena izmijenjenog mora kroz profil propusta i ulaza u marinu. Doprinos propusta u ukupnoj izmjeni mora marine je prosječno (za sve smjerove i brzine vjetra) 0.004, 0.009, 0.008 i 0.01 puta (0.4%, 0.9%, 0.8% i 1%) veći za pozi-



Slika 14: Ovisnost ukupnog volumena izmijenjenog mora kroz propust o brzini vjetra po smjerovima (propust P2, lokacija Dubrovnik, s varijacijom gustoće)



Slika 15: Usporedba omjera volumena izmijenjenog mora kroz propust i ulaz u marinu pri vjetru brzine 5bf, uz varijaciju smjera djelovanja vjetra i položaja propusta (lokacija Dubrovnik, sa varijacijom gustoće)

cije 1, 2, 3, 4 u slučaju širine ulaza 25m te samo 0.002, 0.005, 0.005 i 0.006 puta (0.2%, 0.5%, 0.5% i 0.6%) veći u slučaju širine ulaza 50m. Iznesene male postotke ne treba promatrati kao dokaz o neučinkovitosti propusta, budući se njima omogućava izmjena mora u zoni akvatorija marine s dužim vremenom zadržavanja mora.

### 3. ANALIZA IZMJENE MORA U MARINI IČIĆI

Prethodno prezentirane rezultate za slučaj hipotetske marine (slike 12, 13 i 15) moguće je primijeniti i praktično pri izboru položaja cijevnih propusta u lukobranu marine za realne uvjete raspodjele brzine i smjera vjetra tijekom ljetnog razdoblja. Kao primjer odabrana je marina Ičići (duljina 335m, širina 130m, ulaz 25m, slika 16). Modelska prostorna domena marine Ičići s pripadnom prostornom diskretizacijom također je prikazana na slici 16.

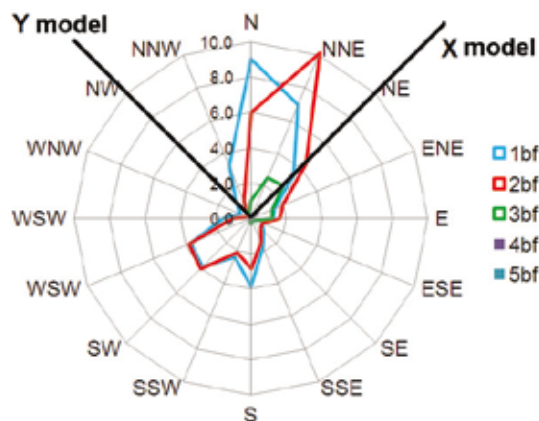
Podatci o relativnim čestinama različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra za Rijeku (ljetna sezona) u razdoblju 1981.-2000. preuzeti su iz reference DHMZ (2004), i prikazani su u tablici 2. Iz tablice 2 se može uočiti da su najučestaliji vjetrovi iz prvog kvadranta (N, NNE i NE), a što rotacijom u X-Y koordinatni sustav hipotetskog modela marine (slika uz tablicu 2) odgovara analiziranim situacijama s djelovanjem vjetra iz smjera NE ili E. S druge strane, djelovanje vjetra iz trećeg kvadranta (SSW, SW, WSW), pokriveno je modelskim simulacijama s vjetrom W smjera.

Na kontaktu mora i atmosfere model primijenjeno je djelovanje vjetra s brzinom, smjerom i trajanjem prema sukcesivnom pojavljivanju u tablici 2. U sklopu provedbe ove numeričke simulacije svakom postotku relativne čestine iz tablice 2 pridruženo je trajanje od 4 sata. Simulacija započinje djelovanjem vjetra N smjera, s brzinom 1 Bf (vidi tablicu 2). Tijekom 9\*4h vjetar zadržava brzinu 1 Bf i smjer N. Nakon toga povećava se brzina na 2 Bf, uz zadržavanje istog smjera vjetra N (6\*4h). Isti princip vrijedi i za 3 Bf, te 4 Bf. Nakon toga smjer vjetra prelazi u NNE, zadržavajući brzinu od 4 Bf. U nastavku brzina vjetra „pada“ do 1 Bf. Nakon toga se ponovno mijenja smjer vjetra (prelazi u NE smjer), uz povećanje brzina do 5 Bf. Vrijednosti brzine i smjera vjetra za cjelokupno simulacijsko razdoblje (400 sati) prikazane su na slici 17. Osim vjetra koji djeluje na površini mora, model je na

otvorenoj granici forsiran hodom morskih razi, te poljem temperature i saliniteta mora (slika 3) kao i u prethodno analiziranom slučaju hipotetske marine. Analiza je ponovljena za sve položaje propusta P1 - P4.

Tablica 2: Relativne čestine (%) različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra za Rijeku (ljetna sezona u razdoblju 1981.-2000., DHMZ (2004.)) i pripadna ruža vjetrova s naznakom rotacije koordinatnog sustava prema modelu hipotetske marine

DHMZ	1bf	2bf	3bf	4bf	5bf
N	9.0	6.0	1.0	0.1	0.0
NNE	6.9	10.1	2.5	0.3	0.0
NE	3.4	4.4	2.6	0.8	0.1
ENE	1.4	1.9	1.3	0.3	0.0
E	1.3	1.6	1.2	0.1	0.0
ESE	0.7	0.7	0.3	0.0	0.0
SE	1.0	0.8	0.1	0.0	0.0
SSE	1.8	1.5	0.2	0.0	0.0
S	3.9	2.8	0.3	0.0	0.0
SSW	2.4	2.1	0.1	0.0	0.0
SW	3.9	4.0	0.1	0.0	0.0
WSW	3.7	3.8	0.1	0.0	0.0
WSW	1.5	1.1	0.0	0.0	0.0
WNW	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
NW	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0
NNW	3.2	1.1	0.2	0.0	0.0

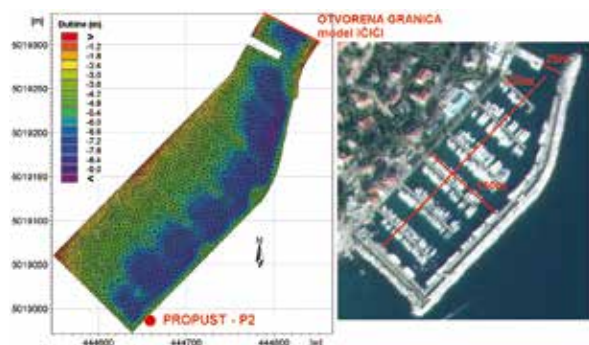


Na slici 18 prikazano je površinsko polje brzine za marinu Ičići u nekoliko karakterističnih situacija djelovanja vjetra (propust P2). U tablici 3 prikazane su vrijednosti relativnih učinaka propusta u ovisnosti o njihovom položaju, pri čemu je referentna vrijednost učinka vezana uz rezultat simulacije s propustom na položaju P4.

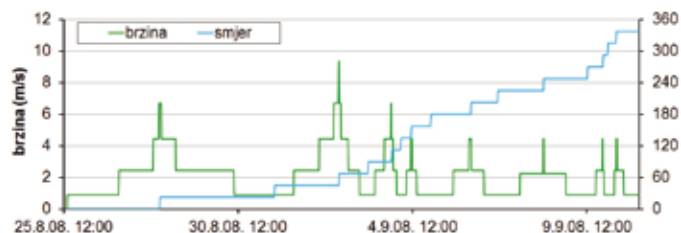
Potrebno je napomenuti da je u tijelu glavnog lukobrana marine Ičići izveden propust na položaju P2, sačinjen od 8 kružnih cijevi duljine 10m i promjera 1m (vidi sliku 16).

Tablica 3: Relativni učinci propusta (%) u ovisnosti o njihovoj položaju – marina Ičići (referencirano na učinak propusta na položaju P4)

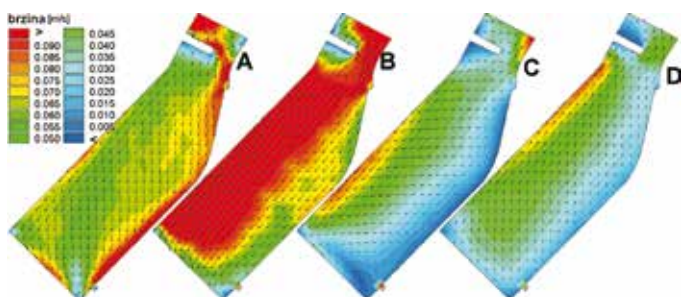
Relativni učinak propusta (%)	položaj propusta			
	P1	P2	P3	P4
numerička simulacija	32	71	88	100



Slika 16: Prostorna diskretizacija modelskih domena s trokutnim ćelijama (marina Ičići)



Slika 17: Vremenske serije sukcesivnih brzina i smjera vjetra prema vrijednostima iz tablice 2 (primijenjeno za rubni uvjet na kontaktu mora i atmosfere u modelu marine lčiči)



Slika 18: Površinsko polje brzine u marini lčiči za puhanja vjetrova različitih smjerova i brzina (A – smjer N, 4 Bf; B – smjer NE, brzina 5 Bf; C – smjer E, 3 Bf; D – smjer S, 3 Bf)

#### 4. PREDLOŽENA METODOLOGIJA ODREĐIVANJA POLOŽAJA PROPUSTA

Primjena predložene metodologije pretpostavlja da se za konkretnu lokaciju raspolaže s podacima u vidu tablice relativne čestine različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra (primjer tablica 2, podatci s meteorološke stanice Rijeka). Metodologija određivanja položaja propusta sadrži nekoliko koraka.

U prvom koraku se podatci iz tablice čestine različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra (primjerice tablica 2) sažimaju s 5 klasa brzine vjetra (1, 2, 3, 4, 5 Bf) na 3 klase brzine vjetra (1, 3, 5 Bf) te sa 16 smjerova vjetra (N, NNE, NE ..., WNW, NW, NNW) na 8 smjerova vjetra (N, NE, E, ..., W, NW). Cilj ovog koraka je stvoriti kompatibilnost podataka s brzinama i smjerovima vjetra korištenim u sklopu provedenih analiza za marinu hipotetskih dimenzija. Provedba ovog koraka provodi se na način da se vrijednost relativne čestine svakog „međusmjera“ iz tablice 2 (NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW, NNW)

prenosi s 50% na susjedni smjer N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Primjerice, 50% vrijednosti iz smjera NNE prelazi u smjer N, a drugih 50% u smjer NE. Isto vrijedi i za brzine vjetra, pa 50% vrijednosti relativne čestine za klasu brzine 2 Bf prelazi u klasu 1 Bf, a drugih 50% u klasu brzine 3 Bf. Primjenom ovog koraka na podatke iz tablice 2 dobiveni su podatci za prve četiri kolone u tablici 4.

U drugom koraku se proračunavaju umnošci vrijednosti  $V_p/V_{P-MAX}$  (prikazane na slici 12) s pripadnom relativnom čestinom za 1, 3 i 5 bf (tablica 4), a čime se dobivaju vrijednosti prikazane u preostalim kolonama tablice 4 za svaki pojedini položaj propusta P1-P4. Dobivene vrijednosti su kvantitativni pokazatelji očekivanog doprinosa propusta u izmjeni mora za pojedinu klasu brzine vjetra i smjera vjetra.

U trećem koraku se ti umnošci sumiraju za svaki položaj propusta P1-P4, a čime su dobivene vrijednosti 3.5, 10.8, 10.6 i 14.2 za položaje propusta P1, P2, P3 i P4 (tablica 4). Navedene vrijednosti mogu se shvatiti kao kumulativni učinci. Kumulativni učinak propusta P4 je 0.31 puta (31%) veći u odnosu na propust P2, te 0.34 puta (34%) veći u odnosu na propust P3. Značajna razlika kumulativnog učinka pojavljuje se u komparaciji s propustom P1, pri čemu propust P4 osigurava 3 puta (300%) veću izmjenju mora. Zanimljivo, za izbor položaja propusta preporučuje se položaj s maksimalnom vrijednosti kumulativnog učinka. Potrebno je napomenuti da su dobivene vrijednosti kumulativnih učinaka vezane uz dispoziciju hipotetske marine s geometrijskim obilježjima prikazanim na slici 1, te rotacijom uzdužne osi marine za 45° u odnosu na smjer E iz pripadne ruže vjetrova (slika uz tablicu 2), a što odgovara situaciji marine lčiči.

Ukoliko se za referentni kumulativni učinak usvoji maksimalna proračunata vrijednost 14.2 (propust P4), te se vrijednosti kumulativnog učinka za propuste P1, P2 i P3 podijele tom vrijednosti, dobivaju se relativni kumulativni učinci propusta prikazani u tablici 5. Osim relativnih kumulativnih učinaka proračunatih prema izloženoj metodologiji, u tablici 5 prikazani su i rezultati relativnih učinaka propusta dobiveni numeričkim simulacijama za marinu lčiči (poglavlje 3). Usporedba vrijednosti upućuje na suglasje rezultata, a uočljivije odstupanje pojavljuje se samo u slučaju propusta P3 (13% manji doprinos dobiven primjenom predložene metodologije).

Tablica 4: Relativne čestine (%) različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra za Rijeku i ljetnu sezonu u razdoblju 1981.-2000. (nakon rotacije stvarnog koordinatnog sustava u sustav modela hipotetske marine te sažimanja vrijednosti u 8 smjerova i tri klase brzine vjetra)

	relativne čestine (%)			$(V_p/V_{P-MAX})^*$ (rel. čest.)											
	1bf	3bf	5bf	P1			P2			P3			P4		
model	1bf	3bf	5bf	1bf	3bf	5bf	1bf	3bf	5bf	1bf	3bf	5bf	1bf	3bf	5bf
NE	19.9	8.3	0.1	0.4	0.7	0.0	1.1	2.4	0.1	1.2	2.4	0.1	2.0	2.9	0.1
E	12.8	10.2	0.7	0.3	0.9	0.3	0.8	2.9	0.7	0.9	2.4	0.6	1.2	4.3	0.7
SE	3.8	3.6	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.6	0.1	0.2	0.6	0.1	0.3	0.8	0.1
S	3.1	1.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
SW	8.3	2.8	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0
W	10.4	3.6	0.0	0.1	0.2	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2	0.5	0.0	0.3	0.3	0.0
NW	5.3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
N	3.6	0.6	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0
				SUM = 3.5			SUM = 10.8			SUM = 10.6			SUM = 14.2		



Tablica 5: Relativni učinci propusta (%) u ovisnosti o njihovoj položaju – marina lčići (referencirano na učinak propusta na P4)

Relativni učinak propusta (%)	položaj propusta			
	P1	P2	P3	P4
predložena metodologija	25	76	75	100
numerička simulacija	32	71	88	100

## 5. ZAKLJUČAK

Provedeno je istraživanje izmjene mora kroz propuste marina s 3D numeričkim modelom. Provedenim analizama obuhvaćen je utjecaj smjera i intenziteta vjetra, oscilacija morskih razlika generiranih plimnim signalom te prostorne i vremenske raspodjela temperature i saliniteta mora na izmjenu mora između akvatorija marine i otvorenog mora. Zaštitni lukobran marine promatran je kao vertikalna puna konstrukcija u kojoj su izvedeni horizontalni propusti na različitim položajima. Jedan propust sačinjen je od 8 kružnih cijevi duljine 10m i promjera 1m. Utjecaj strujanja inducirano transmisijom energije gravitacionih vjetrovnih valova nije uzet u obzir. Prvotno su provedene analize vezane uz marinu hipotetskih dimenzija (generički primjer marine) s variranjem širina ulaza u marinu. Nastavno su provedene numeričke simulacije za marinu lčići, uzimajući u obzir stvarnu geometriju lukobrana. Temeljem dobivenih rezultata predložena je i praktična metodologija za izbor pozicije cijevnih propusta u tijelu zaštitne građevine marine.

Numeričke simulacije na generičkom primjeru marine pokazali su da vjetar ima primarni utjecaj na prostornu raspodjelu strujanja, dok se utjecaj gustoće očituje kroz modifikaciju polja brzine. Plimne oscilacije imaju samo minoran doprinos u generiranju strujanja unutar akvatorija marine. Širina ulaza utječe na polje brzine samo lokalno, odnosno u bliskoj okolici ulaza. Ukoliko nema gradijenta gustoće mora, povećanjem širine ulaza od 25m na 50m povećava se izmjena mora kroz profil ulaza za 0.71 puta (71%, prosječno za lokacije Rovinj i Dubrovnik te sve analizirane smjerove i intenzitete vjetra). Značaj širine ulaza

u izmjeni mora još je izraženiji u slučaju prisustva gradijenta gustoće mora, pri čemu proširenje ulaza rezultira s prosječno 0.74 puta (74%) intenzivnijom izmjenom mora.

Vjetar ima i primarno značenje za intenzitet izmjene mora kroz propuste. Povećanje širine ulaza u marinu stimulira izmjenu mora kroz propuste. Proširenjem ulaza sa 25m na 50m povećava se izmjena mora kroz propuste za prosječno 0.08 puta (8%), svi položaji propusta, svi smjerovi i brzine vjetra. Za ispitivani raspon brzine i smjera vjetra, te širine ulaza i položaj propusta pokazalo se da ulaz u marinu ima prosječno 140 puta (širina ulaza 25m) i 220 puta (širina ulaza 50m) veći doprinos u izmjeni mora od propusta smještanog u tijelo lukobrana.

Rezultati provedenih numeričkih simulacija pokazali su da se u općem slučaju (neovisno o trajanju brzine i smjera vjetra na konkretnoj-realnoj lokaciji) maksimalni učinak propusta ostvaruje njegovom izvedbom na položaju P4. Na primjeru marine lčići, uzimajući u obzir realnu raspodjelu brzine i smjera vjetra, pokazalo se da je „optimalni“ položaj cijevnih propusta također P4.

Predložena metodologija za izbor položaja propusta u marinu na proizvoljnoj lokaciji referencira se na podatke iz tablice relativne čestine različitih smjerova vjetra po klasama brzine vjetra za izabranu lokaciju marine. Rezultati primjene predložene metodologije pokazali su inženjerski prihvatljivi stupanj pouzdanosti i relativno mala odstupanja od rezultata numeričkim simulacijama za stvarnu geometriju marine s pripadnim realnim rubnim i početnim uvjetima.

Potrebno je napomenuti da je primarni (glavni) lukobran uvijek položen približno okomito na smjer propagacije gravitacionih vjetrovnih valova, zbog čega se tijekom valovanja odvija i značajniji transport mora kroz cijevi propusta na analiziranim položajima P1 i P2. Doprinos tog segmenta cjelokupnom procesu izmijene mora kroz cijevi propusta provesti će se u nastavku istraživanja. Mogućnost ostvarenja sinergijskog učinka u izmjeni mora kroz izvedbu propusta na dva položaja također će biti predmet daljnjih istraživanja. ■

## LITERATURA

- Balas, L., Inan, A. (2010.): Modelling of Induced Circulation, *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 5 (3), str. 132-143.
- Carević, D., Lončar, G., Kuspilić, N. (2014.): Tehničko ekonomski parametri marina u Hrvatskoj, *Građevinar*, 66 (10), str. 909-915.
- DHMZ (2004): Vjetrovalna klima za luku Rijeka, Zagreb, 56 str.
- 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.
- 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.
- Song, Y., Haidvogel, D. (1994.): A semi-implicit ocean circulation model using a generalised topography-following coordinate system, *Journal of Comp. Physics*, 115, str. 228-244.
- 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.

### **Analysis of the impact of winds, tide oscillations and density distribution on the sea exchange through culverts in the marinas as exemplified by the Ičići marina**

The paper presents the results of the conducted 3D numerical simulations of the sea circulation and exchange with the aim to quantify the contribution of pipe culverts to the sea exchange from the marina area and the surrounding sea. In addition to wind action and tide oscillations, the numerical model also takes into account the spatial/temporal changes in temperature and salinity in the profiles of open boundaries of the model, culverts and the marina entrance. Initially, a marine of hypothetical geometric characteristics was analyzed – with a length of 300m, width of 150m and variable depth of 3 – 7m. The following elements were varied: the width of the marine entrance (25m and 50m), positions of pipe culverts (4 positions), wind direction and velocity (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW; 1, 3, 5 Bf), geographical location (northern Adriatic – Rovinj; southern Adriatic – Dubrovnik) and the contribution of the sea density gradient. Following this, numerical simulations were conducted for the Ičići marina by taking into consideration the actual geometry of the protection facilities (breakwater), realistic oceanographic conditions (depth, sea level dynamics, sea temperature and salinity) and wind action. Based on the obtained results, a practical methodology for selecting the positions of pipe culverts in the structure of the marina protective facility was also proposed.

**Key words:** pipe culvert, marina, the Adriatic, numerical model

### **Analyse der Auswirkungen von Wind, Gezeitenoszillationen und Dichteverteilung auf den Austausch mit dem offenen Meer durch Durchlässe in Yachthäfen am Beispiel von Marina Ičići**

Es werden Ergebnisse der 3-dimensionalen numerischen Simulationen der Meereszirkulation und des Austausches dargestellt, die durchgeführt worden sind mit dem Ziel den Beitrag von Rohrdurchlässen im Austausch vom Meer zwischen Yachthafen und Umgebung zu quantifizieren. Neben den Auswirkungen von Wind und Gezeitenoszillationen wurde auch die räumlich-zeitliche Veränderlichkeit der Temperatur und der Salinität an Profilen der offenen Grenzen des Modells, der Durchlässe und der Einfahrt zum Yachthafen in Betracht gezogen. Erstens wurde ein hypothetischer, 300 m langer, 150 m breiter und 3 bis 7 m tiefer Yachthafen analysiert. Die folgenden Parameter wurden variiert: Breite der Einfahrt zum Yachthafen (25 m bzw. 50 m), Positionen der Rohrdurchlässe (4 Positionen), Richtung und Geschwindigkeit des Windes (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW; 1, 3, 5 Bft), geographische Position (Nordadria – Rovinj; Südadria – Dubrovnik) sowie der Beitrag des Gradienten der Meerwasserdichte. Danach wurden numerische Simulationen für die Marina Ičići durchgeführt, wobei die tatsächliche Geometrie des Schutzobjektes (Wellenbrecher), realistische ozeanographische Bedingungen (Tiefe, Dynamik der Gezeiten, Temperatur und Salinität) und die Auswirkung von Wind in Betracht gezogen wurden. Auf Grund der Ergebnisse wurde auch eine praktische Methodologie zur Wahl von Positionen von Rohrdurchlässen im Körper des Schutzobjektes eines Yachthafens vorgeschlagen.

**Schlüsselwörter:** Rohrdurchlass, Yachthafen, Adria, numerisches Modell