

# Geometrijsko oblikovanje propusta ugrađenih u lukobran u svrhu povećanja učinkovitosti izmjene mora

---

**Bujak, Damjan**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:347292>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Damjan Bujak

**GEOMETRIJSKO OBLIKOVANJE PROPUSTA  
UGRAĐENIH U LUKOBRAN U SVRHU  
POVEĆANJA UČINKOVITOSTI IZMJENE MORA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Damjan Bujak

**GEOMETRIJSKO OBLIKOVANJE PROPUSTA  
UGRAĐENIH U LUKOBRAN U SVRHU  
POVEĆANJA UČINKOVITOSTI IZMJENE MORA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević

Zagreb, 2019.



University of Zagreb  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Damjan Bujak

**GEOMETRICAL DESIGN OF CULVERTS IN  
BREAKWATERS IN ORDER TO INCREASE THE  
EFFICIENCY OF SEA EXCHANGE**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević

Zagreb, 2019.

## **IZJAVA O IZVORNOSTI**

Izjavljujem da je moj doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Potpis

## SAŽETAK

Narušena kvaliteta mora unutar luke može se izbjeći smanjenjem potencijalnih izvora onečišćenja ili/i održavanjem optimalne izmjene mora. U područjima gdje su amplitude plimnih oscilacija unutar kategorije mikroplimnih mijena poput Jadranskog mora, uobičajena je ugradnja grupe propusta u tijelo lukobrana za poboljšanje izmjene mora. Uz povoljan utjecaj grupe propusta izražen kroz povećanu izmjenu mora u akvatoriju, javlja se nepoželjna transmisija valne energije kroz grupu propusta. Izvođenjem laboratorijskih, terenskih i numeričkih istraživanja provjeriti će se je li moguće zadovoljiti oprečna djelovanja grupe propusta. Laboratorijskim i numeričkim ispitivanjima, koristeći se modelom grupe propusta na koji nailaze valovi, istražila se transmisija valne energije i protok uslijed valova. Terenskim i numeričkim ispitivanjima otkrio se dominantni generator izmjene mora kroz grupu propusta za lokaciju ACI marina Opatija (plimne oscilacije) i istražio utjecaj oblikovanja grupe propusta na brzinu protjecanja mora. Uzimajući u obzir parametar učinkovitosti grupe propusta u ostvarenju kompromisa između dva oprečna djelovanja, mogu se odrediti najpovoljniji oblici grupe propusta ovisno o oceanografskim prilikama na lokaciji. U slučaju da su valovi dominantni generator cirkulacije, grupa propusta od 4 kružna propusta u jednom redu se pokazala najučinkovitija. Grupa propusta od 8 kružnih propusta u dva reda dolazi do izražaja u slučajevima kada je srednja valna klima relativno mala i tada plimne oscilacije dominantno čine cirkulaciju. Stoga, povoljan oblik grupe propusta koji zadovoljava kriterij učinkovitosti i time kompromis između oprečnih djelovanja moguće je definirati bez obzira o dominantnom generatoru cirkulacije kroz grupu propusta za pojedinu lokaciju.

**KLJUČNE RIJEČI:** propusti, valovi, plimne oscilacije, izmjena mora, lukobran

## **EXTENDED SUMMARY**

The growing human population on Earth is expected to rise to as much as 11.1 billion people by the year 2100. Additionally, the percentage of people living at the sea shore is also expected to further rise from the existing 60% to 75% by the year 2025. With the growth of population and urban areas near the shore, rising anthropogenic activities could pose a critical issue for the marine environment. If an optimal water renewal rate of semi enclosed basins is maintained and potential sources of pollution are controlled, detrimental effects on water quality within a harbour can be avoided. The water exchange of a manmade or naturally enclosed basin is influenced by natural flow inducers (e.g. tidal oscillations, wind, waves, external currents, inner freshwater discharge, etc.). Most seawater renewal predication approaches are essentially constructed around tidal oscillations as the leading generator of water exchange inside enclosed basins. In areas where tidal oscillations are significantly smaller like the Mediterranean Sea, the water renewal is also reduced considerably. In these areas, it is common to use flushing culverts (circular or rectangular openings in a breakwater body) in order to improve the ability of seawater renewal inside the basin. Perhaps the second most dominant generator of seawater renewal in semi enclosed basins is wave action. It is often cited in previous research that have been conducted in the low tide oscillation areas like the Mediterranean Sea and the Japanese Sea, that wave action could be used in order to provide additional seawater renewal. The purpose of flushing culverts placed inside breakwaters is to improve the water renewal within an enclosed maritime area, without permitting much unwanted wave energy to enter and disturb the harbor basin.

It is the goal of this thesis to explore the performance of various types of flushing culvert groups in order to determine if it is possible to find a flushing culvert group design that would achieve a compromise between the wave energy transmission through the flushing culvert group and the seawater volume that flows through the flushing culvert group forced by the dominant water circulations generator.

In this thesis, the influence of various natural flow generators on the seawater flow through flushing culvert groups is investigated using laboratory measurements, field measurements conducted in marina Opatija and numerical investigation. For laboratory measurements, a wave flume with dimensions 18.35 m × 1 m × 1.1 m is used. The physical

model of the breakwater with a built-in flushing culvert was constructed using a similarity scale of 1:10. The measurements were conducted for a completely submerged flushing culvert, meaning the water level was at the top of the flushing culvert (water level W1) and partially submerged flushing culvert, meaning the water level was at the axis of the flushing culvert (water level W2). The water velocity at the culvert exit and water surface elevation were measured during the laboratory tests. In order to provide a deeper insight into the circulation patterns during the presence of various flow generators, field measurements were performed in ACI marina Opatija. The marina primary rubble mound breakwater has a configuration of 8 parallel 1 m diameter culverts placed at the southern part of the marina with the intention to improve water renewal inside the basin. Regarding vertical positioning, culverts were laid so the top of the circular culvert would be placed at mean sea level. Utilizing field measurements, processes that are hard to produce, capture and measure in a laboratory like wind action, wind and wave interaction, tidal oscillations and other flow generators could be analyzed. Five Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs), one portable flow measurement system for pipes (PCM), one anemometer, one CTD probe and a time lapse camera were placed in ACI marina Opatija during the measuring periods. In order to conduct numerical research regarding wave energy transmission and water flow through culvert groups, the finite volume method is used which is based on Navier–Stokes equations inside an open source package called OpenFOAM. The numerical model will be validated using laboratory data previously attained. The two-phase Volume Of Fluid (VOF) interFoam model, which is an integral part of the OpenFOAM package, relies on the definition of an indicator variable to identify the boundary between fluids of different physical characteristics. The waves2Foam module was chosen to define and produce the boundary conditions for wave generation. Relaxation zones are used at the boundary of the domain in order to absorb incoming waves. This module supports most wave theories, including Stokes wave theories. Using the described numerical model different culvert group designs will be tested in order to examine the wave transmission and flow through culvert groups forced by surface waves. Another numerical model inside OpenFOAM was established and validated against field data and analytical model data, in order to test different culvert group designs for water flow due to tidal oscillation forcing. By setting the boundary conditions at each side of the culvert group to fixed water levels, water flow through the culvert group design is established. The results obtained from the numerical model will demonstrate the relationship between the water flow through the culvert group forced by tidal oscillations and culvert group design characteristics.



Functional analysis of the influence of particular wave parameters on the wave energy transmission and the seawater volume flow through the culvert group (using results obtained from laboratory and numerical investigations) revealed that the flux parameter was adequate for the estimation and prediction of the two conflicting culvert group effects. The parameters included in the flux parameter are wave height and length, the total cross-sectional area of the culvert group and culvert group length. Accordingly, it can be concluded that wave height and length are the dominant wave parameters that affect the wave energy transmission and the amount of seawater volume that flows through a culvert group due to waves. The optimal position of the culvert group relative to the mean sea level depends on the dominant circulation generator. If tidal oscillations account for the dominant portion of the seawater volume flowing through the culvert group for a particular location, then it is desirable to fully submerge the culvert group (water level W1). If waves account for the dominant portion of the seawater volume flowing through the culvert group for a particular location, then it is desirable to partially submerge the culvert group (water level W2). Taking into account the efficacy parameter for a particular flushing culvert group in achieving a trade-off between the two previously mentioned opposing culvert group effects (wave energy transmissions and seawater volume flow during a reference time), the most favorable culvert group designs can be determined depending on the oceanographic conditions at the marina location. In the case of waves accounting for the dominant share of the seawater volume of flowing through the culvert group, the culvert group with 4 circular culverts in one row proved to be most effective. The culvert group with 8 circular culverts in two rows proved to be the most effective in cases where the wave climate is relatively insignificant and thus tidal oscillations make up the dominant portion in the seawater volume flowing through the culvert group. The efficiency parameter decreases always (regardless of dominant circulation generator) with the increase of the flux parameter, which is determined using the wave parameters of the five-year return period wave and the culvert group design characteristics. It is possible to achieve a compromise between the transmission of wave energy and the sea volume flow through the culvert group during a reference time period. The favorable design of the culvert group that meets the efficiency criterion and thus the trade-off between opposing effects can be defined regardless of the dominant circulation generator through the culvert group for a particular location.

**KEYWORDS:** flushing culvert, waves, tidal oscillations, seawater renewal, breakwater

## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	PREGLED STANJA ZNANJA .....	7
2.1	Vrste onečišćenja mora .....	8
2.1.1	Cvjetanje algi.....	8
2.1.2	Naftna onečišćenja .....	11
2.1.3	Fekalno onečišćenje .....	13
2.1.4	Pesticidi i teški metali .....	15
2.2	Postojeća regulativa vezana uz stanje kakvoće mora.....	17
2.3	Analitičke metode procjene učinkovitosti redukcije koncentracije onečišćivača unutar akvatorija prirodnim procesima .....	23
2.3.1	Analitički obrasci procjene izmjene vode unutar akvatorija.....	23
2.3.2	Preporuke za tlocrtno oblikovanje marina/luka u obliku analitičkih obrazaca	28
2.3.3	Ograničenja analitičkih obrazaca .....	31
2.4	Hidrauličke karakteristike propusta .....	34
2.4.1	Izmjena mora kroz propust.....	36
2.4.1.1	Plimne oscilacije i vjetar kao generator cirkulacije .....	36
2.4.1.2	Valovi kao generator cirkulacije.....	40
2.4.1.3	Hidraulička svojstva propusta tijekom protjecanja vode .....	42
2.4.2	Transmisija energije valova kroz propust .....	43
3	PREDMET ISTRAŽIVANJA.....	47
4	METODOLOGIJA .....	50
4.1	Laboratorijska ispitivanja .....	54
4.1.1	Opis valnog kanala i modela lukobrana .....	54
4.1.2	Parametri valova.....	58

4.1.3	Mjerna oprema u laboratoriju.....	59
4.2	Terenska mjerenja .....	62
4.2.1	Lokacija mjerenja .....	62
4.2.2	Instrumenti korišteni u sklopu terenskih mjerenja .....	65
4.3	Anketiranje i terenski obilazak marina unutar Hrvatske .....	69
4.4	Numeričko modeliranje.....	70
4.4.1	Vladajuće jednadžbe numeričkog modela.....	70
4.4.1.1	Očuvanje mase .....	70
4.4.1.2	Očuvanje količine gibanja.....	74
4.4.2	Numerički model propusta pod utjecajem valova.....	78
4.4.2.1	Opis numeričkog modela za validaciju i numeričkog modela grupe propusta 80	
4.4.2.2	Opis diskretizirane mreže .....	83
4.4.2.3	Opis rubnih i početnih uvjeta.....	86
4.4.2.4	Sonde za mjerenje oscilacija vodnog lica i protoka unutar numeričkog modela	90
4.4.3	Numerički model propusta pod utjecajem plimnih oscilacija .....	92
4.4.3.1	Opis numeričkog modela za validaciju i numeričkog modela grupe propusta 92	
4.4.3.2	Opis diskretizirane mreže .....	94
4.4.3.3	Opis rubnih i početnih uvjeta.....	96
4.4.3.4	Sonda za mjerenje protoka unutar numeričkog modela.....	100
4.5	Statistički indikatori .....	101
5	OBRADA PODATAKA I REZULTATI.....	102
5.1	Laboratorijska ispitivanja .....	102
5.1.1	Transmisija valne energije uzrokovana spektralnim valovima .....	103
5.1.2	Brzine uzrokovane spektralnim valovima.....	107
5.1.2.1	Srednja brzina vode na izlazu iz propusta.....	108
5.1.2.2	Maksimalne brzine vode na izlazu iz propusta .....	109

5.1.3	Transmisija valne energije uzrokovane monokromatskim valovima.....	111
5.1.4	Brzina uzrokovana monokromatskim valovima .....	111
5.2	Terenska ispitivanja.....	113
5.2.1	Generatori cirkulacije .....	113
5.2.1.1	Plimne oscilacije .....	113
5.2.1.2	Vjetar.....	116
5.2.1.3	Valovi.....	118
5.2.1.4	Slatkovodni izvori.....	120
5.2.2	Komparacija generatora cirkulacije kroz propust .....	122
5.3	Anketiranje i obilazak terena.....	125
5.3.1	ACI marina Split .....	125
5.3.2	Lučica Zenta (Split).....	126
5.3.3	Usporedba ACI marine Split i lučice Zenta .....	126
5.4	Numeričko modeliranje valovanja .....	127
5.4.1	Validacija numeričkog modela.....	127
5.4.1.1	Validacija koeficijenta transmisije uzrokovnog monokromatskim valovima 127	
5.4.1.2	Validacija brzine vode uzrokovane monokromatskim valovima.....	130
5.4.2	Numerički model grupe propusta ugrađenih u lukobran pod utjecajem valova 131	
5.4.2.1	Periodičnost vremenske serije oscilacija razine vode transmitiranog vala	134
5.4.2.2	Utjecaj uronjenosti propusta na protok pod djelovanjem valova.....	135
5.4.2.3	Utjecaj uronjenosti propusta na transmisiju valne energije .....	139
5.4.2.4	Utjecaj dubine mora unutar propusta na protok pri djelovanju valova.....	140
5.4.2.5	Utjecaj dubine mora unutar propusta pod djelovanjem valova na koeficijent transmisije .....	142
5.4.2.6	Protok kroz grupu propusta postavljenu u dva reda.....	143
5.4.2.7	Transmisija valova kroz grupu propusta postavljenu u dva reda.....	145
5.4.2.8	Matematički obrasci za predviđanje protoka pod utjecajem valova.....	147

5.4.2.9	Matematički obrasci za predviđanje transmitirane valne energije.....	150
5.5	Numeričko modeliranja protjecanja kroz propust uzrokovanog plimnim oscilacijama	154
5.5.1	Validacija numeričkog modela pomoću analitičkog modela .....	154
5.5.2	Usporedba numeričkog modela i terenskih mjerenja.....	155
5.5.3	Numeričko modeliranje grupe propusta pod utjecajem plimnih oscilacija....	158
5.5.3.1	Prostorno polje brzina unutar i u okolici grupe propusta.....	159
5.5.3.2	Utjecaj većeg broja međusobno kratko udaljenih propusta unutar grupe propusta na protok kroz propust.....	161
5.5.3.3	Matematički obrasci za predviđanje protoka kroz grupu propusta uslijed plimnih oscilacija .....	163
6	RASPRAVA.....	167
6.1	Definiranje kriterija za povoljno oblikovanje grupe propusta .....	168
6.2	Određivanje kompromisnog geometrijskog oblikovanja grupe propusta s obzirom na oceanografske karakteristike proizvoljne lokacije .....	172
6.2.1	Određivanje dominantnog generatora cirkulacije za pojedine oceanografske uvjete na lokaciji .....	172
6.2.1.1	Plimne oscilacije kao dominantni generator cirkulacije kroz propust za proizvoljnu lokaciju.....	174
6.2.1.2	Valovi kao dominantni generator cirkulacije kroz propust za proizvoljnu lokaciju	176
6.2.2	Usporedba učinkovitosti propusta između različitih oblikovanja propusta ...	179
6.2.2.1	Usporedba učinkovitosti propusta ako su plimne oscilacije dominantni generator	179
6.2.2.2	Usporedba učinkovitosti propusta ako su valovi dominantni generator...	180
6.3	Odnos transmisije valne energije kroz propust i protok koji je uzrokovan istim valnim poljem	182
7	ZAKLJUČAK.....	184
7.1	Buduća istraživanja .....	187

---

POPIS LITERATURE .....	189
PRILOZI.....	202
1 Planovi difrakcije valova.....	203
2 Dijagrami za procjenu učinkovitosti grupe propusta .....	233
ŽIVOTOPIS AUTORA S POPISOM OBJAVLJENIH DJELA .....	244

## POPIS SLIKA

Slika 1 Onečišćenje uljima uočeno u marini Biograd, unutar grada Biograda (05. 07. 2018.) .....	12
Slika 2 Uzdužni presjek i tlocrtni pogled shematskog prikaza akvatorija proizvoljnog oblika s prikazom plimne prizme (engl. <i>tidal prism</i> ).....	23
Slika 3 Shematski prikaz CSTR modela (engl. <i>Continuous Stirred-Tank Reactor</i> ).....	25
Slika 4 Preporučena granične vrijednost omjera volumena plimne prizme ( $V_{po}$ ) i ukupnog volumena akvatorija ( $V_{AK}$ ) u trenutku plime za kvalitetnu izmjenu mora.....	28
Slika 5 Preporučene granične vrijednosti omjera dužine ( $L_{AK}$ ) i širine akvatorija ( $B_{AK}$ ).....	29
Slika 6 Preporučene granične vrijednosti parametra tlocrtnog oblika akvatorija ( $PF$ ) za krivocrtnu geometrija akvatorija marine ili luke .....	29
Slika 7 Preporuka omjera površine poprečnog presjeka ulaza ( $A_{ul}$ ) u zaštićeni akvatorij i površina akvatorija ( $P_{AK}$ ) .....	30
Slika 8 Tipovi propusta ovisno o obliku poprečnog presjeka: cijevni, pločasti i kanalski.....	34
Slika 9 Propust kružnog poprečnog presjeka u ACI marini Vodice (gore), pravokutnog poprečnog presjeka u ACI marini Split (sredina) i kanalskog poprečnog presjeka u komunalnoj lučici Vitrenjak (dolje) .....	35
Slika 10 Utjecaj omjera površine poprečnog presjeka pravokutnog pločastog propusta i ulaza u luku ( $A_{pr}/A_{ul}$ ) na srednju koncentraciju konzervativnog traseru ( $C_{sr}$ ) nakon 24 sata simulacije. Simulacija uključuje djelovanje vjetra i oscilacije plime i oseke za vjetrove iz smjerova sektor 1 (plava, NW-W-SW) i sektor 2 (crvena, SE-E-NE). $C_{sr-sek1} = 1/3s \cdot (C_{NW} + C_W + C_{SW})$ ; $C_{sr-sek2} = 1/3 \cdot (C_{SE} + C_E + C_{NE})$ ; bez vjetra (crna) (Carević i ostali, 2019).....	38
Slika 11 Shematski prikaz laboratorijskog modela propusta kakav se implementira u istočnoj Aziji (Japan i J. Koreja) koji se sastoji od uronjenog lukobrana ispred vertikalnog zida s ugrađenim propustom (prilagođeno od (Ohmura, 2007, 2009; Kim i ostali, 2011)).....	42
Slika 12 Shematski prikaz laboratorijskog modela u svrhu ispitivanja utjecajnih čimbenika na penetraciju valne energije kroz propust koji je pozicioniran tako da os propusta odgovara srednjoj razini mora (prilagođeno od (Tsoukala i Moutzouris, 2009b)).....	44
Slika 13 Shematski prikaz difrakcije vala koji nema interakciju s gornjim rubom propusta (prilagođeno od (Belibassakis i ostali, 2014)).....	45
Slika 14 Valni kanal unutar Hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta .....	54
Slika 15 Nacrt valnog kanala i ugrađene opreme, te fizičkog modela lukobrana s ugrađenim propustom s ucrtanom mjernom pozicijom brzine vode na izlazu iz propusta i mjernim pozicijama razine vode ispred i iza modela lukobrana; Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta.....	55
Slika 16 Valni generator tipa „piston“ na početku valnog kanala (lijevo) i disipacijska komora za smanjenje refleksije valne energije (desno) .....	56
Slika 17 Model lukobrana s ugrađenim propustom kružnog poprečnog presjeka.....	57

Slika 18 Incidenti val koji djeluje na fizički model lukobrana u slučaju kada je propust u potpunosti uronjen (W1) .....	57
Slika 19 ADV uređaja za mjerenje brzine u točki i kapacitivne sonde G5, G6 i G7 za mjerenje valnih parametara na stražnjoj strani modela lukorana s ugrađenim potpuno uronjenim (razina W1) propustom kružnog poprečnog presjeka promjera koji iznosi 10 cm .....	60
Slika 20 Lokacija ACI marine Opatije u okviru jugoistočne Europe.....	62
Slika 21 Propusti kružnog poprečnog presjeka ugrađeni u lukobran u ACI marini Opatija (autor fotografije: Dalibor Carević).....	63
Slika 22 Uzdužni presjek kroz propust u ACI marini Opatija (Slika 21) s prikazanim mjernim uređajima ADCP 2, CTD i PCM (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2).....	63
Slika 23 Tlocrtni prikaz ACI marine Opatija s pripadnim pozicijama instrumenata za mjerenje za zimsko razdoblje mjerenja (15.2.2017 – 31.3.2017) (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2).....	64
Slika 24 Tlocrtni prikaz ACI marine Opatija s pripadnim pozicijama instrumenata za mjerenje za ljetno razdoblje mjerenja (4.7.2017 – 31.8.2017) (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2).....	64
Slika 25 Mjerni instrumenti (ADCP, PCM, CTD, anemometar i kamera) postavljeni na odgovarajuće pozicije u ACI marini Opatija (autor fotografije: Krunoslav Zubčić) .....	66
Slika 26 Prikaz lokacija marina i lučica za koje je proveden terenski obilazak .....	69
Slika 27 Kontrolni volumen tekućine s prikazanim vektorima masenog protoka u/iz kontrolnog volumena.....	71
Slika 28 Kontrolni volumen tekućine s prikazanim vektorima vanjskih sila koje djeluju na kontrolni volumen .	75
Slika 29 Shematski prikaz funkcioniranja VOF metode za definiranje granice između pojedinih tekućina različitih fizičkih svojstva .....	79
Slika 30 Prikaz domene numeričkih modela za validaciju i ispitivanje grupe propusta .....	81
Slika 31 Poprečni presjeci ispitivanih tipova grupe propusta s prikazanim razinama za potpuno uronjenu grupu propusta (W1) i djelomično uronjenu grupu propusta (W2), te površinom ( $A_{pr}$ ).....	82
Slika 32 Poprečni presjek diskretizirane mreže na lokaciji propusta .....	83
Slika 33 Uzdužni presjek diskretizirane mreže .....	84
Slika 34 Usitnjavanje ispred i iza lukobrana unutar numeričkog modela .....	85
Slika 35 Shematski prikaz područja generacije valova (I) i područja umirenja valova (II) .....	87
Slika 36 Prikaz područja relaksacije za modele validacije i ispitivanja grupe propusta .....	89
Slika 37 Pozicije numeričkih sonde unutar zaštićenog akvatorija dužine 3 m i širine 2 m (ne uključuje dio numeričke mreže gdje se obavlja relaksacija vala odnosno umirenje valne energije); mreža postavljenih numeričkih sonde se sastoji od 30 stupaca i 21 reda.....	91
Slika 38 Shematski prikaz numeričkog modela protjecanja pod utjecajem plimnih oscilacija.....	93
Slika 39 Prikaz kako razina vodnog lica utječe na visinu diskretizacijske mreže; grupa propusta od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka promjera 1 m u jednom redu (grupa propusta (a)) za razinu vodnog lica koja iznosi 1,4 m iznad donjeg ruba propusta .....	94



Slika 40 Prikaz kako razina vodnog lica utječe na visinu diskretizacijske mreže; grupa propusta od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka promjera 1 m u jednom redu (grupa propusta (a)) za razinu vodnog lica koja iznosi 0,8 m iznad donjeg ruba propusta .....	95
Slika 41 Fotografija dinamike pronosa valne energije za situacije gdje je: a) propust kružnog poprečnog presjeka u potpunosti potopljen (W1), b) propust kružnog poprečnog presjeka djelomično potopljen (W2).....	103
Slika 42 Koeficijenti transmisije energije valova ( $K_t$ ) kroz propust na sondama G5 – G8, za razine vodnog lica W1, W2 i W3 (promjer propusta kružnog poprečnog presjeka iznosi 10 cm i dužina propusta 92 cm); (Carević i ostali, 2018) .....	104
Slika 43 Krivulje koeficijentata transmisije ( $K_t$ ) za slučajeve pločastih i cijevnih samostalnih propusta ugrađenih u tijelo lukobrana prema uronjenosti propusta (W1, W2 i W3) (Carević i ostali, 2018) .....	106
Slika 44 Vremenska serija mjerene brzine ( $v_{iz}$ ) pomoću ADV uređaja na izlazu iz propusta; prikazana je vrijednost komponente vektora brzine koja je paralelna smjeru pružanja propusta; prikaz mjernih vrijednosti za test 6 (Tablica 7) za potpuno uronjen propust (W1) i djelomično uronjen propust (W2); pozitivna vrijednost smjera označava ulazak u zaštićeni akvatorij kroz propust, a negativna izlazak (Bujak i ostali, 2017).....	107
Slika 45 Odnos zajedničke bezdimenzijske varijable sačinjene od druge, treće, četvrte i pete $\pi$ grupe naspram prve $\pi$ grupe koja sadrži srednju brzinu; Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta, W – razina vode; (Bujak i ostali, 2017) .....	108
Slika 46 Odnos zajedničke bezdimenzijske varijable sačinjene od druge, treće, četvrte i pete $\pi$ grupe naspram prve $\pi$ grupe koja sadrži maksimalnu brzinu ( $v_{iz,0,9}$ kvantil); Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta, W – razina vode .....	110
Slika 47 Vremenska serija dubine ( $h$ ) unutar akvatorija ACI marine Opatija mjerene pomoću ADCP 5 i nagiba razine vodnog lica koji se ostvaruje kroz propust (N1); pozitivna vrijednost nagiba N1 uzrokuje ulazak morske vode u akvatorij, a negativna vrijednost nagiba N1 izlazak iz akvatorija (Slika 49).....	114
Slika 48 Usporedba nagiba koji se ostvaruje između ADCP 2 i ADCP 5 (N2)(unutar akvatorija), te ADCP 1 i ADCP 2 (N1)(kroz propust); pozitivna vrijednost nagiba uzrokuje ulazak morske vode u akvatorij, a negativna vrijednost nagiba izlazak iz akvatorija (Bujak i ostali, 2018) .....	114
Slika 49 Očekivani smjer cirkulacije mora za vrijeme plime i oseke ustanovljen na temelju informacije o nagibima, ako nisu prisutni ostali prirodni generatori cirkulacije koji mogu utjecati na sliku (Bujak i ostali, 2018).....	115
Slika 50 Raspodjela mjerenih visinskih razlika razina mora ( $\Delta H$ ) između dviju strana propusta koji se pojavljuje tijekom ljeta i zime.....	116
Slika 51 Ruže vjetrova temeljene na mjerenjima provedenim pomoću anemometra na glavi lukobrana tijekom zimskog (15. 2. 2017. - 31. 3. 2017.) i ljetnog razdoblja (4. 7. 2017. - 31. 8. 2017.); izvedene ruže odnose se na satno osrednjene vrijednosti brzine vjetra .....	117
Slika 52 Ruže valova temeljene na mjerenjima provedenim pomoću ADCP 1 koji se nalazi ispred propusta tijekom zimskog (15. 2. 2017. - 31. 3. 2017.) i ljetnog razdoblja (4. 7. 2017. - 31. 8. 2017.); izvedene ruže odnose se na satno osrednjene vrijednosti valnih visina.....	119

Slika 53 Vremenska serija padalina koje su zabilježene na meteorološkoj postaji u Rijeci tijekom zimskog i ljetnog mjernog razdoblja, te mjerenja saliniteta po visini u neposrednoj blizini propusta (visina mjerena od površine prema nižem) .....	121
Slika 54 Vremenska serija brzine vjetra ( $u_v$ ) mjerena anemometrom postavljenim na glavu lukobrana i kumulativni volumen koji je cirkulirao kroz jedan propust ( $V_{iz}$ ) mjereno pomoću PCM uređaja tijekom zimskog i ljetnog razdoblja mjerenja; negativna vrijednost se pridaje izlasku morske vode kroz propust iz marine, a pozitivna ulasku morske vode kroz propust u marinu .....	122
Slika 55 Udjeli volumena morske vode koje je pojedini generator cirkulacije uzrokovao kroz propust ugrađen u lukobran na lokaciji ACI marine Opatija (zajednički prikaz za ljeto i zimu).....	124
Slika 56 ACI marina Split; a) pločasti propust – pop. površina = 0,8 m <sup>2</sup> ; b) pločasti propust – pop. površina = 4,2 m <sup>2</sup> ; c) pločasti propust – pop. površina = 5,3 m <sup>2</sup> ; d) pločasti propust – pop. površina = 12 m <sup>2</sup> .....	125
Slika 57 Gradska lučica Zenta u Splitu u kojoj nema propusta; mrtva zona – crveni poligon.....	126
Slika 58 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) koji se generira na ulaznom rubnom uvjetu prema testu 7 (Tablica 13) (valna visina incidentnog vala iznosi 0,12 m, a period incidentnog vala iznosi 0,88 s) za situaciju djelomično uronjenog propusta (W2) .....	128
Slika 59 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) za sondu G7 (Slika 15) prema testu 7 (Tablica 13) (valna visina incidentnog vala iznosi 0,12 m, a period incidentnog vala iznosi 0,88 s) za situaciju djelomično uronjenog propusta (W2).....	128
Slika 60 Validacija koeficijenata transmisije dobivenih kroz numerički model ( $K_{t,num}$ ) u odnosu na mjerene vrijednosti u okviru laboratorijskih ispitivanja ( $K_{t,fiz}$ ) za sonde G6, G7 i G8 (Slika 15) .....	130
Slika 61 Validacija brzina vode dobivenih kroz numerički model ( $v_{iz,num}$ ) u odnosu na mjerene vrijednosti u okviru laboratorijskih ispitivanja ( $v_{iz,fiz}$ ) bilježene pomoću ADV uređaja (Slika 15) .....	131
Slika 62 Trodimenzionalni prikaz proračunatog numeričkog modela valovanja za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s.....	132
Slika 63 Polje koeficijenata transmisije unutar zaštićenog područja za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda, promjera koji iznosi 1 m i dužine koja iznosi 10 m (prikazano na Slika 62); tlocrtna os grupe propusta postavljena je na koordinatama (0,10) te je smjer grupe propusta paralelan sa smjerom apscise; crveno crtanom linijom je označeno područje unutar kojeg se računa srednji koeficijent transmisije; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s.....	133
Slika 64 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) koji se generira pri ulaznom rubnom uvjetu i razine vodnog lica na lokaciji sonde G7 za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda u slučaju kada je propust djelomično potopljen; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s ..	135
Slika 65 Vremenska serija protoka ( $Q_w$ ) kroz propust uzrokovanog valovima mjenjenog na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (b) u slučaju kada je propust u potpunosti potopljen i djelomično potopljen; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,07 s .....	136
Slika 66 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) prema vremenski osrednjenom protoku kroz propusta pod utjecajem valova ( $Q_{w,sr}$ ) za sve testove provedene na grupi propusta (a); $FP$ je definiran jednadžbom (55); u prirodnom mjerilu	136

Slika 67 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka tijekom pojave grebena vala (b); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s.....	137
Slika 68 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka tijekom druge polovice perioda vala (b); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s .....	138
Slika 69 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) prema srednjoj transmitiranoj valnoj visini određenoj unutar mjernog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) kroz propust pod utjecajem valova za sve testove provedene na grupi propusta (a); $FP$ je definiran jednadžbom (55), u prirodnom mjerilu.....	139
Slika 70 Vremenska serija protoka kroz propust uzrokovanog valovima ( $Q_w$ ) mjerenog na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (b) i (d); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s.....	140
Slika 71 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka (b) i propust pravokutnog poprečnog presjeka veće visine (d); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s .....	141
Slika 72 Odnos dubine unutar propusta ( $h_{pr}$ ) i valne visine incidentnog vala ( $H_i$ ) naspram neto protoka kroz propust uzrokovanog valovima ( $Q_{w,sr}$ ) za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja djelomično uronjene grupe propusta (W2) (Tablica 10); u prirodnom mjerilu.....	142
Slika 73 Odnos dubine unutar propust ( $h_{pr}$ ) i valne visine incidentnog vala ( $H_i$ ) naspram srednjeg koeficijentu transmisije unutar mjernog područja ( $K_t$ ) (Slika 63) za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja djelomično uronjene grupe propusta (W2) (Tablica 10); u prirodnom mjerilu.....	143
Slika 74 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust kružnog poprečnog presjeka u dva reda (c); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s.....	144
Slika 75 Vremenska serija protoka ( $Q_w$ ) kroz propust uzrokovanog valovima mjerenog na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (a) i (c) pod utjecajem valova (visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s).....	144
Slika 76 Polje koeficijenata transmisije unutar zaštićenog područja za grupu propusta (a) i (c); tlocrtna os grupe propusta postavljena je na koordinatama (0,10), te je smjer grupe propusta paralelan s smjerom apscise; val valne visine 0,09 m i period 1,32 s .....	146
Slika 77 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i neto protoka ( $Q_{w,sr}$ ) kroz propust uzrokovanog valovima za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja grupe propusta; prirodno mjerilo.....	147
Slika 78 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i srednje transmitirane valne visine unutar prethodno definiranog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) za pojedine testove po pojedinim ispitivanim oblikovanjima grupe propusta provedene u okviru numeričkog modeliranja; u prirodnom mjerilu .....	150
Slika 79 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i srednje transmitirane valne visine unutar prethodno definiranog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) za pojedine provedene testove za grupe propusta.....	151
Slika 80 Usporedba protoka određenog pomoću numeričkog modela ( $Q_{po,num}$ ) opisanog u poglavlju 4.4.3 i analitičke jednadžbe ( $Q_{po,anal}$ ) (9).....	155
Slika 81 Fotografija slijeganja cijevnih sekcija propusta u ACI marini Opatija što može utjecati na protočnost kroz propust uslijed plime i oseke.....	156
Slika 82 Uzdužni presjek numeričkog modela propusta s izmaknutim sekcijama po uzoru na propust u ACI marini Opatija pod utjecajem plimnih oscilacija .....	156

Slika 83 Usporedba protoka kroz potpuno uronjenu grupu propusta uslijed plimnih oscilacija kod hidraulički idealnog i oštećenog propusta (ACI marina Opatija), $\Delta H = 0,0026$ m, dužina propusta iznosi 18 m, apsolutna hrapavost 2 cm .....	158
Slika 84 Prostorna raspodjela relativne visine vodnog lica i vektora brzine za grupu propusta koja se sastoji od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu, odnosno grupa propusta (a) za zadanu konstantnu visinsku razliku vodnog lica u iznosu od 0,005 m .....	160
Slika 85 Shematski prikaz strujne slike na izlazu iz jednog samostalnog propusta i grupe propusta gdje su propusti položeni u jednom redu .....	161
Slika 86 Shematski prikaz strujne slike na izlazu iz grupe propusta gdje su propusti položeni u jednom redu i grupe propusta gdje su propusti položeni u dva reda .....	162
Slika 87 Odnos protoka kroz grupu propusta ( $Q_{po}$ ) (Slika 31) prema površini poprečnog presjeka ( $A_{pr}$ ) za konstantnu uronjenost propusta (ovdje potpuno uronjeni propust – W1), duljinu propusta od 10 m i apsolutnu hrapavost od 0,005 m (što je istovjetno Manningovom koeficijentu u iznosu od 0,016 definiranom pomoću jednadžbe (44)) .....	163
Slika 88 Odnos protoka ( $Q_{po}$ ) kroz sve grupe propusta (Slika 31) normaliziranog pomoću varijabli površine poprečnog presjeka propusta ( $A_{pr}$ ) i udjela uronjenog djela poprečnog presjeka propusta ( $w_{pr}$ ) naspram visinskoj razlici vodnog lica ( $\Delta H$ ) za konstantnu duljinu propusta od 10 m i apsolutnu hrapavost od 0,005 m (što je istovjetno Manningovom koeficijentu u iznosu od 0,016 definiranom pomoću jednadžbe (44)).....	164
Slika 89 Propust pravokutnog poprečnog presjeka u ACI marini Split.....	169
Slika 90 Odnos između specifičnog dnevnog volumena prema generatoru ( $V_{dn,spec}$ ) koji je uzrokovan plimnim oscilacijama pri potpuno uronjenoj grupi propusta (W1) i valovima u kombinaciji s plimnim oscilacijama pri djelomično uronjenoj grupi propusta (W2) naspram srednjeg fluks parametra ( $FP_{sr}$ ) za grupu propusta (c).....	173
Slika 91 Odnos učinkovitosti ( $U$ ) grupe propusta (c) određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovanim plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ) za proizvoljnu lokaciju .....	175
Slika 92 Odnos učinkovitosti ( $U$ ) grupe propusta (c) određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovanim valovima srednje valne klime i plimnim oscilacijama zajedno i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ) za proizvoljnu lokaciju .....	178
Slika 93 Usporedba učinkovitosti ( $U$ ) potpuno uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ).....	179
Slika 94 Usporedba učinkovitosti ( $U$ ) djelomično uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m i srednje valne klime s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ).....	181
Slika 95 Odnos između koeficijenta transmisije ( $K_t$ ) i srednjeg neto protoka ( $Q_{w,sr}$ ) koji se ostvaruje kroz grupu propusta za pojedine valne parametre incidentnog valnog polja.....	182

Slika 96 Odnos između valne visine transmitiranog vala ( $H_t$ ) i srednjeg protoka ( $Q_{w,sr}$ ) koji se ostvaruje kroz grupu propusta za pojedine valne parametre incidentnog valnog polja..... 183

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Preporučene granične vrijednosti parametra vala koji nailazi na vez u ovisnosti o dužini privezanog plovila prema PIANC (PIANC, 1995).....	6
Tablica 2 Granične vrijednosti pokazatelja eutrofikacije u priobalnim vodama prema Uredbi o standardu kakvoće vode (Vlada Republike Hrvatske, 2018).....	11
Tablica 3 Tipovi priobalnih i prijelaznih voda.....	17
Tablica 4 Normativne definicije kategorija ekološkog stanja priobalnih voda prema biološkim elementima (Vlada Republike Hrvatske, 2018).....	18
Tablica 5 Granične vrijednosti kategorija ekološkog stanja za osnovne fizikalno-kemijske pokazatelje – vrijednost 50-og percentila (Vlada Republike Hrvatske, 2018).....	21
Tablica 6 Granične vrijednosti kategorija ekološkog stanja za biološke elemente kakvoće, izražene kao omjer ekološke kakvoće (Uredba o standardu kakvoće vode) .....	22
Tablica 7 Parametri spektralnih valova pojedinog testa koji su primijenjeni tijekom laboratorijskih ispitivanja unutar valnog kanala .....	58
Tablica 8 Parametri monokromatskih valova pojedinog testa koji su primijenjeni tijekom laboratorijskih ispitivanja unutar valnog kanala koji će služiti za buduću validaciju numeričkog modela .....	59
Tablica 9 Učestalost uzorkovanja i zapisivanja mjerenih vrijednosti po pojedinim instrumentima raspoređenih u ACI marini Opatija.....	68
Tablica 10 Parametri monokromatskih valova koji su primijenjeni tijekom ispitivanja grupe propusta unutar numeričkog modela.....	88
Tablica 11 Testovi za validaciju numeričkog modela s obzirom na tečenje kroz propust uslijed plimnih oscilacija .....	98
Tablica 12 Testovi za ispitivanje numeričkog modela grupe propusta s obzirom na tečenje kroz propust uslijed plimnih oscilacija .....	99
Tablica 13 Rezultati laboratorijskih ispitivanja u slučaju nailaska monokromatskih valova koji uključuju koeficijente transmisije bez separacije incidentnih i reflektiranih valova.....	111
Tablica 14 Rezultati laboratorijskih ispitivanja u slučaju nailaska monokromatskih valova koji uključuju srednje brzine na izlazu iz propusta.....	112
Tablica 15 Statistički podaci raspodjele visinske razlike ( $\Delta H$ ) između dviju strana propusta koji se pojavljuje tijekom ljeta i zime (Slika 50).....	116
Tablica 16 Rezultati osrednjenog neto protoka kroz grupu propusta koristeći se numeričkim modelom valovanja; rezultati prikazani u prirodnom mjerilu .....	148
Tablica 17 Rezultati srednje transmisije valne energije unutar mjernog područja (Slika 63) kroz grupu propusta koristeći se numeričkim modelom valovanja; rezultati prikazani u prirodnom mjerilu.....	152

Tablica 18 Normalizirani ukupni protoci kroz grupe propusta koristeći protok kroz jedan samostalni propust ugrađen u tijelo lukobrana; promjer pojedinog propusta kružnog poprečnog presjeka iznosi 1 m, dužina 10 m i međusobni razmak 0,5 m .....	162
Tablica 19 Rezultirajući protoci za sve provedene testove na grupe propusta (Slika 31) pod utjecajem plimnih oscilacija .....	165

## POPIS KORIŠTENIH FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka fizikalne veličine	Naziv fizikalne veličine	Oznaka mjerne jedinice
$A_{pr}$	površina poprečnog presjeka propusta/grupe propusta	m <sup>2</sup>
$A_{ul}$	površina poprečnog presjeka ulaza u akvatorij	m <sup>2</sup>
$B_{AK}$	širina akvatorija	m
$B_{pr}$	širina propusta	m
$B_{ul}$	širina ulaza u akvatorij	m
$b$	udio povratne vode u akvatorij (engl. <i>return flow</i> )	1
$C(t)$	koncentracija pasivnog trasera	1
$C_0$	početna koncentracija unutar akvatorija	1
$C_d$	koeficijent prijenosa sile uzrokovane vjetrom na površinu mora	1
$C_i$	koncentracija nakon $nT$ perioda plimnih oscilacija	1
$Co$	Courantov broj	1
$C_{sr}$	srednja koncentracija unutar akvatorija	1
$C_S, C_W \dots$	srednja koncentracija u akvatoriju uslijed vjetra iz S, W ...	1
$c$	brzina faze vala	m/s
$c_a$	brzina akustičnog vala	m/s
$D_{pr}$	promjer propusta kružnog presjeka	m
$E$	koeficijent izmjene mora	1
$FP$	fluks parametar	1
$FP_{sr}$	fluks parametar srednje valne klime	1
$FP_{PP5}$	fluks parametar valne klime petogodišnjeg povratnog razdoblja	1
$f$	vanjske sile	N



$f_a$	frekvencija akustičnog vala	Hz
$f_w$	frekvencija vala	Hz
$H_i$	valna visina incidentnog vala	m
$H_{i-sr}$	valna visina srednjeg incidentnog vala	m
$H_{i-PP5}$	valna visina incidentnog vala petogodišnjeg povratnog razdoblja	m
$H_s$	valna visina nepravilnog/spektralnog vala	m
$H_{s-i}$	valna visina incidentnog nepravilnog/spektralnog vala	m
$H_{s-t}$	valna visina transmitiranog nepravilnog/spektralnog vala	m
$H_t$	valna visina transmitiranog vala	m
$h$	dubina mora	m
$h_{pr}$	dubina unutar propusta	m
$g$	gravitacijska konstanta	m/s <sup>2</sup>
$I$	slatkovodni dotok u akvatorij	m <sup>3</sup>
$i$	nagib vodnog lica	1
$K_t$	koeficijent transmisije valne energije	1
$k$	valni broj	1/m
$k_s$	apsolutna hrapavost	m
$k_{ul}$	koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu u propust	1
$k_{iz}$	koeficijent lokalnog gubitka energije na izlazu iz propusta	1
$L$	dužina vala	m
$L_{AK}$	dužina akvatorija	m
$L_p$	dubokovodna valna dužina za vršni period $T_p$	m
$L_{pr}$	dužina propusta	m
$M_0$	površina ispod krivulje spektra energije valnog polja	m <sup>2</sup>
$m$	masa	kg
$N$	nagib vodnog lica	m/m
$n$	Manningov koeficijent hrapavosti	s/m <sup>1/3</sup>
$\bar{n}$	jedinični vektor normale na plohu	1
$n_T$	broj ciklusa plimnih oscilacija	1

$P$	količina padalina	mm
$P_{AK}$	tlocrtna površina akvatorija	m <sup>2</sup>
$PF$	faktor tlocrtnog oblika akvatorija (engl. <i>planform factor</i> )	1
$P_v$	snaga energije vjetra prenijeta na površinu mora	W
$p$	tlak	Pa
$p_{AK}$	tlocrtni opseg akvatorija	m
$Q_{AK}$	protok kroz akvatorij	m <sup>3</sup> /s
$Q_{po}$	protok kroz propust uzrokovan plimnim oscilacijama	m <sup>3</sup> /s
$Q_{pr}$	protok kroz propust	m <sup>3</sup> /s
$Q_w$	protok kroz propust uzrokovan valovima	m <sup>3</sup> /s
$Q_{w.sr}$	srednji protok kroz propust uzrokovan valovima	m <sup>3</sup> /s
$q_w$	bez dimenzijski protok kroz propust uzrokovan valovima	1
$R_{pr}$	hidraulički radijus propusta	m
$S$	oplošje kontrolnog volumena	m <sup>2</sup>
$S_E$	standardna devijacija izmjene mora po prostoru	1
$S_M$	volumne sile na kontrolni volumen	N
$S_v$	salinitet vode	psu
$S_{\eta\eta}$	spektralna gustoća vala	m <sup>2</sup> s
$T$	period vala	s
$T_{po}$	period plimnih oscilacija	s
$T_f$	vrijeme izmjene morske vode akvatorija	s
$T_p$	vršni period nepravilnog/spektralnog vala	s
$T_v$	temperatura vode	°C
$T_z$	temperatura zraka	°C
$t$	vrijeme	s
$U$	učinkovitost propusta	1
$u$	komponenta vektora brzine u smjeru x-osi	m/s
$u_v$	veličina vektora brzine vjetra	m/s
$u_{10m}$	brzina vjetra na visini od 10 m	m/s
$V$	volumen kontrolnog volumena	m <sup>3</sup>

$V_{AK}$	volumen akvatorija	$m^3$
$V_{iz}$	volumen izmijenjenog mora kroz propust	$m^3$
$V_{po}$	volumen plimne prizme (engl. <i>tidal prism</i> )	$m^3$
$V_{spec,dn}$	specifični dnevni volumen mora koji protječe kroz propust	$m^3$
$v$	komponenta vektora brzine u smjeru y-osi	m/s
$\vec{v}$	vektor brzine	m/s
$v_{pr}$	srednja brzina vode u propustu	m/s
$\vec{v}_r$	numerički vektor brzina za oštru granicu između faza	m/s
$v_c$	brzina čestice u moru	m/s
$v_{iz}$	brzina vode na izlazu iz propusta	m/s
$w$	komponenta vektora brzine u smjeru z-osi	m/s
$w_{pr}$	koeficijent uronjenosti	1
$\alpha$	indikator parametar faze tekućine (voda ili zrak)	1
$\alpha_w$	kut nailaska vala s obzirom na smjer propusta	°
$\Delta H$	visinska razlika između dviju strane propusta	m
$\Delta t$	vremenski korak numeričkog modela	s
$\Delta x$	dužina brida diskretizirane mreže u smjeru x-osi	m
$\Delta y$	dužina brida diskretizirane mreže u smjeru y-osi	m
$\Delta z$	dužina brida diskretizirane mreže u smjeru z-osi	m
$\eta$	izdizanje vodnog lica od razine mirne vode	m
$\mu$	dinamička viskoznost	kg/(m·s)
$\mu_v$	dinamička viskoznost vode	kg/(m·s)
$\mu_z$	dinamička viskoznost zraka	kg/(m·s)
$\zeta$	lokalna varijabla za rubni uvjet numeričkog modela valovanja	m
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_v$	gustoća vode	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_z$	gustoća zraka	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	posmično naprezanje	N/m <sup>2</sup>
$\tau_v$	posmično naprezanje uslijed vjetra na površinu mora	N/m <sup>2</sup>
$\phi$	polje fizikalne veličine	/

---

$\chi$	ponder za rubni uvjet numeričkog modela valovanja	1
$\psi$	ciljana vrijednost rubnog uvjeta numeričkog modela valovanja	/

# 1 UVOD

Svjetska populacija je sredinom 2017. godine procijenjena na 7,6 milijardi stanovnika (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2017). Iako se godišnji prirast populacije svake godine smanjuje, očekuje se nastavak rastućeg trenda ljudske populacije (godišnji prirast svjetske populacije je 2005. godine iznosio 1,25 %, a 2016. godine 1,1 %). Prema medijanu aktualnih projekcija, svjetska populacija će 2050. godine brojiti 9,7 milijardi ljudi, a 2100. godine 11,1 milijardi ljudi (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2017). Uz brzi rast broja ljudske populacije, predviđan je nadalje iznimno heterogen prostorni raspored populacije. U posljednjim desetljećima veliki udio svjetske populacije je koncentriran u gradovima, a mnogi veliki svjetski gradovi se nalaze u priobalnom području (Timmerman i White, 1997; Smart i Smart, 2003). Trenutno 60 % svjetske populacije obitava na udaljenosti do 100 km od obale, te se očekuje uvećanje udjela stanovništva u priobalnom pojasu do 75 % svjetske populacije do 2025. godine (European Environment Agency, 2006; Airoidi i Beck, 2007). Gustoća naseljenosti u priobalnom području je u prosjeku 3 puta veća

nego prosječna globalna naseljenost (Small i Nicholls, 2003). Velika koncentracija stanovništva u priobalnom području stvara značajne pritiske na more i priobalno kopneno područje kroz turističke, komercijalne i druge aktivnosti (Bulleri i Chapman, 2010). Priobalna područja su često pod velikim utjecajem masovnog turizma koji sezonski stvara dodatne antropogene pritiske. Primjerice, na obalu Mediteranskog mora će godišnje stizati 350 milijuna turista prema projekcijama do 2025. godine, što čini dodatni značajni pritisak na priobalni ekosustav (Hinrichsen, 1998).

Veća izgrađenost nije prisutna samo na priobalnom području kao posljedica velike koncentracije stanovništva u blizini obale, nego i u samom obalnom području čime se znakovito utječe na obalni krajolik i ekosustav koji obitava na granici kopna i mora. Povećanjem koncentracije stanovništva na obali, vrijednost obalnog teritorija raste, te se najčešće infrastrukturom (građevinskim tehničkim mjerama i zahvatima) pokušava spriječiti gubitak vrijedne kopnene površine uslijed prirodnih erozijskih procesa koje uzrokuju morski vjetrovni valovi. Gradnja obalnih zidova i kamenih obaloutvrda na pokosima obala radi umanjenja i sprječavanja erozije obale je standardni postupak, naročito u područjima gdje je vrijednost obalnog teritorija visoka (Davis *i ostali*, 2002; Airoidi i Beck, 2007). U budućnosti se očekuje još intenzivnija gradnja infrastrukturnih objekata u svrhu sprječavanja sve snažnije erozije radi izdizanja srednje razine mora i češćih vremenskih nepogoda uzrokovanih globalnim zatopljenjem (Michener *i ostali*, 1997; Thompson *i ostali*, 2002). Klimatske promjene poput izdizanja srednje razine mora prijete ponajprije državama u razvoju zbog manjka infrastrukture kojom se umanjenju nepovoljna djelovanja prirode i državama s izrazitom ekonomskom ovisnosti o turizmu (Scott *i ostali*, 2012).

Građevinska infrastruktura je nadalje potrebna na obali u obliku čvorišta (luka i terminala) za prijevoz ljudi i roba (dobara). Transport dobara putem mora je bitan čimbenik u svjetskoj trgovini i jedan od ključnih pokretača globalizacije. Procijenjeno je da se 80 % svjetske trgovine po volumenu i 70 % po ekonomskoj vrijednosti transportira morem (UNCTAD, 2013). Zbog važne uloge luka, kao lokacije gdje dobra prelaze granicu kopna i mora, može se očekivati daljnje korištenje, ekspanzija i gradnja luka i pripadajuće infrastrukture na obalama. Osim za prijevoz dobara i trgovinu, plovila se koriste u svrhu ribarstva, te nautičarske i turističke namjene. Rastom koncentracije stanovništva na obali i turizma, raste i potražnja za vezove kako bi plovila bila zaštićena od nepovoljnih prirodnih djelovanja.

Posljedično se povećava intenzitet gradnje marina što ostvaruje još veću izgrađenost u obalnom području (Airoldi i Beck, 2007).

Rastom sektora turističke i komercijalne plovidbe, uz nepovoljna djelovanja klimatskih promjena i sve većeg udjela svjetske populacije koja obitava u blizini mora može se očekivati sve veći antropogeni pritisak na priobalnom teritoriju i akvatoriju. Antropogeni pritisak se vrši na ekosustav kroz izmjenu staništa samim građenjem infrastrukture i onečišćenja koja se kontrolirano ili nekontrolirano ispuštaju u mora (Bulleri i Chapman, 2010; Piroddi *i ostali*, 2015). Antropogena onečišćenja se mogu manifestirati tijekom manipulacije osjetljivih dobara poput nafte i njezino izlivanje u lučkim akvatorijima, kroz oštećenja kanalizacijskih cijevi u blizini obale kroz koja se ispušta nepročišćena otpadna voda koja može sadržavati bakterije i viruse, preko oborinske odvodnje s cesta, krovova i drugih nepropusnih površina u urbanim sredinama koja mogu sadržavati teške metale, te štetnim cvjetanjem algi uslijed povećane koncentracije nutrijenata u moru i prikladne temperature za razmnožavanje fitoplanktona (Recreational navigation Commission, 2008; Ignatiades i Gotsis-Skretas, 2010; Yilmaz *i ostali*, 2014; Valdor *i ostali*, 2015; Xie *i ostali*, 2017).

Antropogeni utjecaji se mogu manifestirati u jačem intenzitetu ukoliko je akvatorij ograđen lučkom infrastrukturom poput marina i luka ili u slučaju prirodno ograđenih akvatorija poput laguna i estuarija. Luke i marine su naročito osjetljive morske zone gdje se onečišćenja mogu u značajnijoj mjeri akumulirati i zadržavati stvarajući pritom značajan pritisak na kakvoću mora te posljedično na ljudski, životinjski i biljni svijet. Izgradnjom lučke infrastrukture poput lukobrana ostvaruje se potrebno umanjeње valne energije unutar zaštićenog akvatorija gdje se nalaze vezovi plovila. Istodobno se izgradnjom infrastrukture umanjuje izmjena mora između zaštićenog akvatorija i okolnog mora. U navedenim područjima dolazi do slabije cirkulacije i izmjene morske vode s vanjskim morem, te kao posljedica može doći do akumulacije onečišćujuće tvari unutar poluzatvorenih akvatorija (Recreational navigation Commission, 2008). Akumulacije onečišćenja u poluzatvorenim akvatorijima sa slabijom izmjenom morske vode rezultira ubrzanom degradacijom kakvoće mora. Nedostatna izmjena mora može ishoditi kvalitetom mora obilježenom smanjenom količinom otopljenog kisika što pogoduje razvoju algi (cvjetanje mora), te posljedično može ugroziti riblji fond i stanište (US Environmental Protection Agency Staff, 1993). Uz nedovoljne koncentracije kisika, temperatura vode uvjetuje dinamiku strukture prisutnih živih bića. Navedena dinamika

je intenzivnija u vodnim tijelima poput laguna koja brzo reagiraju na promjene temperature atmosfere zbog svoje pličine (Andrea Cucco *i ostali*, 2012).

Narušena kvaliteta mora unutar luke može se izbjeći smanjenjem potencijalnih izvora onečišćenja ili/i održavanjem optimalne izmjene mora (Yin *i ostali*, 1998; Monsen *i ostali*, 2002). Stoga je izmjena mora unutar marina i luka bitan zahtjev koji valja uzeti u obzir tijekom projektiranja i gradnji istih (US Army Corps of Engineers, 2002). Izmjena mora između akvatorija i okolnog mora odvija se pod djelovanjem prirodnih čimbenika poput plimnih oscilacija, valova, vjetrova i barokline cirkulacije (cirkulacija koja je pokrenuta značajnim prostornim razlikama u temperaturi i salinitetu unutar mora) (Fischer *i ostali*, 1979; R. E. Nece *i Asce*, 1984; Schwartz, 1989; Falconer *i Guoping Yu.*, 1991). Znanstvena istraživanja se provode pod pretpostavkom međusobne neovisnosti pojedinih prirodnih čimbenika, te se posljedično utjecaj svakog čimbenika može proučavati zasebno. Nije nužno da su dominantni svi utjecaji istovremeno te će djelovanje pojedinih čimbenika ovisiti o geografskoj lokaciji. U svjetskim morima su najčešće plimne oscilacije dominantni uzrok izmjene mora. Shodno tome, velik broj istraživanja se bavi upravo kvantifikacijom utjecaja plimnih oscilacija na izmjenu mora (Sanford *i ostali*, 1992; DiLorenzo *i ostali*, 1994; Luketina, 1998). U Jadranskom moru (kao i u cijelom Mediteranu) prisutan je mali raspon plimnih oscilacija u usporedbi s ostalim svjetskim morima. Bitno veća opasnost prijeti marinama na Mediteranu upravo zbog prisutnosti malih plimnih oscilacija koje nisu u mogućnosti sa zadovoljavajućom učinkovitošću ukloniti onečišćenje. Navedeno je zaključeno kvantifikacijom i usporedbom podložnosti onečišćivačima unutar raznih Španjolskih marina na Mediteranu i Atlantskom oceanu (Gómez *i ostali*, 2017). Iz navedenog razloga, plimne oscilacije samostalno kroz ulaz u marinu ili luku nemaju zadovoljavajući učinak na izmjenu mora na Jadranu kao i u Mediteranu, stoga utjecaji drugih prirodnih čimbenika dolaze do izražaja. Utjecaj konstrukcijskih parametara kao što su tlocrtni oblik luke, dimenzije ulaza u luku, dubina vode i nagib dna na izmjenu mora je do sada dobro istraženo (R. E. Nece *i Asce*, 1984; Falconer *i Guoping Yu.*, 1991; US Army Corps of Engineers, 2002; Recreational navigation Commission, 2008). Navedena prethodna istraživanja izmjene mora bave se poglavito područjima gdje amplitude plimnih oscilacija nisu male (veće od 2 m), dok će ovaj rada pokušati ispuniti slabije istraženo područje.

U područjima gdje su amplitude plimnih oscilacija unutar kategorije mikropolimnih mijena (manje od 2 m) poput Jadranskog mora i Mediterana, uobičajena je primjena dodatnih konstruktivnih detalja za poboljšanje izmjene mora poput propusta (cijevnih, pravokutnih ili



kanalskih otvora u tijelu lukobrana, promjer/dimenzija  $D \sim 1$  m). Iako postoje osnovne smjernice za izvedbu propusta, danas je oblikovanje propusta poglavito prepušteno slobodnoj procjeni i iskustvu projekatanta. Dominantni generator cirkulacije mora (plimne oscilacije, valovi, vjetar ili drugo) kroz propust svakako ovisi o oceanografskim uvjetima prisutnim na lokaciji luke ili marine. Valja naglasiti kako su propusti često u upotrebi jer se smatraju ekonomičnom metodom u lučkom inženjerstvu za poboljšanje izmjene mora.

Uz povoljan utjecaj propusta izražen kroz povećanu cirkulaciju mora u akvatoriju, javlja se nepoželjna transmisija valne energije kroz propust (transmisija valne energije definira se kao količnik značajne valne visine iza i ispred propusta) (Fountoulis i Memos, 2005). Navedenu nepoželjnu penetraciju energije valova je potrebno zadržati na dovoljno niskoj razini kako bi bili zadovoljeni potrebni uvjeti u pogledu agitacije akvatorija na lokaciji vezova plovila. Jednu od takvih preporuka daje Hrvatski registar brodova. Funkcionalni kriteriji za marine s plutajućim gatovima su dani u okviru norme „Tehnički uvjeti i svjedodžba o sigurnosti plutajućeg objekta za pontonske gatove u marinama“, Hrvatski registar brodova, QC-T-191 iz 2004. godine. Unutar navedenih tehničkih uvjeta definirana su dopuštena stanja valnog polja unutar akvatorija marine kako slijedi u normi:

$H_{s,<5d} \sim H_{s,PP1} = 0,15$  m                      ne više od 5 dana godišnje,

$H_{s,PP5} = 0,3$  m                                      jednom u razdoblju ne kraćem od 5 godina,

$H_{s,PP50} = 0,5$  m                                      jednom u razdoblju ne kraćem od 50 godina,

gdje je  $H_{s,PP}$  značajna valna visina povratnog razdoblja od 50, 5 ili 1 godine. Navedena dopuštena stanja valnog polja unutar marine postižu se odabirom zaštićene lokacije ili postavljanjem odgovarajućih lukobrana i druge lučke infrastrukture. Granične vrijednosti valnih parametara (značajne valne visine i vršnog perioda) koji se preporučuju prema internacionalnoj organizaciji PIANC na lokaciji vezova su dani u tabličnom pregledu (PIANC, 1995) (Tablica 1). Granične vrijednosti valnih parametara koja se predlažu ovise o dužini plovila koji su privezani na potencijalno ugroženim vezovima. Za duža plovila preporučene su veće granične vrijednosti valnih parametara.

Tablica 1 Preporučene granične vrijednosti parametra vala koji nailazi na vez u ovisnosti o dužini privezanog plovila prema PIANC (PIANC, 1995)

Dužina plovila (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)
4-10	<2,0	0,20
	2,0-4,0	0,10
	>4,0	0,15
10-16	<3,0	0,25
	3,0-5,0	0,15
	>5,0	0,20
16-20	<4,0	0,30
	4,0-6,0	0,15
	>6,0	0,25
Mega-jahte (25-40), super-jahte (>40)	6,0-14,0	0,60

Istraživanje oblikovanja propusta ugrađenih u tijelo lukobrana u pogledu oprečnih potreba povećanja cirkulacije mora kroz propust i umanjenja penetracije valne energije kroz propust omogućit će buduće upućeno oblikovanje propusta u svrhu zadovoljenja hidrodinamičkih uvjeta te će doprinijeti boljem razumijevanju ključnih oblikovnih karakteristika propusta. Spoznaje o uvjetima tečenja i penetraciji valne energije kroz propust mogu značajno olakšati buduće projektiranje propusta.

Valja naglasiti kako su na području istočnog Jadranskog mora amplitude plimnih oscilacija bitno manje od ograničenja u iznosu od 2 m koje definiraju kategoriju mikroplimnih mijena. Srednji dnevni raspon plimnih oscilacije iznosi 0,2 m na lokaciji Dubrovnika i 0,5 m na lokaciji Rovinja (HHI, 2018). Klimatske promjene se izražavaju ponajprije u obliku povećanja razine mora i temperature mora. Rast temperature mora dodatno će doprinijeti štetnom cvjetanju algi što ukazuje da će opasnost od štetnih algi rasti u budućnosti (Moore *i ostali*, 2008). Uz izrazito male amplitude plimnih oscilacija na Jadranu i očekivani rast temperature mora što uzrokuje brže cvjetanje štetnih algi, prognozira se daljnja gradnja lučkih građevina po obali Jadranskog za povećanje kapaciteta plovila koje ograničavaju cirkulaciju zaštićenog akvatorija. Zbog navedenih uzroka će se tražiti rješenje kako bi se nepovoljni utjecaji umanjili. Kroz ovaj rad se planiraju predstaviti propusti ugrađeni u tijelo lukobrana kao potencijalno rješenje za umanjenje navedenih nepovoljnih utjecaja koji će biti sve izraženiji kroz klimatske promjene i antropogene utjecaje na obali.

## 2

# PREGLED STANJA ZNANJA

U ovom poglavlju će biti predstavljen pregled dosadašnjih istraživanja u pogledu mogućih oblika onečišćenja koja se mogu pojaviti unutar morskog obalnog pojasa, razvijenih analitičkih obrazaca za procjenu izmjene mora unutar poluzatvorenih akvatorija poput marina i luka, dosada ustanovljenih obrazaca transmisije valova kroz propuste koji uključuju istraživanje utjecaja pojedinih parametara vala i geometrijskih karakteristika propusta, te dosada utvrđenim mogućnostima oblikovanja propusta u svrhu pružanja što učinkovitije cirkulacije mora kroz propust u odnosu na pojedine generatore cirkulacije mora.

## **2.1 Vrste onečišćenja mora**

Mnogi oblici onečišćenja mora ugrožavaju ljudsko zdravlje te smanjuju raznolikost živog svijeta unutar morskog ekosustava. Određene vrste onečišćenja mogu uzrokovati eutrofikaciju, anoksično stanje u moru, mikrobiološko onečišćenje bakterijama fekalnog porijekla i drugo (Sindermann, 2006; Essl *i ostali*, 2013). U okviru poglavlja 2.1, predstaviti će se vrste mogućih onečišćenja koja se mogu pojaviti u moru.

### **2.1.1 Cvjetanje algi**

Fitoplanktoni posjeduju sposobnost ubrzanog razmnožavanja u nakupine visoke gustoće i broja stanica pri povoljnim okolišnim uvjetima. Neke vrste fitoplanktona su direktno toksične drugim živim bićima, dok druge čine štetu indirektno u obliku štetnog cvjetanja algi (Smayda, 1997). Proces u kojem alge vrše štetno djelovanje ubrzanim razmnožavanjem i/ili ispuštanjem biotoksina se skupno naziva štetno cvjetanje algi ili HAB (engl. *Harmful Algal Bloom*) (Moestrup *i ostali*, 2009). Cvjetanje mora se u prirodi pojavljuje u obliku pjene ili tankog filma na površini mora često zelene boje uz mogućnost pojavljivanja i drugih boja ovisno o dominantnom pigmentu. Neki proizvedeni toksini fitoplanktona se akumuliraju u ribama i školjkama što može naštetiti čovjeku i drugim organizmima nakon konzumacije (Schmidt i Hansen, 2001; Vila *i ostali*, 2001). Glavni oblici detektiranih toksina mogu uzrokovati poteškoće poput paralitičkog otrovanja školjkašima (engl. *Paralytic Shellfish Poisoning (PSP)*), otrovanje biotoksinima u školjkašima koje uzrokuje diareju (engl. *Diarrhetic Shellfish Poisoning (DSP)*) i otrovanje biotoksinima u školjkašima koje uzrokuju gubitak pamćenja (engl. *Amnesic Shellfish Poisoning (ASP)*). Osim značajnog nepovoljnog ekološkog efekta cvjetanja algi, promjena boje mora i neugodan miris mogu uzrokovati značajne negativne učinke na turizam unutar obližnjeg područja.

Razdoblje cvjetanja algi najčešće je sezonskog karaktera. Očituje se u razdobljima zagrijavanja mora s velikom dostupnošću svjetlosti, a može biti potaknut visokim unosom nutrijenata, često antropogenog podrijetla. Nutrijenti mogu stići u more putem rijeka i manjih vodotoka, odvodnjom poljoprivrednih površina, industrijskom aktivnošću i direktnim ispuštanjem pročišćenih otpadnih voda putem podmorskih ili priobalnih ispusta, koji stvaraju stanje eutrofikacije u recipijentu (Ignatiades i Gotsis-Skretas, 2010). Eutrofikacija pokrene fizičke i kemijske procese u morskome okolišu koji omogućuju nagli rast populacije

fitoplanktona. Netoksične vrste algi ubrzanim razmnožavanjem stvaraju veliku biomasu zbog koje dolazi do promjena boje mora, stvara anoksično stanje u ekosustavu i nepoželjne estetske karakteristike ( $>10^6$  stanica/litri). Posljedično mogu također prouzročiti nepovoljne ekonomske efekte u obliku štete u ribogojilištima, uzgajalištima školjaka i turističkom poslovanju (Shumway, 1990; Smayda, 1997). Cvjetanje algi je česta pojava u zatvorenim i poluzatvorenim morskim akvarijima. Primjerice, u lipnju 2014. godine cvjetanje algi se odvijalo i u Splitskoj luci (Slobodna Dalmacija, 2014).

Brzina razmnožavanja algi je poglavito u ovisnosti o dostupnim koncentracijama dušikovih i fosfatnih nutrijenata te temperature (Ebenhöh *i ostali*, 1997). Nutrijenti najčešće dolaze putem vodotoka koji se ulijevaju u more, a ovisno o dostupnosti fosfatnih i dušikovih nutrijenata, jedan od njih može biti ograničavajući čimbenik za razvoj algi. Očekivano je da tijekom velikih voda u vodotocima fosfatni nutrijenti budu ograničavajući čimbenik, a tijekom malih voda dušikovi nutrijenti (Sylvan i Ammerman, 2013). Studije upućuju na to da postoji povećan rizik od štetnog cvjetanja algi ako je odnos između ukupnih dušikovih nutrijenata i ukupnih fosfatnih nutrijenata manji od 15 (Håkanson i Blenckner, 2008). Dva dominantna utjecaja na populaciju algi, količina nutrijenata i temperatura, vrše drukčije odzive na veličinu zajednice planktona. Veličina populacije algi ima utjecaj na koncentraciju nutrijenata jer rastom populacije potrošnja nutrijenata također raste, dok veličina populacije nema utjecaj na temperaturu mora u kojem obitavaju (Manizza *i ostali*, 2008). Zajednice fitoplanktona su osjetljivije na nepovoljnu promjenu temperature mora, nego na privremeni nedostatak nutrijenata (Vallina *i ostali*, 2017). Cijeli Mediteran ima višu temperaturu mora, u usporedbi s oceanima, što doprinosi još bržem cvjetanju mora (Gaitanis *i ostali*, 2009; Tsoukala *i ostali*, 2010) i uočene su indikacije da globalni rast temperature mora uzrokovan globalnim zatopljenjem dodatno će doprinijeti štetnom cvjetanju algi (Moore *i ostali*, 2008).

Nitrati ( $\text{NO}_3$ ) su esencijalni oblik dušikovih nutrijenata za razmnožavanje i život morskih algi. Može se pretvoriti u nitrite ( $\text{NO}_2$ ) pri određenim uvjetima (bez prisutnosti kisika) kroz prirodni proces denitrifikacije, ali često se brzo vrata u oblik nitrata kroz proces oksidacije. U neočišćenim vodama koncentracija nitrata rijetko iznosi više od 0,1 mg/L, ali uz antropogeni pritisak koncentracija često može narasti na vrijednost veću od 5 mg/L. Organski otopljeni dušikovi nutrijenti obuhvaćaju 70% od ukupnog otopljenog sadržaja dušikovih nutrijenata koji dolazi rijekama (Håkanson i Blenckner, 2008). Koncentracije nitrata i nitrata su opći pokazatelji količine nutrijenata prisutnih u vodnom tijelu (Håkanson i Blenckner, 2008). Značajne

koncentracije nitrata indiciraju stariju i ustajalu morsku vodu, dok su povišene koncentracije amonijaka pokazatelj svježih dospjelih nutrijenata najčešće iz antropogenih izvora, te su takve koncentracije amonijaka vrlo štetne za razvoj fitoplanktona (Suthers i Rissik, 2009). Neonečišćene vode sadrže koncentraciju amonijaka (97 % ukupnog otopljenog amonijaka u vodi je ionizirani amonijak,  $\text{NH}_4^+$ ) manju od 0,1 mg/L (Carr, 2008). Koncentracije otopljenog amonijaka koje uzrokuje akutno trovanje kod riba i morskih biljaka iznosi 0,09-3,35 mg/L ovisno o vrsti, temperaturi i pH vrijednosti medija (Eddy, 2005). Zaključno, nutrijenti su bitni elementi koje treba kontinuirano pratiti jer direktno utječu na primarnu produkciju fitoplanktona i morskih bilja, te razvoj njihove biomase.

Ako se pojedina zajednica algi sastoji od distinktivnih vrsta, postoji veća sposobnost preživljavanja algi u nepogodnim uvjetima. Pod različitim kemijskim i fizičkim uvjetima će se uvijek jedna od vrsta unutar pojedine zajednice algi moći razvijati i osigurati opstanak cijele zajednice (Tilman *i ostali*, 2006; Naeem *i ostali*, 2012). Posljedično, brojnost populacije u zajednicama koje se sastoje od različitih vrsta algi je stabilnija kroz vrijeme s obzirom na okolišne uvjete i alge posjeduju sposobnost ubrzanog razmnožavanja pri različitim uvjetima (Loreau, 2010). Nadalje, raznovrsnije zajednice će biti uspješnije u razmnožavanju jer će se vrste algi koje uspijevaju u određenim klimatskim uvjetima nametnuti po brojnosti unutar zajednice, a ujedno će biti najefikasniji potrošači resursa za daljnje razmnožavanje u zadanim uvjetima.

Razumijevanje izvora unosa nutrijenata u zatvoreni akvatorij na pojedinim lokacijama, mogućnost cirkulacije mora i raspršenje nutrijenata će drastično smanjiti rizik od štetnog cvjetanja algi (Suthers i Rissik, 2009). Uspostavljeni ekološki modeli za predviđanje rasta populacija fitoplanktona su prepoznale advekciju kao značajan čimbenik koji sudjeluje u dinamici populacija algi i ističu potrebu za kombinirano modeliranje hidrodinamike mora i ekološkog modeliranja populacije algi (Solé *i ostali*, 2006). Potrebno je poznavati koncentraciju i stanje populacije fitoplanktona jer su oni pokazatelj kakvoće mora. Prema količini nutrijenata u vodnom tijelu, stanje se može klasificirati prema maloj koncentraciji (oligotrofija), srednjoj koncentraciji (mezotrofija) i visokoj koncentraciji (eutrofija). Ovisno o razini trofije, odnosno stanja vodnog tijela, prema postojećoj zakonskoj regulativi u okviru Uredbe o standardu kakvoće vode za pojedino stanje vodnog tijela pridružene su granične vrijednosti pokazatelja poput prozirnosti, zasićenja kisikom, otopljenog anorganskog dušika, otopljenog fosfora, koncentracije klorofila a i TRIX indeksa (Tablica 2).

Tablica 2 Granične vrijednosti pokazatelja eutrofikacije u priobalnim vodama prema Uredbi o standardu kakvoće vode (Vlada Republike Hrvatske, 2018)

Pokazatelj / Indeks	Prosječna godišnja vrijednost				
	Mjerna jedinica	KATEGORIJA STANJA			
		vrlo dobro	dobro	umjereno	loše
Prozirnost	m	> 10	< 10	< 3	< 3
Zasićenje kisikom	%	80 – 120	P: 120 – 170 D: 30 – 80	P: > 170 D: 30 – 80	P: > 170 D: 0 – 30
Otopljeni anorganski dušik	μmol/l	< 2	< 10	< 20	> 20
Otopljeni fosfor	μmol/l	< 0,3	< 0,6	< 1,3	> 1,3
Klorofil a	μg/l	< 1	< 5	< 10	> 10
TRIX		2 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 8

### 2.1.2 Naftna onečišćenja

Unutar akvatorija marina i luka odvijaju se aktivnosti prijenosa dobara preko granice kopna i mora. Nerijetko se radi o robi u tekućem obliku poput nafte ili drugih kemikalija. Nesreće pri prijenosu nafte preko obalne crte su identificirane kao najčešći tip nesreće pri manipulaciji s robom unutar luka (Darbra i Casal, 2004; Peris-Mora *i ostali*, 2005). Naftna izlijevanja se događaju u 59 % slučajeva izlijevanja u odnosu na sve događaje izlijevanja potencijalnog onečišćivača u obliku tekućina.

Shodno velikoj opasnosti izlijevanja nafte pri manipulaciji i transportu, IMO (International Maritime Organization) zahtjeva da svaka od svojih članica izradi program za suzbijanje negativnih posljedica naftnog izlijevanja i analizu rizika od mogućeg zagađenja naftom (International Maritime Organization, 2010). Analizu rizika je potrebno razložiti razmatrajući prirodne specifičnosti lokacije poput meteoroloških, oceanografskih i okolišnih uvjeta prisutnih na mjestu luke u kojoj se nalaze naftni terminali za prihvaćanje derivata. U sklopu analize rizika se definira vjerojatnost nepoželjnog scenarija izlijevanja nafte i vjerojatno štetno djelovanje scenarija. Stoga je za kvalitetnu procjenu potencijalne štete potreban izračun širenja izlivena nafte posredstvom advekcijsko-disperzijske jednadžbe koju pokreću prirodni procesi poput morskih struja, morskih valova i vjetera. Također je potrebno uzeti u obzir specifična fizička svojstva nafte poput evaporacije (Abascal *i ostali*, 2007; A. Cucco *i ostali*, 2012). Za razliku od onečišćenja poput teških metala, koncentracija naftnog onečišćenja može

opadati s vremenom putem prirodnih procesa poput disperzije, evaporacije i biorazgradivosti. Navedeni prirodni procesi direktno utječu na akumulaciju i klasifikaciju toksičnosti naftnih ugljikovodika unutar sedimenta (Nahla, 2009).

Antropogena onečišćenja u obliku zauljene vode mogu se pojaviti unutar akvatorija, osim u okviru incidentnih slučajeva ispuštanja naftnih derivata, ispuštanjem zauljenih balastnih voda, puknućem cijevi na teritoriju u blizini mora ili motornim uljem koji je padalinama ispran u more (Farmer, 2010) (Slika 1). Antropogeno onečišćenje naftnim ugljikovodicima se može podijeliti u dvije dominantne skupine, pirogeni i petrogeni naftni ugljikovodici. Pirogeni ugljikovodici ubrzano nastaju nakon nepotpunog sagorijevanja organskih spojeva pri temperaturama oko 700 °C. Izvori pirogenih ugljikovodika mogu biti prisutni tijekom izgaranja fosilnih goriva (korištenje loživih ulja, kuhanje, emisija iz automobila), paljenja biomase (u ognjištu i kontrolirano paljenje na otvorenom) i industrijskih centara u blizini obale (Pies *i ostali*, 2008; Beyer *i ostali*, 2010). Izvori onečišćenja petrogenim ugljikovodicima uključuju fosilna goriva bez sagorijevanja, poput izlivanja nafte na površinu mora (Neff, 2002; Beyer *i ostali*, 2010).



Slika 1 Onečišćenje uljima uočeno u marini Biograd, unutar grada Biograda (05. 07. 2018.)



Pirogeni izvori su toksičniji za biotu u morskom ekosustavu od petrogenih izvora zbog visoke koncentracije policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH). Osim onečišćenja morske površine, ugljikovodični spojevi nafte se mogu istaložiti na morsko dno. Prema dosadašnjim istraživanjima, površina morskog sedimenta se ocjenjuje zagađenom ukoliko je vrijednost TPH (engl. *Total Petroleum Hydrocarbon*) veća od 1000 mg/kg, a za uvjet zagađenja površinskih voda uzima se granična vrijednost u iznosu 2 mg/kg.

TPH je termin korišten za definiranje sume svih koncentracija ugljikovodika koje se pojavljuju u sirovoj ili prerađenoj nafti. Ocjena onečišćenja isključivo prema TPH može biti nepouzdana jer mjerenje koncentracija stotina frakcija naftnih ugljikovodika može biti iznimno kompleksno i skupocjeno, stoga postoje ograničene informacije o mobilnosti onečišćenja i toksičnosti spojeva ugljikovodika u sedimentu (Battelle, 2007). Stoga za potpunije ocjenjivanje onečišćenja naftom na lokaciji potrebno je analizirati vrijednosti TPH i PAH.

Toksičnost i akumulacija naftnih ugljikovodika ovisi o sastavu i udjelima pojedinih frakcija nafte, svojstvima pojedinih frakcija, izvorima onečišćenja i prirodnim procesima (Neff, 2002; Beyer *i ostali*, 2010). Za naftu veće gustoće ( $0,98 \text{ g/cm}^3$ ) je opaženo da uslijed veće količine izlivanja površina područja pod utjecajem nafte veća, dok se kod nafte manje gustoće ( $0,73 \text{ g/cm}^3$ ) površina zahvaćenog područja smanjuje s povećanjem količine ispuštene nafte (Valdor *i ostali*, 2015). Djelovanje morskih struja, valova i vjetera na širenje nafte na morskoj površini nije linearno, stoga je potrebno koristiti višedimenzionalne numeričke modele s definiranim prostornim i vremenskim komponentama za realni opis širenja naftnog izlivanja u pojedinoj točki (Valdor *i ostali*, 2015). Zbog golemog utjecaja niza nelinearnih čimbenika hidrodinamike mora i fizičkih svojstava naftnih ugljikovodika na pronos naftnog onečišćenja, kvalitetna procjena rizika bez prikladnog višedimenzionalnog numeričkog modela može biti iznimno teška.

### **2.1.3 Fekalno onečišćenje**

Kakvoća mora u obalnom području je od velike važnosti za turizam, gdje je plivanje i rekreacija na moru sastavni dio ljetne turističke ponude. Održavanje ili postizanje tražene kakvoće mora u priobalju postaje sve zahtjevniji zadatak što je direktno povezano s usklađivanjem potreba za izgradnjom prikladnih sustava zbrinjavanja otpadnih voda s podmorskim ispustima svakog naselja koje objedinjuje stalno stanovništvo i turiste (Bedri *i*

*ostali*, 2016). Uz odvodnju sanitarnih otpadnih voda, industrijske otpadne vode mogu generirati dodatna onečišćenje obalnog mora. Održavanje čiste morske vode na plažama je ključno kako bi se čuvalo zdravlje ljudi i turistička atraktivnost priobalnog područja (*Cleaveland i ostali*, 2001; *Bauer i ostali*, 2010; *Fleming i ostali*, 2011). Primjerice, nepovoljan događaj navedenog karaktera se desio 26.09.2016 u Dubrovačko-neretvanskoj županiji kada se ustanovila nezadovoljavajuća kakvoća mora. Zavod za javno zdravstvo Dubrovačko-neretvanske županije izvršio je uzorkovanje mora na 4 lokacije nakon višekratnih dojava stanovništva u blizini plaže Pogačić. Analizom uzoraka je uočena prisutnost mikrobioloških pokazatelja koji ukazuju na fekalno onečišćenje mora u blizini plaže. Posljedično je Zavod za javno zdravstvo preporučio prestanak korištenja mora u tom području u svrhe plivanja i rekreacije (Zavod za javno zdravstvo, 2016).

Američka agencija za zaštitu okoliša EPA (Environmental Protection Agency) definira *Escherichia coli* (EC) kao najpouzdaniji indikator za ocjenu kakvoće slatke vode, dok za praćenje kakvoće slane i bočate vode preporučuju praćenje grupe bakterija pod nazivom *Enterococci*, zbog svoje sposobnosti za preživljavanjem u slanim sredinama. Sukladno s EPA smjernicama granična koncentracija EC u slatkim vodama je definirana s vrijednosti u iznosu 126/100 ml, a za slane vode granična koncentracija *Enterococci* je definirana s vrijednosti 35/100 ml (US Environmental Protection Agency, 1986). Razmatrajući širenje onečišćenja mikroorganizmima koja su na površini ili plivaju unutar vodnog tijela, potrebno je odrediti zahvaćeno područje onečišćenja kako bi se moglo pravovremeno upozoriti stanovništvo. Prethodne studije ističu potrebu za korištenjem numeričkih modela čime se uzima u obzir hidrodinamika mora za kvalitetan opis pronosa mikro organizama fekalnog porijekla i ocjenu sanitarne kakvoće vode na plažama (*Schippmann i ostali*, 2013; *Mudryk i ostali*, 2014). Kako bi se opisao pronos mikroorganizama fekalnog porijekla unutar numeričkog modela, koristile su se Lagrangeove čestice pod utjecajem morskih hidrodinamičkih čimbenika poput vjetrova, valova, morskih struja, batimetrije morskog dna i rotacije Zemlje. Zaključilo se da mikroorganizmi fekalnog porijekla kroz vremensko razdoblje od jednog dana mogu biti udaljeni do 10 km od izvora onečišćenja.

Osim onečišćenja u samom vodnom tijelu, mikroorganizmi fekalnog porijekla se mogu istaložiti i na morskom dnu. Ispitivanjem koncentracije mikroorganizama fekalnog porijekla na nekoliko dubina u moru, zaključilo se da je koncentracija veća na površini sedimenta nego u dubljim slojevima sedimenta (*Mudryk i ostali*, 2014). Kemijski sastav pijeska također utječe na

koncentraciju mikroorganizama u sedimentu. Umjetni pijesak se pokazao kao bolje stanište za patogene bakterije od prirodnog pijeska, stoga je potrebno razmatrati evoluciju plaže kroz vrijeme kako bi se mogle dati kvalitetnije procjene o koncentraciji patogenih mikroorganizama u sedimentu (Pereira *i ostali*, 2013). Pronos mikroorganizama fekalnog porijekla je čvrsto povezan s procesima pronosa sedimenta, stoga je bitno razmatrati dinamiku sedimenta za preciznu ocjenu transporta mikroorganizama. Pokazalo se da analiza pronosa mikroorganizama fekalnog porijekla bez uključivanja transporta sedimenta značajno podcjenjuje izmjerene vrijednosti. Fizički procesi poput adsorpcije i desorpcije razmatranih mikroorganizama fekalnog porijekla na morski sedimenta omogućuje pronos mikroorganizama pomoću transporta sedimenta, te takav oblik širenja čini golemi udio u ukupnom pronosu patogenih mikroorganizama kroz razmatrano područje. Naročito je važno uzeti u obzir transport sedimenta u definiranju pronosa mikroorganizama fekalnog porijekla u rijekama i estuarijima gdje je dinamika sedimenta posebno aktivna, a navedenim sustavima određena količina mikroorganizama stiže i do obalnog mora (Huang *i ostali*, 2017). Fizički procesi adsorpcije i desorpcije objašnjavaju razlog zbog kojeg se u zoni plimnih oscilacija uobičajeno mogu izmjeriti veće koncentracije mikroorganizama fekalnog porijekla nego u otvorenom moru. Plimne struje svakodnevno resuspendiraju mikroorganizme iz sedimenta za vrijeme plime i ponovo suspendiraju za vrijeme oseke, zbog čega se u navedenom području mogu izmjeriti veće koncentracije mikroorganizama (Huang *i ostali*, 2017). Periodičke analize ekološkog statusa voda kroz godinu u blizini turističkih lokacija su pokazale snažnu sezonsku varijabilnost u distribuciji mikroorganizama fekalnog porijekla, čime se ističe potreba za kontinuiranim monitoringom (Xie *i ostali*, 2017).

#### **2.1.4 Pesticidi i teški metali**

U grupu pesticida se ubrajaju mnogi spojevi koji su se koristili desetljećima u poljoprivredne svrhe. Usprkos korisnim djelovanjima u agronomiji, njihova akumulacija u morskim živim bićima izaziva opasnost, naročito u zatvorenim i poluzatvorenim vodnim tijelima (Pinto *i ostali*, 2013; Ritson *i ostali*, 2014). Pesticidima je tendencija zadržavati se na morskom dnu unutar sedimenta jer su spojevi uglavnom hidrofobni. Čak i ako je izmjerena mala koncentracija u vodnom tijelu unutar vodnog stupca, postoji mogućnost da su pesticidi akumulirani unutar sedimenta (Pinto *i ostali*, 2016). Resuspenzija pesticida se može dogoditi tijekom prirodnih (npr. poplave) i antropogenih procesa (npr. iskopi ili refuliranje). Predviđene češće i snažnije poplave uzrokovane globalnim zatopljenjem će imati direktni utjecaj na

sedimentirane pesticide (Anthony *i ostali*, 2009). Poplave će erodirati morsko dno i time oslobađati pesticide u otvoreno more, što će morsko dno definirati kao izvor onečišćenja. Stoga je potrebno promatrati kakvoću vode prije i poslije poplavnih razdoblja za ocjenu potpune slike kvalitete staništa. Povećanje koncentracije pesticida rezultirat će slabijim razvojem i spriječenom reprodukcijom mnogih morskih živih bića unutar zahvaćenog ekosustava (MacDonald *i ostali*, 2004). Danas je zagađenje sedimenta vrlo rašireno, stoga je bitno pratiti akumulaciju pesticida unutar sedimenta naročito za procjenu ekološkog učinka i rizika iskopavanja sedimenta (Barakat *i ostali*, 2013).

Teški metali predstavljaju opasnu prijetnju unutar ekosustava zbog mogućnosti akumulacije unutar hranidbenog lanca (Pan i Wang, 2012). Teški metali se mogu pojaviti u morskom okolišu iz antropogenih izvora putem vodotoka, taloženja iz atmosfere ili ispusta sanitarnih industrijskih i oborinskih otpadnih voda (Michael J. Kennish, 1997). Premazi za trup broda u sebi sadržavaju teške metale, te su uočene povećane koncentracije bakra i cinka u sedimentu unutar akvatorija gdje su se obavljale aktivnosti premazivanja brodova (Singh i Turner, 2009). Razni teški metali se nejednako ponašaju u morskoj sredini što može dovesti do različitih utjecaja na ekosustavu u odnosu na povećanu koncentraciju teških metala. Većina vrsta teških metala nema tendenciju otapanja u vodi, nego ostaju u obliku čestica suspendirani u vodnom tijelu (Rezayi *i ostali*, 2013). U pravilu, varijacije koncentracija teških metala utječu na živi svijet (reprodukciju, razvoj i dr.).

Onečišćenja poput teških metala i pesticida, koja se akumuliraju unutar akvatorija sa slabom izmjenom mora, često se talože i skupljaju u sedimentu na dnu akvatorija (Tavakoly Sany *i ostali*, 2014; Pinto *i ostali*, 2016).

## 2.2 Postojeća regulativa vezana uz stanje kakvoće mora

Granične vrijednosti pojedinih vrsta onečišćenja su različito zakonski propisane među pojedinim državama. Tablični pregled dopuštenih graničnih vrijednosti koncentracija pojedinih onečišćenja za neke države je dostupan u izvještaju organizacije PIANC iz 2008. godine (Recreational navigation Commission, 2008). U okviru hrvatske regulative su također definirane granične vrijednosti prema pojedinim ekološkim pokazateljima kakvoće mora unutar dokumenta Uredba o standardu kakvoće voda (NN 73/13, 151/14, 78/15, 61/16, 80/18). Uredba uređuje 5 tipova priobalnih voda, te za njih definira referentne vrijednosti, odnosno granična stanja prema biološkim i fizičko-kemijskim pokazateljima (Tablica 3).

Tablica 3 Tipovi priobalnih i prijelaznih voda

Naziv tipa	Oznaka tipa	Raspon plime i oseke	Srednji godišnji salinitet (ppm)	Sastav supstrata	Dubina (m)
<b>MEDITERANSKA EKOREGIJA (6. SREDOZEMNO MORE)</b>					
Euhalino plitko priobalno more krupnozrnatog sedimenta	HR-04_12	mikroplimni	> 36	krupnozrnati sediment	< 40
Euhalino plitko priobalno more sitnozrnatog sedimenta	HR-04_13	mikroplimni	> 36	sitnozrnati sediment	< 40
Euhalino priobalno more krupnozrnatog sedimenta	HR-04_22	mikroplimni	> 36	krupnozrnati sediment	> 40
Euhalino priobalno more sitnozrnatog sedimenta	HR-04_23	mikroplimni	> 36	sitnozrnati sediment	> 40
Polihalino plitko priobalno more sitnozrnatog sedimenta	HR-03_13	mikroplimni	< 36	sitnozrnati sediment	< 40

S obzirom na kategorizaciju tipova priobalnih voda u Mediteranskoj ekoregiji prema pravnom okviru Uredbe o standardu kakvoće voda, poluzatvoreni akvatoriji okruženi lučkom infrastrukturom marine ili luke se mogu očekivati poglavito u euhalnom plitkom priobalnom moru sitnozrnatog sedimenta (HR-04\_12) ili euhalnom plitkom priobalnom moru krupnozrnatog sedimenta (HR-04\_13) gdje su dubine manje od 40 m, a u slučaju lokacije u prijelaznim vodama onda se radi o polihalnom plitkom priobalnom moru sitnozrnatog sedimenta (HR-03\_13) (tablica). U svim navedenim slučajevima radi se o lokacijama gdje je

raspon plime i oseke klasificiran kao mikroplimni, odnosno raspon plimnih oscilacija koji je manji od 2 m.

U okviru uredbe nadalje daju se uvjeti koje u biološkom, kemijskom i fizikalnom smislu trebaju zadovoljiti vodna tijela kopnenog tipa (površinske i podzemne vode), prijelazne vode, priobalne vode i teritorijalne vode. Relevantni biološki pokazatelji koje je potrebno pratiti u svrhu ocjene stanja priobalnih voda prema važećoj regulativi su fitoplanktoni (svakih 6 mjeseci), makrofiti (svake 3 godine) i makrozoobentos (svake 3 godine). Ocjena ekološkog stanja za priobalne vode može se definirati kao vrlo dobro, dobro, umjereno, loše ili vrlo loše, s time da su u okviru uredbe definirane normativne definicije ekološkog stanja za ocjene vrlo dobrog stanja, dobrog stanja i umjerenog stanja po biološkim elementima (Tablica 4).

Tablica 4 Normativne definicije kategorija ekološkog stanja priobalnih voda prema biološkim elementima (Vlada Republike Hrvatske, 2018)

<b>Element</b>	<b>Vrlo dobro stanje</b>	<b>Dobro stanje</b>	<b>Umjereno stanje</b>
fitoplankton	Sastav i brojnost svojti fitoplanktona u skladu je s nenarušenim stanjem.	Sastav i brojnost svojti fitoplanktona pokazuje lagane znakove poremećaja.	Sastav i brojnost svojti fitoplanktona pokazuje znakove umjerenog poremećaja.
	Prosječna biomasa fitoplanktona u skladu je s tipičnim fizikalno-kemijskim uvjetima i ne utječe na prozornost.	Ima malih promjena biomase u odnosu na stanje specifično za određeni tip priobalnih voda. Te promjene ne ukazuju na pojačani rast alga koji bi doveo do poremećaja ravnoteže organizma u vodi ili kakvoće vode.	Biomasa alga znatno je izvan raspona uobičajenog za tipične uvjete i može utjecati na biološke elemente kakvoće.
	Cvjetanje planktona javlja se s učestalošću i intenzitetom primjerenim fizikalno-kemijskim uvjetima specifičnima za	Moguće je lagano povećanje učestalosti i intenziteta cvjetanja planktona.	Moguće je umjereno povećanje učestalosti i intenziteta cvjetanja planktona. Moguće je dugotrajno cvjetanje u ljetnim mjesecima.

	određeni tip priobalnih voda.		
makroalge i angiospermi	Prisutne su sve svojte makroalga i angiosperma osjetljive na poremećaje, uobičajene za nenarušeno stanje.	Prisutna je većina osjetljivih svojti makroalga i angiosperma uobičajenih za nenarušeno stanje.	Određen broj svojti osjetljivih makroalga i angiosperma je odsutan.
	Razina pokrova alga i brojnost angiosperma odgovara nenarušenom stanju.	Razina pokrova alga i brojnost angiosperma pokazuju lagane znakove poremećaja.	Pokrov makroalga i brojnost angiosperma umjereno su poremećeni i mogu dovesti do narušavanja ravnoteže organizma prisutnih u vodi.
makrozoobentos	Razina raznolikosti i brojnost svojti makrozoobentosa je unutar uobičajenog raspona za nenarušeno stanje.	Razina raznolikosti i brojnosti svojti makrozoobentosa je blago izvan raspona uobičajenog za stanje specifično za određeni tip priobalnih voda.	Razina raznolikosti i brojnost svojti makrozoobentosa umjereno su izvan raspona uobičajenog za stanje specifično za određeni tip priobalnih voda.
	Prisutne su sve osjetljive svojte, uobičajene za nenarušeno stanje.	Prisutna je većina osjetljivih svojti zajednica specifičnih za određeni tip priobalnih voda.	Prisutne su svojte koje ukazuju na onečišćenje. Odsutna je većina osjetljivih svojti zajednica specifičnih za određeni tip priobalnih voda.

Prema normativnim definicijama već za umjereno stanje se govori o znakovitom poremećaju i promjenama brojnosti i sastava fitoplanktona te njihovo učestalije cvjetanje. Tijekom ljetnih mjeseci za umjereno ekološko stanje očekuje se cvjetanje fitoplanktona koje može trajati duže vremensko razdoblje.

Učestalost nadzornog monitoringa relevantnih fizikalno-kemijskih i kemijskih pokazatelja su temperatura (svaka 3 mjeseca), režim kisika (svaka 3 mjeseca), salinitet/sadržaj iona (svaka 3 mjeseca), hranjive tvari (svaka 3 mjeseca) i specifične onečišćujuće tvari (svaka 3 mjeseca). U skladu s tipom priobalne vode unutar kojeg se nalazi lokacija opažanja, potrebno je zadovoljiti granične vrijednosti bioloških i fizikalno-kemijskih pokazatelja. Granične vrijednosti fizikalno-kemijskih pokazatelja mogu definirati ekološko stanje kao vrlo dobro ili dobro stanje (Tablica 5).



Tablica 5 Granične vrijednosti kategorija ekološkog stanja za osnovne fizikalno-kemijske pokazatelje – vrijednost 50-og percentila (Vlada Republike Hrvatske, 2018)

OZNAKA TIPA	KATEGORIJA EKOLOŠKOG STANJA	Granična vrijednost ekološkog stanja za osnovne fizikalno-kemijske pokazatelje – vrijednost 50-og percentila				
		Režim kisika	Hranjive tvari			Prozirnost
		Zasićenje kisikom	Anorganski dušik	Ortofosfati	Ukupni fosfor	Secchi prozirnost
		%	μmol/ dm <sup>3</sup>	μmol/ dm <sup>3</sup>	μmol/ dm <sup>3</sup>	m
HR-O3_13	vrlo dobro ili referentno	P: 90 – 110 D: > 80	3	0,07	0,3	25
	dobro	P: 75-150 D: > 40	3 – 15	0,07 – 0,25	0,3 – 0,6	5 – 25
HR-O4_12 i HR-O4_13	vrlo dobro ili referentno	P: 90 – 110 D: > 80	2	0,07	0,3	25
	dobro	P: 75-150 D: > 40	2 – 10	0,07 – 0,25	0,3 – 0,6	5 – 25
HR-O4_22 i HR-O4_23	vrlo dobro ili referentno	P: 90 – 110 D: > 801 D: > 702	2	0,07	0,3	25
	dobro	P: 75-150 D: > 40	2 – 10	0,07 – 0,25	0,3 – 0,6	5 – 25

P (površinski sloj) – sloj vodenog stupca od površine (0,5 m) do dubine halokline

D (pridneni sloj) – sloj vodenog stupca 1-2 m iznad dna

1 – postaje s dubinom pridnenog sloja do 60 m

2 – postaje s dubinom pridnenog sloja većom od 60 m.

Biološki pokazatelji mogu definirati priobalno vodno tijelo kao vrlo dobro, dobro, umjereno, loše ili vrlo loše (Tablica 6). Kategorija ekološkog stanja određuje se omjerom izmjerene vrijednosti i referentne vrijednosti. Referentne vrijednosti za pojedini tip priobalnog tijela objavljene su u okviru dokumenta Metodologija uzorkovanja, laboratorijskih analiza i određivanja omjera ekološke kakvoće bioloških elemenata kakvoće koji je zasebno donesen od strane Hrvatskih voda na temelju članka 19. stavka 6. Uredbe o standardu kakvoće voda.

Tablica 6 Granične vrijednosti kategorija ekološkog stanja za biološke elemente kakvoće, izražene kao omjer ekološke kakvoće (Uredba o standardu kakvoće vode)

KATEGORIJA EKOLOŠKOG STANJA	Omjer ekološke kakvoće *			
	Biomasa fitoplanktona izražena kao klorofil <i>a</i>	Makrofita		Makrozoobentos
		Posidonia oceanica	Makroalge	
vrlo dobro ili referentno	0,81 – 1,00	0,775 – 1,000	0,76 – 1,00	0,83 – 1,00
dobro	0,55 – 0,80	0,550 – 0,774	0,61 – 0,75	0,62 – 0,82
umjereno	0,37 – 0,54	0,325 – 0,549	0,41 – 0,60	0,41 – 0,61
loše	0,18 – 0,36	0,100 – 0,324	0,25 – 0,40	0,20 – 0,40
vrlo loše	< 0,18	Nestanak vrste	< 0,25	< 0,20

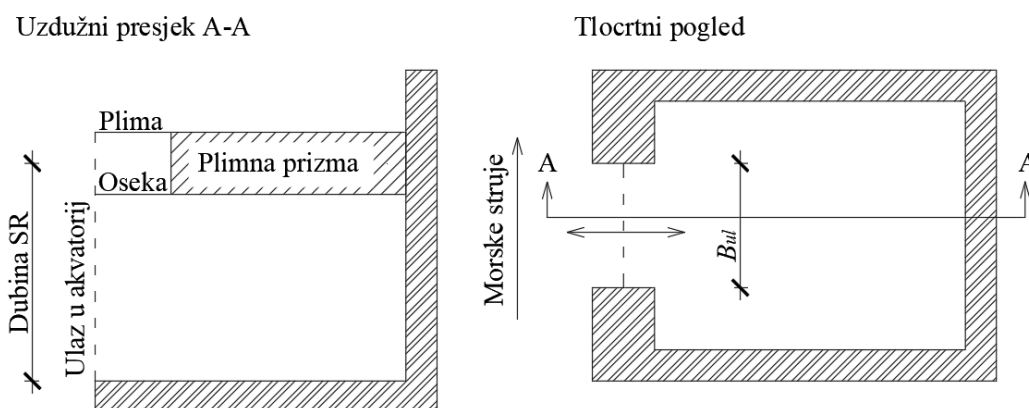
Konačna ocjena ekološkog stanja za pojedino priobalno vodno tijelo određuje se u skladu s najlošijom ocjenjenom pojedinog pokazatelja, odnosno ukoliko je najlošija ocjena nekog od pokazatelja određena kao npr. umjerena, tada se konačna ocjena ekološkog stanja vodnog tijela određuje kao umjerena.

## 2.3 Analitičke metode procjene učinkovitosti redukcije koncentracije onečišćivača unutar akvatorija prirodnim procesima

### 2.3.1 Analitički obrasci procjene izmjene vode unutar akvatorija

Prirodni procesi koji osiguravaju cirkulaciju i izmjenu mora u poluzatvorenim akvatorijima uključuju djelovanje plime i oseke, vjetra, valova, morskih struja te obalnih i podmorskih dotoka slatke vode (rijeke, vrulje, potoci itd.) (Sanford *i ostali*, 1992). Od navedenih generatora izmjene mora u lukama, često proučavan generator je plima i oseka čiji raspon u većini svjetskih priobalnih područja iznosi nekoliko metara, ovisno o lokaciji. Prema modelu plimne prizme (engl. *tidal prism*) (Van de Kreeke, 1983), svaka nova plima unosi novu svježju vodu u zatvoreni akvatorij u kojem se događa trenutačno razrjeđenje po čitavom volumenu zatvorenog akvatorija (Slika 2). Što je veći udio volumen mora koju plima unosi tijekom svakog svog perioda, odnosno volumen mora koju obuhvaća visinska razlika razina plime i oseke unutar akvatorija, to će se brže obavljati izmjena mora u luci.

Advekcija je detektirana kao dominantni oblik pronosa onečišćenja u tekućem mediju, stoga je neophodno poznavanje hidrodinamike tekućine u kojem se onečišćenje pojavljuje kako bi se kvalitetno predviđalo njegova kretanja i kvantificirali utjecaji (Solé *i ostali*, 2006; Piroddi *i ostali*, 2015). Advekcija u obliku morskih struja nije prisutna unutar prirodno ili umjetno poluzatvorenih akvatorija (estuarij, laguna, luka ili marina), zato može doći do akumulacije onečišćenja u ustajaloj vodi ili sedimentu akvatorija (Recreational navigation Commission, 2008).



Slika 2 Uzdužni presjek i tlocrtni pogled shematskog prikaza akvatorija proizvoljnog oblika s prikazom plimne prizme (engl. *tidal prism*)

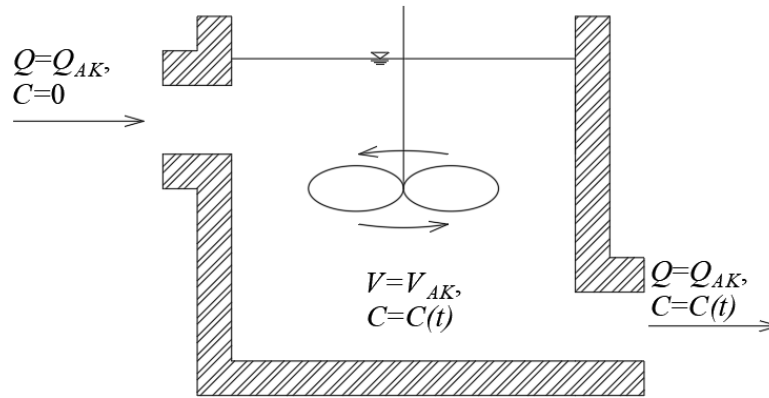
Radi slabe sposobnosti samopročišćavanja putem prirodnih procesa, zatvoreni i poluzatvoreni akvatoriji su naročito osjetljivi na potencijalne izvore onečišćenja. Dominantni generatori cirkulacije mora unutar zatvorenih područja su plimne oscilacije, vjetar, valovi, termohaline cirkulacije i dotok slatke vode s kopna putem vodotoka, vrulja i potpovršinskog tečenja. Boljom cirkulacijom mora moguće je brže izmjestiti onečišćenja koja plivaju u moru iz poluzatvorenog akvatorija prema otvorenom moru i time spriječiti nepovoljne utjecaje uzrokovane onečišćavanjem (Schwartz i Imberger, 1988; DiLorenzo *i ostali*, 1994).

Vrijeme izmjene mora i vrijeme zadržavanja su dvije vrijednosti koje se koriste za kvantifikaciju učinkovitosti izmjene mora poluzatvorenih akvatorija. Tijekom prethodnih istraživanja uočena je funkcijska veza između vremena potrebnog za izmjenu mora sadržanog unutar akvatorija s morem izvan akvatorija i opasnosti od onečišćenja (Monsen *i ostali*, 2002). Istraživanja su provedena analizirajući razna nepovoljna djelovanja na ekosustav poput štetnog cvjetanja algi, te je zapažen pozitivan učinak povećanjem izmjene mora na akumulaciju i manifestaciju onečišćenja (Monsen *i ostali*, 2002). Vrijeme izmjene (engl. *Flushing time*) je definirano sljedećom jednostavnom matematičkom formulom (Geyer *i ostali*, 2000):

$$T_f = \frac{V_{AK}}{Q_{AK}} \quad (1)$$

gdje je  $T_f$  vrijeme izmjene vode unutar kontrolnog volumena,  $V_{AK}$  je volumen kontrolnog volumena i  $Q_{AK}$  protok koji prolazi kroz kontrolni volumen. Jednadžba (1) prikazuje najjednostavniji oblik procjene izmjene mora, zbog svojih pretpostavki trenutnog i jednolikog miješanja unutar akvatorija te izuzeća mogućnosti da se morska voda koja je izašla iz akvatorija tijekom prethodne oseke može djelomično vratiti u akvatorij tijekom iduće plime. Također se formulacija ne oslanja na neki određeni prirodni generator cirkulacije poput plimnih oscilacija, valova ili vjetra, već daje opći oblik protoka kroz kontrolni volumen.

Kako bi se pomoću vrijednosti izmjene vode izračunala promjena koncentracije onečišćenja potrebno je zadržati određene pretpostavke. Pretpostavka u okviru CSTR modela (engl. *Continuous Stirred-Tank Reactor*) podrazumijeva da se količina mora koja ulazi u prethodno definirani kontrolni volumen trenutno u potpunosti izmiješa s već prisutnom tekućinom (Schmidt, 2005) (Slika 3).



Slika 3 Shematski prikaz CSTR modela (engl. *Continuous Stirred-Tank Reactor*)

Nakon što se čestice onečišćenja trenutno jednoliko rasporede unutar upravo izmiješane tekućine, efluent koji izlazi iz kontrolnog volumena posjeduje jednaku koncentraciju onečišćenja kao i tekućina unutar kontrolnog volumena. Drugim riječima, radi se o jednadžbi očuvanja mase s pretpostavkom trenutne jednolike prostorne raspodjele onečišćenja unutar kontrolnog volumena, a navedeno se pomoću jednadžbe može prikazati na sljedeći način:

$$C(t) = C_0 e^{-(Q_{AK}/V_{AK})t} = C_0 e^{-t/T_f} \quad (2)$$

gdje je  $C$  trenutna koncentracija u vremenskom trenutku  $t$ ,  $C_0$  početna koncentracija unutar kontrolnog volumena i  $t$  proteklo vrijeme. Zbog oblika matematičke formulacije, koncentracija nikada neće dostići nulu, čak niti nakon beskonačno vremena. Kako bi se navedeni nedostatak modela izbjegao, kao referentnu vrijednost koncentracije za usporedbu između konstruktivnih rješenja promatra se koncentracija onečišćenja nakon  $T_f$  vremena koja iznosi 37% ( $e^{-1}$ ) od početne koncentracije  $C_0$ .

Prema preporukama U.S. Environmental Protection Agency cilj je postići vrijeme izmjene  $T_f$  koje će omogućiti smanjenje koncentracije do 37% ( $e^{-1}$ ) unutar 4 dana, te takvo stanje bi se okarakteriziralo kao dobro. Ako je vrijeme izmjene od 4 dana od 10 dana, tada se stanje može definirati kao umjereno, a ako je vrijeme izmjene veće od 10 dana onda kao loše stanje (Environmental Protection Agency, 1985). Kako evaluacija protoka kroz kontrolni volumen može biti kompleksan aspekt procjene vremena izmjene mora, definirana je sljedeća formulacija za izračun vremena izmjene mora koja uzima plimne oscilacije kao dominantni generatora cirkulacije mora (Sanford i ostali, 1992; Luketina, 1998):

$$T_f = \frac{V_{AK} T_{po}}{(1-b)V_{po}} \quad (3)$$

gdje je  $T_f$  vrijeme izmjene vode unutar kontrolnog volumena,  $V_{AK}$  srednji volumen akvatorija odnosno kontrolnog volumena,  $T_{po}$  period plimnih oscilacija, a  $V_{po}$  volumen koji protječe kroz akvatorij tokom jedne plimne oscilacije uzrokovan samo plimnim oscilacijama, odnosno plimna prizma i  $b$  faktor povratnog toka. Kako bi se uzela u obzir količina „stare vode“ (voda koja je istekla iz akvatorija u prethodnoj oseci) koja se vrati u akvatorij, koristi se varijabla  $b$ . Ukoliko se pretpostavi da  $b$  iznosi 0, tada nema „stare vode“ koja ulazi u akvatorij tijekom plima. Veličina faktora povratnog toka ovisi o oceanografskim prilika u okolici akvatorija i tako određuje buduću sudbinu mora koje izađe iz akvatorija tijekom oseke. Također je pretpostavljeno stanje na lokaciji akvatorija gdje su konstantne amplitude i periodi plimnih oscilacija.

Navedeni analitički model predstavljen jednačbom (3) koji uzima u obzir samo plimne oscilacije kao generator cirkulacije mora, kasnije je proširen utjecajem slatkovodnih dotoka u obliku rijeka i potoka koji utječu u promatrano područje estuarija. Formulacije se može prikazati na slijedeći način (Luketina, 1998):

$$T_f = \frac{V_{AK}}{(1-b)\frac{V_{po}}{T_{po}} + (1+b)\frac{I}{2}} \quad (4)$$

gdje se, osim varijabli koje su prikazane u jednačbi (3), pojavljuje varijabla  $I$  koja označava volumen slatkovodnog dotoka vode kroz rijeku tijekom jedne plimne oscilacije. Pretpostavka za izvođenje jednačbe (4) govori kako vrijednost dotoka slatke vode putem vodotoka treba biti relativno malo u usporedbi s vrijednošću protjecanja mora uzrokovanim plimnim oscilacijama ( $V_{po}/T_{po} > I/2$ ) (Luketina, 1998).

Analitički modeli prikazani jednačbama (1), (2), (3) i (4) ne uzimaju u obzir druge prirodne generatore cirkulacije koje mogu doći do izražaja u područjima mikroplimnih uvjeta poput valova, vjetra, cirkulacije pokrenute prostornim razlikama u gustoći tekućine i drugo. Također je nedostatak navedenih metoda potpuni manjak informacije o prostornoj varijabilnosti

sposobnosti samopročišćavanja akvatorija putem prirodnih procesa koji generiraju cirkulaciju mora, a time i advekciju onečišćenja. Utjecaj više ulaza koji vode u akvatorij okružen lučkom infrastrukturom i njihov prostorni raspored na miješanje morske vode unutar akvatorija, te konačno smanjenje koncentracije onečišćivača nije uzeto u obzir.

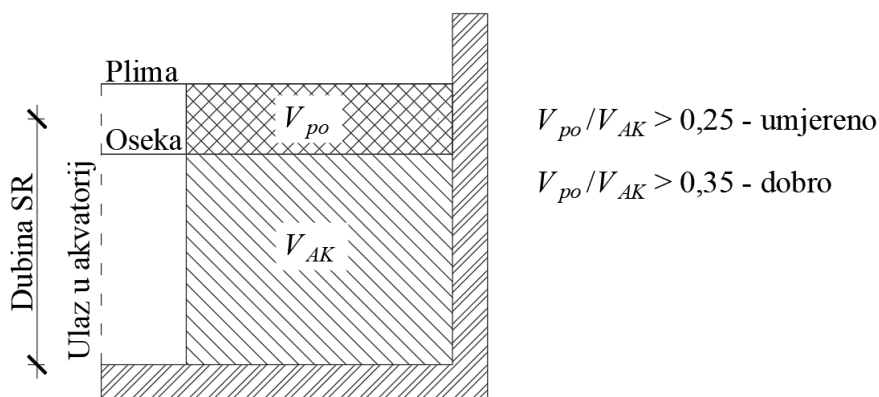
Kako bi se dobio uvid u prostornu raspodjelu zadržavanja onečišćenja unutar akvatorija potrebni su numerički modeli koji daju informaciju o vremenu zadržavanja (engl. *residence time*). Modeli mogu numerički promatrati onečišćenje kao Langrageovu pasivnu česticu koja se pronosi pomoću kretanja mora ili kao skalarno polje pasivnog trasera. U slučaju praćenja pasivne čestice, vrijeme zadržavanja je definirano kao vrijeme koje je potrebno da čestica izađe izvan akvatorija pokrenuta hidrodinamikom fluida (Dronkers i Zimmerman, 1982). Ako su čestice u početnom stanju jednoliko raspodijeljene po domeni, moguće je izvesti i zabilježiti vrijeme koje je bilo potrebno svakoj pojedinoj pasivnoj čestici da izađe iz akvatorija s obzirom na lokaciju u akvatoriju (navedeno vrijeme se zove vrijeme zadržavanja). Navedenim postupkom moguće je dobiti prostornu raspodjelu sposobnosti samopročišćavanja unutar domene akvatorija. Ako se promatra onečišćenje kao skalarno polje pasivnog trasera, tada je relevantna informacija podatak o srednjem vremenu zadržavanja odnosno vremenu da srednja koncentracija trasera unutar kontrolnog volumena akvatorija padne na 37 % ( $e^{-1}$ ) početne koncentracije. Prostorna raspodjela vremena zadržavanja unutar domene može drastično varirati ovisno o batimetriji i prisutnim prirodnim generatorima. U blizini ulaza u akvatorij se mogu dobiti vrijednosti oko 1 sat, a u zaklonjenim lokacijama akvatorija vrijednosti i do dva reda veličine veće (Cucco i Umgiesser, 2006).

Proračuni vremena zadržavanja uglavnom ne razmatraju fizikalne i kemijske karakteristike onečišćenja jer upošljavaju pasivni traser, odnosno navedeni nedostatak ne razlikuje različite vrste onečišćenja, nego ih sve sagledava jednako.

### 2.3.2 Preporuke za tlocrtno oblikovanje marina/luka u obliku analitičkih obrazaca

Prema preporukama međunarodne organizacije PIANC, odnos volumena vode koji ulazi u akvatorij tijekom plime i ukupnog volumena akvatorija u trenutku plime treba biti veći od 0,25, a poželjno veći od 0,35 (Recreational navigation Commission, 2008) (Slika 4). Stoga je u područjima s relativno malim rasponom oscilacijama plime i oseke potrebno predati posebnu pažnju oblikovanju i dimenzioniranju obalnih građevina prilikom projektiranja luka koje uključuju tlocrtnu geometriju luke, širinu i poziciju ulaza u luku, dubinu luke, nagib dna te primjenu propusta za cirkulaciju.

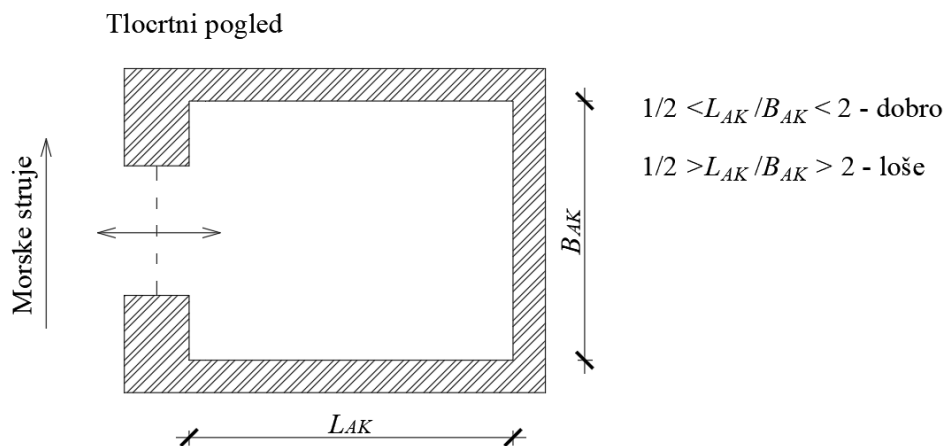
Uzdužni presjek



Slika 4 Preporučena granične vrijednosti omjera volumena plimne prizme ( $V_{po}$ ) i ukupnog volumena akvatorija ( $V_{AK}$ ) u trenutku plime za kvalitetnu izmjenu mora

Omjer tlocrtno dužine  $L_{AK}$  i širine luke  $B_{AK}$  ima značajan utjecaj na brzinu izmjene mora pod djelovanjem plime i oseke (ostali generatori kao što su valovi i vjetar nisu analizirani, analizirane su luke samo s jednim ulazom) (B. R. E. Nece i Asce, 1984) (Slika 5). Najpovoljnija obilježja koja se odnose na izmjenu mora posjeduju luke s omjerom  $L_{AK}/B_{AK}=1$ , a prihvatljivi omjeri se nalaze u rasponu  $L_{AK}/B_{AK}=1/2 - 2$ . Kod tlocrtno geometrije kod koje ovaj omjer nije ostvaren ( $1/2 > L_{AK}/B_{AK} > 2$ ) stvaraju se dvije ili više tlocrtnih cirkulacijskih ćelija koje onemogućuju izmjenu mora u dijelovima akvatorija udaljenijih od ulaza u luku. Ekstrapolacija ovih rezultata na raspon oscilacija plime i oseke manji od 1,2 m nije potvrđena u znanstvenoj literaturi.



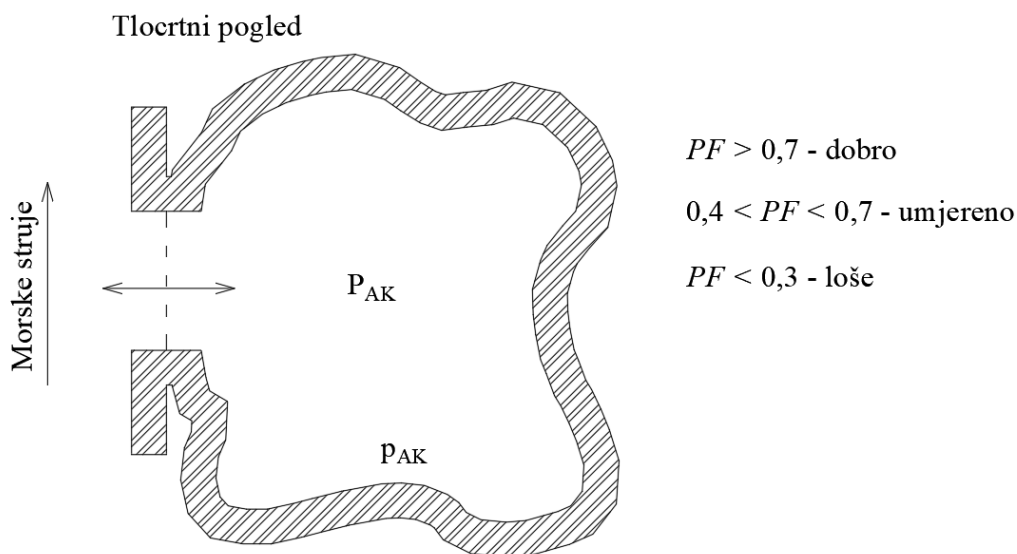


Slika 5 Preporučene granične vrijednosti omjera dužine ( $L_{AK}$ ) i širine akvatorija ( $B_{AK}$ )

Za krivocrtnu tlocrtnu geometriju luka preporuča se primjena parametra tlocrtnog oblika akvatorija (engl. *planform factor*):

$$PF = 4\pi \left( P_{AK} / p_{AK}^2 \right) \quad (5)$$

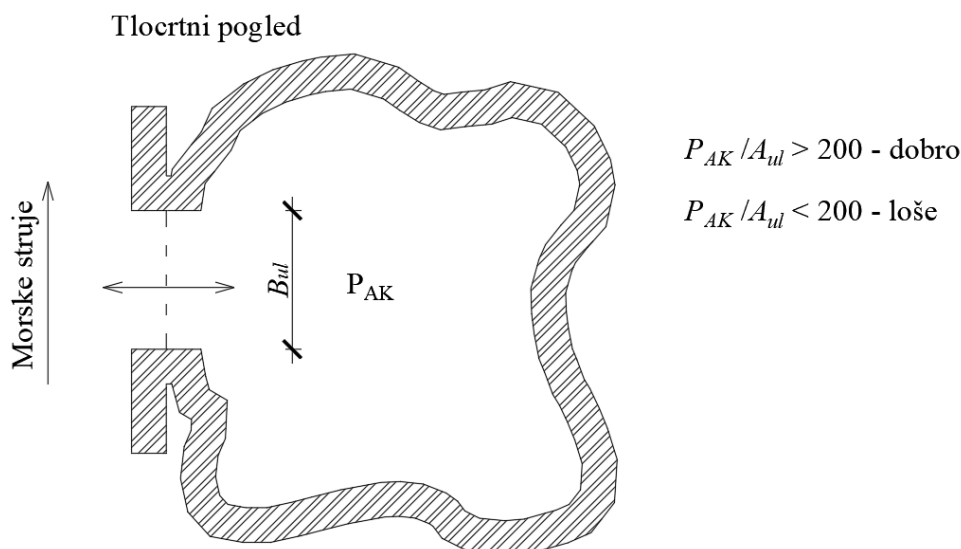
gdje je  $P_{AK}$  površina akvatorija, a  $p_{AK}$  opseg akvatorija. Lučki akvatoriji kod kojih se tlocrtno oblikovanje može okarakterizirati koeficijentom  $PF > 0,7$  posjeduju dobre tlocrtno predispozicije za izmjenu mora pod djelovanjem plime i oseke, dok akvatoriji s  $PF < 0,4$  posjeduju loše predispozicije (Recreational navigation Commission, 2008) (Slika 6).



Slika 6 Preporučene granične vrijednosti parametra tlocrtnog oblika akvatorija ( $PF$ ) za krivocrtnu geometriju akvatorija marine ili luke

Uglovi akvatorija (u tlocrtnom smislu) su zone zadržavanja mora, te se preporuča zaobljenje uglova luka kako bi se izbjegla pojava mrtve zone s ustajalim morem. Navedena mjera zaobljenja uglova je s financijskog aspekta neprihvatljiva s obzirom da se gubi prostor za smještaj plovila.

Površina poprečnog presjeka ulaza u akvatorij  $A_{ul}$  u odnosu na tlocrtnu površinu akvatorija  $P_{AK}$  utječe na izmjenu mora u lukama pod djelovanjem samo plimnih oscilacija (Recreational navigation Commission, 2008) (Slika 7). Kod relativno uskih ulaza za koje vrijedi preporučeni odnos  $P_{AK}/A_{ul} > 200$  plima uzrokuje protjecanje kroz ulaz s većim brzinama nego što bi to bio slučaj za veće širine ulaza. Relativno velika ulazna brzina osigurava stvaranje veće turbulencije i cirkulacijske ćelije unutar akvatorija te posljedično bolje miješanje i izmjenu vode. Slični proces se događa i pri oseci kada morska voda izlazi iz luke i zbog povećanih brzina se učinkovitije miješa se s okolnim „čistim“ morem. U područjima gdje su prisutni mali rasponi plimnih oscilacija i na izmjenu mora dominantno utječu morske struje uzrokovane vjetrom, tada je primjereno ulaz u luku učiniti što širim i pozicioniranim u smjeru dominantnog vjetrova. Na ovaj način morska struja uzrokovana vjetrom potiče miješanje vode u akvatoriju i izmjenu s okolnim vodom (Environmental Protection Agency, 1985).



Slika 7 Preporuka omjera površine poprečnog presjeka ulaza ( $A_{ul}$ ) u zaštićeni akvatorij i površina akvatorija ( $P_{AK}$ )

U preporukama koje daju autori preporuča se primjena dva ulaza u luku (za luke tlocrtnih omjera izvan raspona  $1/4 > L_{AK}/B_{AK} > 4$ ) i djelovanje plimnih oscilacija kao prevladavajućeg generatora izmjene mora u luci (Recreational navigation Commission, 2008). Pri tome se ističe da površina poprečnog presjeka kroz koji protječe morska voda drugog ulaza treba biti reda veličine površine prvog ulaza.

### **2.3.3 Ograničenja analitičkih obrazaca**

Iako se vrijednost vremena izmjene mora pokazala kao vrlo vrijedan komparativni pokazatelj između varijantnih rješenja o sposobnosti samopročišćavanja putem prirodnih procesa, ne govori o apsolutnom riziku od pojedinog onečišćenja (B. R. E. Nece i Asce, 1984). Autori su istaknuli da iako nisko vrijeme izmjene mora rezultira boljom kakvoćom mora unutar poluzatvorenog akvatorija, vrijednost izmjene mora se ne može koristiti kao pokazatelj kakvoće samog mora.

Valja težiti numeričkim metodama koje će omogućiti rješavanje transportne jednadžbe onečišćenja s integriranim fizičkim i kemijskim karakteristikama onečišćenja poput disperzije u slijedećim slučajevima:

#### 1. U slučajevima pojave onečišćenja u sedimentu.

Neka onečišćenja ne plivaju slobodno unutar vodnog stupca poput teških metala, pesticida i komponenti fekalnog onečišćenja, nego se akumuliraju u sedimentu u slabo advektivnim sredinama poput luka i marina. U slučaju poplava, iskopa i gradnje drugih pomorskih građevina koje mogu utjecati na dinamiku sedimentacije u akvatoriju, može doći do oslobađanja onečišćenja iz sedimenta u vodno tijelo. Tada sam sediment na morskom dnu djeluje poput izvora onečišćenja. Pri procjeni rizika od onečišćenja koja imaju tendenciju sedimentacije za vrijeme iskopa i drugih građevinskih akumulacija, potrebno je uzeti u obzir potencijalno oslobađanje akumuliranog onečišćenja iz sedimenta. Za potpunu sliku anticipiranja potencijalnog onečišćenja pomoću numeričkih modela, potrebno je uzeti u obzir dinamiku sedimenta, naročito nakon gradnje pomorskih građevina koja imaju mogućnost utjecati na dinamiku sedimentacije.

2. Kod izduženih marina s nekonvencionalnim tlocrtnim oblicima

Nadalje, analitički obrasci ne daju informaciju o prostornoj raspodjeli onečišćenja unutar akvatorija tijekom promatranog vremena, već daju uopćeni okvir. Ako prostorna raspodjela učinkovitosti izmjene mora po akvatoriju ima veliku varijaciju, tada se smatra da je sposobnost akvatorija da omogući izmjenu morske vode loša. Navedeno se može očekivati u slučaju npr. izduženih marina ili luka koje zbog financijskih razloga nisu izgrađene u skladu s prethodno predstavljenim preporukama za oblikovanje marina, te u spomenutim uvjetima se može dešavati velika izmjena vode pri ulazu u akvatorij, a nekoliko reda veličine manja izmjena vode u zaklonjenijim dijelovima akvatorija.

3. Za potrebe procjene štetnog utjecaja cvjetanja algi.

Za kvalitetnije upravljanje rizicima od onečišćenja unutar zatvorenih i poluzatvorenih akvatorija valjalo bi uvesti integrirani numerički model koji uzima u obzir hidrodinamiku i karakteristična svojstva onečišćenja koja se transportiraju, uz uključivanje pronosa onečišćenja pomoću transporta sedimenta. Za pojedina negativna djelovanja poput štetnog cvjetanja algi potrebno je uzeti u obzir reprodukciju planktona, koncentraciju prisutnih nutrijenata i temperaturu.

U slučaju numeričkog modeliranja i prostorne evaluacije umanjavanja koncentracije proizvoljnog trasera nakon više ciklusa plimnih oscilacija, moguće je koristiti koeficijent izmjene mora na različitim lokacijama unutar akvatorija poput (x,y) dvodimenzionalne plohe, čija formulacija glasi (R. E. Nece i Asce, 1984):

$$E = 1 - (C_i / C_0)^{1/n_T} \quad (6)$$

gdje je  $E$  koeficijent izmjene mora,  $n_T$  broj ciklusa plime i oseke koje je proteklo,  $C_i$  koncentracija nakon  $n_T$  ciklusa plime i oseke na promatranjoj lokaciji i  $C_0$  početna koncentracija na proizvoljnoj lokaciji unutar domene. Veća vrijednost koeficijenta izmjene mora označava učinkovitiju izmjenu morske vode po pojedinim lokacijama unutar akvatorija gdje je informacija bilježena i analizirana. Navedenu analizu moguće je provesti samo primjenom numeričkog modela koji prati promjenu koncentracije unutar akvatorija.

Uvjet prihvatljive izmjene mora u svim dijelovima je definiran pomoću prosječnog koeficijenta izmjene mora u cijelom akvatoriju  $E$  i standardne devijacije navedene varijable po prostoru  $S_E$ . Standardna devijacija je definirana sljedećom formulacijom:

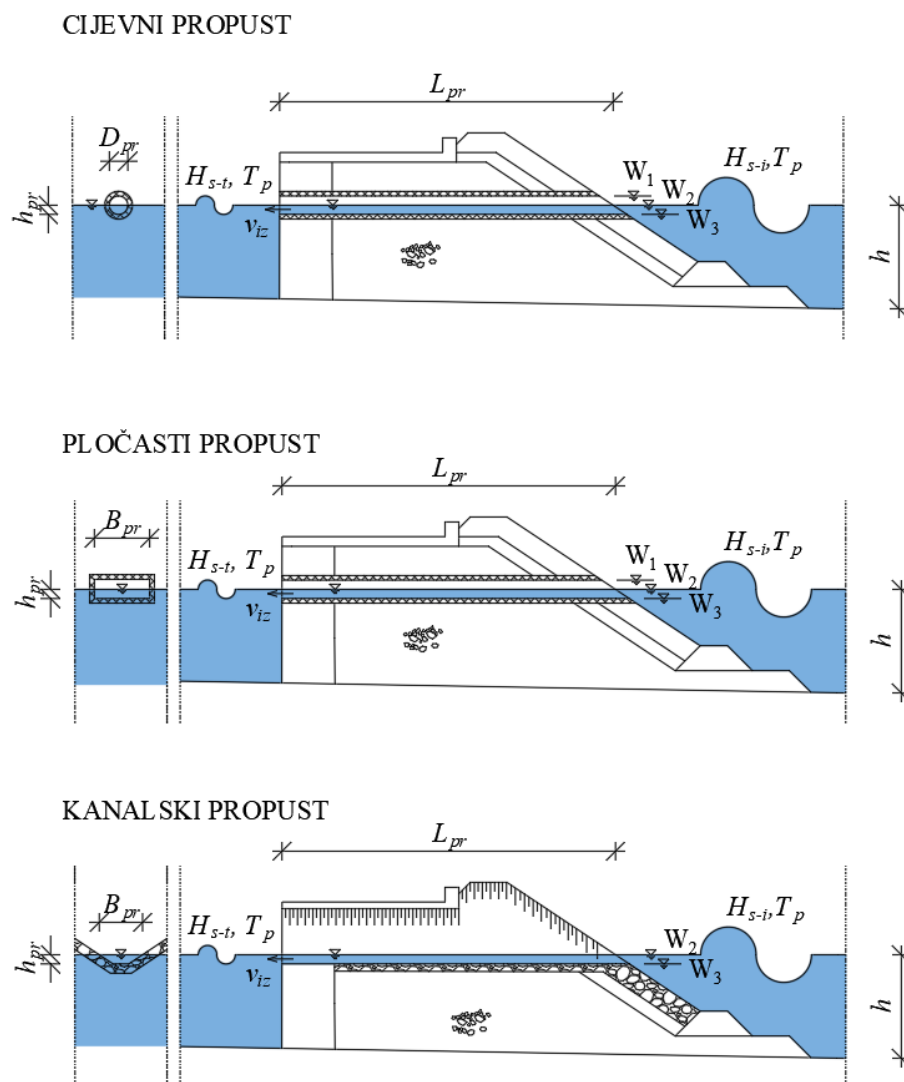
$$S_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \quad (7)$$

gdje je  $E_i$  opservirana vrijednost koeficijenta izmjene mora na proizvoljnoj lokaciji,  $\bar{E}$  prosječna vrijednost koeficijenta izmjene mora unutar akvatorija i  $N$  broj promatranih lokacija unutar akvatorija.

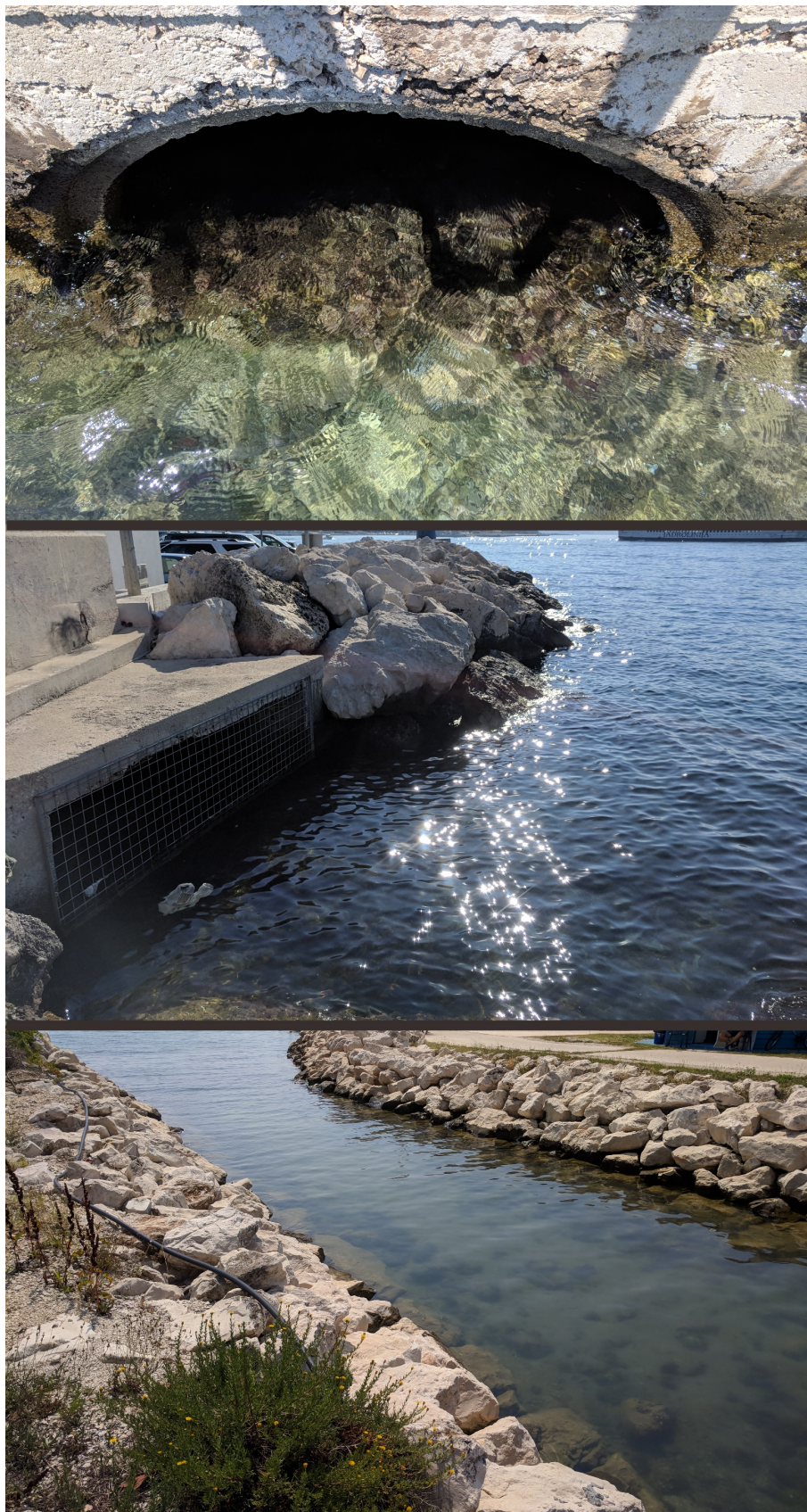
Vrijednost razlike koeficijenta izmjene mora i standardne devijacije koeficijenta izmjene mora unutar akvatorija ( $E-S_E$ ) prihvatljiva je ukoliko iznosi više od 0,1 (Smith *i ostali*, 2002). Ukoliko je razlika manja od 0,1 tada postoje područja unutar akvatorija koja imaju bitno manju izmjenu od područja u okolici ulaza u marinu.

## 2.4 Hidrauličke karakteristike propusta

Propusti su otvori ugrađeni u lukobran ili drugu lučku građevinu koji na se Mediteranu poglavito konstruiraju na način da mogu biti kružnog, pravokutnog ili kanalskog poprečnog presjeka, te omogućuju cirkulaciju morske vode kako bi se povećala učinkovitost izmjene mora (Slika 8 i Slika 9). Posljedično, veća izmjena mora sprječava akumulaciju hranjivih tvari, štetnih fitoplanktona i drugih oblika onečišćenja koja se mogu pojaviti unutar zaštićenog akvatorija (Yin *i ostali*, 1998; Monsen *i ostali*, 2002). Propusti djeluju, uz glavni ulaz u akvatorij, kao drugi manji ulaz koji omogućuje protjecanje morske vode s površinom poprečnog presjeka u pravilu jednakom ili manjom od površine poprečnog presjeka glavnog ulaza u marinu ili luku.



Slika 8 Tipovi propusta ovisno o obliku poprečnog presjeka: cijevni, pločasti i kanalski



Slika 9 Propust kružnog poprečnog presjeka u ACI marini Vodice (gore), pravokutnog poprečnog presjeka u ACI marini Split (sredina) i kanalskog poprečnog presjeka u komunalnoj lučici Vitrenjak (dolje)

Kako se propusti ugrađuju u lukobrane na lokacijama gdje su plimne oscilacije razmjerno male da samostalno ostvare zadovoljavajuću izmjenu mora u akvatoriju kroz ulaz, plime i oseke kao dominantni generator cirkulacije morske vode kroz propust u prethodnim istraživanjima se ne razmatraju (Stamou *i ostali*, 2004; Ohmura, 2009; Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Belibassakis *i ostali*, 2014). Veća važnost se unutar dosadašnjih istraživanja unaprijed pridaje drugim generatorima cirkulacije kroz propust poput vjetra i valova, ako se propust nalazi u području malih plimnih oscilacija poput Jadranskog ili Mediteranskog mora.

## **2.4.1 Izmjena mora kroz propust**

### **2.4.1.1 Plimne oscilacije i vjetar kao generator cirkulacije**

Istraživanja do sada provedena koja analiziraju cirkulaciju unutar akvatorija i njezinoj okolini poglavito se bave situacijama gdje je drugi ulaz red veličine glavnog ulaza, a tek manji dio ukoliko je drugi ulaz bitno manji (Umgiesser *i ostali*, 2014). Proučavanjem cirkulacije koja se odvija u 10 različitih laguna na Mediteranu uočena je više desetaka puta brža izmjena vode ukoliko je prisutno više od jednog ulaza u zaljev (Umgiesser *i ostali*, 2014). Ispitivanja u numeričkim modelima otkrivaju da se povoljan utjecaj vjetra na izmjenu mora može ostvariti samo u akvatorija s dva ulaza tako da se formira nagib razine mora unutar akvatorija (Umgiesser *i ostali*, 2014).

Primjerice, na području u okolini Venecije vjetar koji puše sa sjeveroistoka stvara nagib razine mora s rastućim nagibom od sjevernog područja prema južnom. Ako je nagib razine mora prisutan, stvara se stabilna cirkulacija u kojoj voda ulazi kroz sjeverni ulaz i napušta kroz južni ulaz u akvatorij, podižući izmjenu morske vode (Cucco i Umgiesser, 2006). 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 (Canu *i ostali*, 2012; Umgiesser *i ostali*, 2014). Učinkovitost miješanja je funkcija morfologije bazena, utjecaja vjetra i stratifikacije mora.

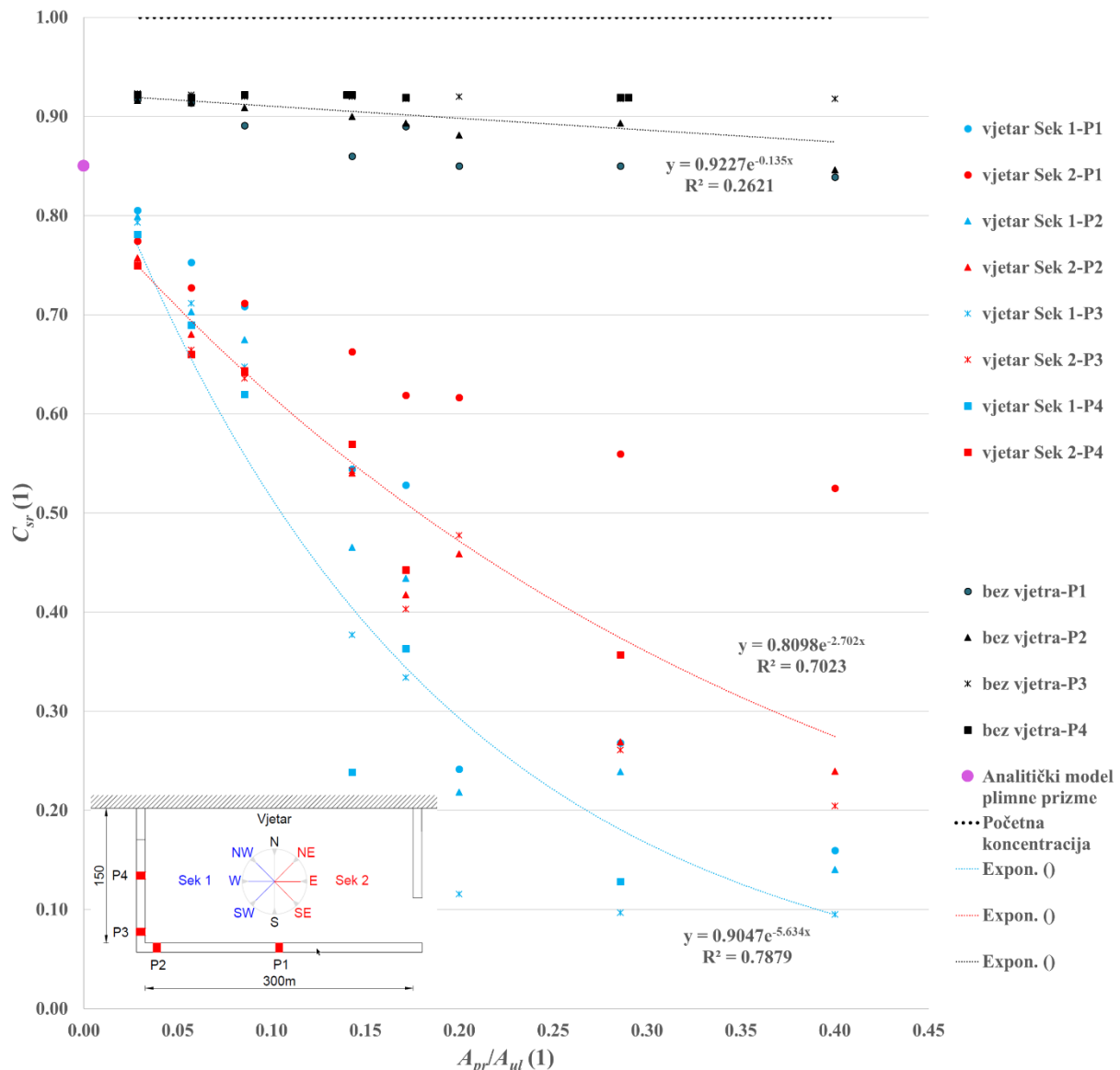
Nadalje, u nedavnim radovima provedene su analize korištenjem numeričkog modela u kojima je na modelu luke pravokutnog akvatorija ispitivan utjecaj vjetra, plimnih oscilacija te razdiobe gustoće na izmjenu mora kroz propuste raznih površina poprečnog presjeka (Lončar *i*



ostali, 2016, 2017). U kronološki prvom radu stavljeno je težište na propuste malog poprečnog presjeka s omjerom površine poprečnog presjeka propusta i ulaza  $A_{pr}/A_{ul} = 0,02$  do  $0,04$  (Lončar i ostali, 2016). Dok se u narednom radu analizirani propusti većeg poprečnog presjeka s omjerom  $A_{pr}/A_{ul} = 0,03-0,4$  (Lončar i ostali, 2017). Bitan ishod radova obuhvaća zaključke koji govore da volumen koji protječe kroz propuste malih površina poprečnog presjeka zanemari u odnosu na volumen koji protječe kroz ulaz luke. Definiran je udio volumena koji protječe kroz propust u odnosu na volumen kroz ulaz tijekom djelovanja vjetra zajedno s oscilacijama plime i oseke, te navedeni udio iznosi 1-2%. Navedena konstatacija je u skladu s već izvedenim zaključcima u okviru rada izdanog od organizacije PIANC, te upućuje na neučinkovitost propusta malih površina poprečnog presjeka na izmjenu ukupnog volumena mora u akvatoriju (Recreational navigation Commission, 2008).

Detaljne analize funkcioniranja propusta većih površina poprečnog presjeka su već provedene, gdje se uz utjecaj raznih generatora cirkulacije proučava i utjecaj tlocrtnog pozicioniranja propusta u tijelu lukobrana (Lončar i ostali, 2017). Ispitivane su četiri tlocrtne pozicije propusta P1-P4 kojima je varirana površina poprečnog presjeka  $A_{pr}$ , uz variranje površine poprečnog presjeka ulaza u luku  $A_{ul}$  (Slika 10). Cirkulacija unutar numeričkog modela je pokrenuta pomoću vjetra iz osam smjerova, s tim da je svaki smjer predstavljen s vjetrovnom situacijom linearnog porasta brzine vjetra od  $0 - 5 \text{ Bf}$  i isto tako faze opadanja, sve zajedno u trajanju od 24 sata. Oscilacija plime i oseke definirana je u obliku poludnevnog tipa i raspona koji iznosi  $0,3 \text{ m}$ .

Mjerilo uspješnosti određene pozicije propusta ocjenjeno je srednjom koncentracijom konzervativnog trasa  $C_{smjer\ vj.}$  u čitavom akvatoriju nakon 24 sata simulacije, uzimajući u obzir da je traser na početku simulacije bio homogeno raspoređen po volumenu luke s vrijednošću  $1 \text{ mg/l}$ . Faktor povratnog toka je uzet s vrijednošću  $b = 0$  (onečišćenje koje je izašlo izvan luke se nije moglo vratiti u akvatorij). Svaki simbol na grafu je uređen par  $(A_{pr}/A_{ul}, C_{sr-sek})$  uzimajući u obzir kako je  $C_{sr-sek}$  određen kao srednja vrijednost proračunata za tri smjera puhanja vjetra  $C_{sr-sek1} = 1/3 \cdot (C_{NW} + C_W + C_{SW})$ , isto tako je napravljeno i za  $C_{sr-sek2} = 1/3 \cdot (C_{SE} + C_E + C_{NE})$ .



Slika 10 Utjecaj omjera površine poprečnog presjeka pravokutnog pločastog propusta i ulaza u luku ( $A_{pr}/A_{ul}$ ) na srednju koncentraciju konzervativnog trasea ( $C_{sr}$ ) nakon 24 sata simulacije. Simulacija uključuje djelovanje vjetera i oscilacije plime i oseke za vjetrove iz smjerova sektor 1 (plava, NW-W-SW) i sektor 2 (crvena, SE-E-NE).  $C_{sr-sek1} = 1/3s \cdot (C_{NW} + C_W + C_{SW})$ ;  $C_{sr-sek2} = 1/3 \cdot (C_{SE} + C_E + C_{NE})$ ; bez vjetera (crna) (Carević i ostali, 2019)

Zaključno se može istaknuti kako podaci za sektor 1 daju manje  $C_{sr}$  (niže pozicionirana plava krivulja) što ukazuje da vjetrovi koji pušu približno u smjeru od pozicije propusta prema poziciji ulaza u luku daju najmanje  $C_{sr}$ . Smjerovi vjetera iz sektora 2 daju lošije rezultate (više pozicionirana crvena krivulja), dok vjetrovi koji pušu približno okomito na spojnicu ulaz-propusti (vjetrovi iz S i N smjera) daju općenito najlošije rezultate te ovdje nisu niti prikazani. Eksponecijalne krivulje prilagođene na podatke iz sektora 1 i 2 su prikazane crvenom i plavom bojom (Expon. na Slika 10). S obzirom na ekspancijalni pad crvene i plave krivulje (Slika

10) može se zaključiti da površina poprečnog presjeka propusta  $A_{pr}$  ima značajnu ulogu u izmjeni mora u lukama te se učinkovitost izmjene mora značajno poboljšava, uzimajući u obzir da navedeni zaključak vrijedi samo za vjetar kao dominantni generator cirkulacije. U slučajevima kada nema vjetra, odnosno kada je generator cirkulacije samo plima i oseka dobivaju se rezultati prikazani crnim simbolima (Slika 10). Može se zaključiti da se vrijednosti  $C_{sr}$  označene crnom krivuljom kreću oko vrijednosti 0,9 za sve pozicije propusta što ukazuje na bitno slabiju cirkulaciju mora u luci kada djeluju samo plimne oscilacije nego u slučaju kada puše vjetar. Situacije označene crnom krivuljom su kritične situacije kada je opasnost od antropogenog onečišćenja najveća.

Ukoliko se promatra propust manjih površina poprečnog presjeka ( $A_{pr}/A_{ul}\sim 0,02-0,05$ ), podaci modela s vjetrom i bez vjetra su relativno bliski ( $C_{sr}\sim 0,92$  i  $C_{sr}\sim 0,77$ ) s podatkom određenim pomoću modela plimne prizme (engl. *tidal prism*) (Barber i Wearing, 2004) ( $C_{sr}\sim 0,85$ ) za luke bez propusta pod djelovanjem samo plimnih oscilacija. Ovo upućuje na zaključak da, ako se uvažavaju sve pretpostavke i nedostaci numeričkog modela (pretpostavke modela su predstavljene u izvornom radu (Lončar i ostali, 2017)), propusti malih površina poprečnog presjeka nemaju značajan utjecaj na izmjenu ukupnog volumena mora u luci bez obzira na generator cirkulacije (vjetar ili plimne oscilacije), što nanovo potvrđuje zaključak iz izvještaja izdanog od organizacije PIANC o neučinkovitosti propusta malih površina poprečnog presjeka (Recreational navigation Commission, 2008). Iako se pokazalo da kroz propuste manjih površina poprečnog presjeka ne protječu značajni volumeni mora u usporedbi s ulazom u akvatorij, njihova ugradnja u blizini mrtvih zona može imati značajan utjecaj na dio akvatorija gdje je izmjena mora relativno niska s obzirom na srednju izmjenu mora unutar akvatorija.

Ovdje je potrebno napomenuti da u okviru numeričkog modela prikazanog u radu (Lončar i ostali, 2017) nije modeliran utjecaj plovila, gatova i sidrenog sustava na cirkulaciju mora pod djelovanjem vjetra. Intuitivno se može zaključiti da će u tom slučaju biti slabiji prijenos energije vjetra na vodenu masu te posljedično i slabija cirkulacija, što će rezultirati više pozicioniranom plavom i crvenom krivuljom (Slika 10).

Ako se promatraju vrijednosti  $C_{sr}$  za poziciju propusta P1 (crveni i plavi kružići na Slika 10), dodatno se može zaključiti da pozicija P1 ima veće vrijednosti  $C_{sr}$  u odnosu na vrijednosti ostalih pozicija propusta (P2, P3 i P4) za oba sektora puhanja vjetra. Ovo upućuje da je pri odabiru pozicije propusta povoljnije odabrati poziciju udaljeniju od ulaza u luku jer se time

aktivira cirkulacija većeg volumena akvatorija. U situacijama bez vjetra (crni simboli) nema naznake da pozicija propusta utječe na izmjenu mora.

Analize su vezane na utjecaj vjetra u trajanju od 24 sata, što predstavlja kratkoročni i izolirani slučaj. U stvarnosti se cirkulacija odvija paralelno od strane više generatora, tako da istovremeno s vjetrom nastaju valovi koji uzrokuju određenu cirkulaciju, miješanje mora koja uzrokuje gradijent gustoće između luke i okolnog mora, te plima i oseka. Ukoliko se uzme u obzir period cijele godine, drugi generator može biti dominantan na ukupnu cirkulaciju kroz propuste zbog svoje stalne prisutnosti iako je intenzitetom manji, za razliku od vjetra koji se pojavljuje povremeno. Dominantni generator također ovisi o klimatološkim i oceanografskim uvjetima na lokaciji, te konstruktivnim uvjetima građevine. Unutar područja gdje su prevladavajuće klime poput sredozemne koja se može naći na Mediteranu, posebnu pažnju treba dati ljetnom periodu kada je najveća vjerojatnost cvjetanja mora i ubrzane produkcije fitoplanktona kako je to opisano unutar poglavlja 2.1.1.

#### **2.4.1.2 Valovi kao generator cirkulacije**

Radovi koji analiziraju utjecaj valova poglavito podrazumijevaju da veća penetracije energije valova odnosno koeficijent transmisije prati veći protok koji se ostvaruje kroz propust pod utjecajem valova (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014). Preliminarno istraživanje provedeno na fizičkom modelu malog mjerila (mjerilo 1:50) ukazuju na mogući neovisan odnos između koeficijenta transmisije i protoka kroz propust pod utjecajem valova (Stagonas *i ostali*, 2009). Navedeno istraživanje uzima u obzir mjerene vrijednosti brzine na izlazu iz propusta kao relevantnu informaciju o protoku koji se ostvaruje kroz propust, ali nema istraživanja koja mogu potvrditi njihovu povezanost u navedenim uvjetima.

Numerički model propusta konačne dužine pravokutnog poprečnog presjeka je uspostavljen pomoću laboratorijskih mjerenja provedenih u valnom bazenu (Belibassakis *i ostali*, 2014). Uspostavljen model obuhvaća slučajeve kada je os propusta pravokutnog poprečnog presjeka u visini srednje razine mora, a interakcija vala s gornjim rubom propusta se nije odvijala zbog relativno male valne visine u odnosu na visinu propusta (Belibassakis *i ostali*, 2014; Tsoukala *i ostali*, 2014). Uz navedene pretpostavke numeričkog modela pokušao se dobiti volumen vode koji protječe kroz propust tijekom pojedine monokromatske valne situacije, te se spomenuta količina volumena pokušala dovesti u korelaciju sa „Stoksovim driftom“ koji je

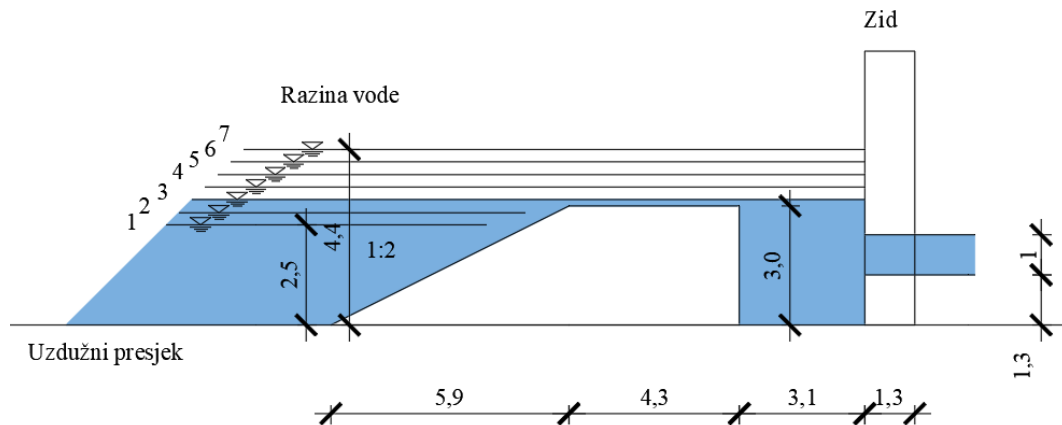
induciran morskim valovima. Autori su definirali formulaciju za bezdimenzijski volumni protok uslijed „Stoksovog drifta“ na slijedeći način (Belibassakis *i ostali*, 2014):

$$q_w = \frac{Q_w}{cH_i^2} = \frac{\left| 1 + \frac{2i}{\pi} \ln \left( \frac{\gamma k \frac{H_i}{2}}{4} \right) \right|^{-2}}{4 \tanh(kh_{pr})} \quad (8)$$

gdje je  $q_w$  bez dimenzijski volumni protok zbog „Stoksovog drifta“,  $Q_w$  protok ostvaren valovima,  $c$  brzina faze vala,  $H_i$  valna visina incidentnog vala,  $k$  valni broj ( $k = 2\pi / L_i$ ),  $h_{pr}$  dubina mora unutar propusta i  $\gamma$  Eulerova konstanta ( $\ln \gamma = 0,5772\dots$ ). Istraživači su zaključili kroz jednadžbu (8) da incidentni valovi većih perioda uzrokuju veće protoke kroz propust. Zaključak također povezuje s rastom koeficijenta transmisije zbog rasta valne dužine, odnosno da je rast protoka kroz propust povezan s rastom koeficijenta transmisije kroz propust.

U istočnoj Aziji (Japan i J. Koreja) implementira se drukčije oblikovanje propusta (Slika 11) u odnosu na uobičajeno oblikovanje kakvo se može pronaći na Mediteranu (Slika 8) koje u pravilu primjenjuje valolom ispred vertikalnog zida s ugrađenim propustom. Vertikalna pregrada onemogućava direktnu transmisiju valova u horizontalnom smjeru prema akvatoriju, nego tok morske vode najprije usmjerava vertikalno prema dnu. Međuprostor između valoloma i vertikalnog zida se ispunjava morskom vodom kroz interakciju incidentnih valova i građevine, te koja uslijed povišene razine mora unutar ispunjenog međuprostora teži protjecati kroz propust u akvatorij i time omogućuje ulazak svježeg mora u marinu (Ohmura, 2007, 2009; Kim *i ostali*, 2011).

Autori su odredili kako je ključno da razina mora bude vrlo blizu gornjem rubu uronjenog lukobrana kako bi se omogućio značajniji protok (Slika 11; odgovara razini 3). Uz povoljno definiranu razinu mora, ispitivanja su ukazala na valnu visinu incidentnog vala kao dominantni valni parametar koji utječe na iznos protoka u akvatorij kroz propust.



Slika 11 Shematski prikaz laboratorijskog modela propusta kakav se implementira u istočnoj Aziji (Japan i J. Koreja) koji se sastoji od uronjenog lukobrana ispred vertikalnog zida s ugrađenim propustom (prilagođeno od (Ohmura, 2007, 2009; Kim *i ostali*, 2011))

### 2.4.1.3 Hidraulička svojstva propusta tijekom protjecanja vode

Postoje opsežne studije o projektiranju i primjeni cijevnih propusta kao dijela riječne hidraulike (Smith i Oak, 1995; Keils, 2008; Tullis *i ostali*, 2008; Tullis i Robinson, 2008). Istraživanja pridaju veliku pozornost na koeficijente lokalnog gubitka energije na ulazu u propust i izlazu iz propusta i njihove osjetljivosti na oštećenje propusta i promjene razine vode ispred propusta. Putem energetske jednadžbe, uz prethodno određenu visinu gornje i donje vode, definiraju se lokalni i linijski gubici kroz propust kao i ostvareni protok kroz isti, na temelju geometrijskog oblikovanja propusta. Navedeni pristup bi se jednako mogao primijeniti na osnovu visinske razlike zbog plimnih oscilacija između dviju strana propusta kako bi se definirao protok kroz propust uslijed plime i oseke. Ne postoje istraživanja o primjenjivosti navedenog pristupa u maritimnim uvjetima gdje je protok uzrokovan plimnim oscilacijama.

Uobičajeno je da lokalni gubici energije na ulazu i izlazu iz propusta su dominantni uzroci gubitka energije u kratkim cijevima i propustima (Tullis i Robinson, 2008; Board i National Academies of Sciences and Medicine, 2012). Ako se brzine morskih struja u okolici propusta smatraju zanemarivima u usporedbi s brzinama unutar propusta, uobičajeno je dodijeliti vrijednost 1 koeficijentu lokalnog gubitka energije na izlazu (Tullis i Robinson, 2008). Prethodna istraživanja o hidrauličkim načelima propusta na vodotocima pokazala su da lokalni koeficijent gubitka na ulazu može varirati s varijacijom razine vode ispred propusta (visine gornje vode), posebice za razine vode za koje vrijedi  $h_{pr}/D_{pr} < 1,5$  ( $h_{pr}$  - razina vode izmjerena

od dna od propusta,  $D_{pr}$  - promjer propusta) (Smith i Oak, 1995; Tullis i ostali, 2008). Koeficijent lokalnog gubitka na ulazu u takvim situacijama raste s rastom razine vode za većinu oblikovanja ulaza u propust. Preporuke za hidrauličko oblikovanje propusta često ističu sljedeću formulaciju za proračun ukupnog gubitka energije tekućine koja protječe kroz propust (U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2012):

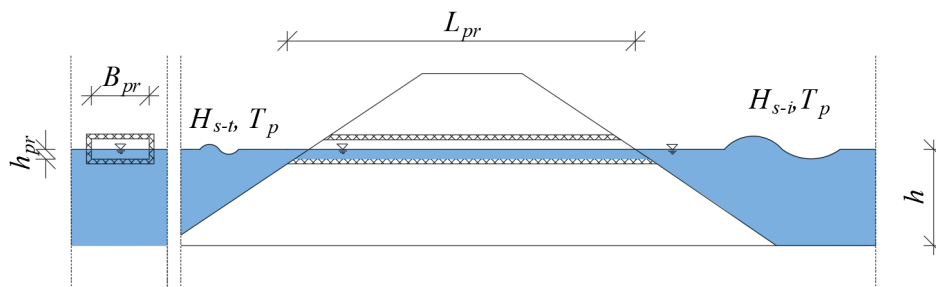
$$\Delta H = \left( k_{izlaz} + k_{ulaz} + \frac{19.63 \cdot n^2 \cdot L_{pr}}{R^{1.33}} \right) \frac{v_{pr}^2}{2g}, \quad (9)$$

gdje je  $\Delta H$  ukupni gubitak energije,  $k_{izlaz}$  koeficijent lokalnog gubitka na izlazu,  $k_{ulaz}$  - koeficijent lokalnog gubitka na ulazu,  $n$  Manningov koeficijent hrapavosti materijala od čega je izrađen propust,  $L_{pr}$  duljina propusta,  $R$  hidraulički radijus propusta,  $v_{pr}$  brzina unutar propusta i  $g$  gravitacijska konstanta (jednaka  $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

#### **2.4.2 Transmisija energije valova kroz propust**

Pronos valne energije kroz propust u akvatorij predstavlja nepovoljni utjecaj korištenja propusta ugrađenog u lukobran ili drugu lučku građevinu. Valovi koji nailaze na propust svojom penetracijom kroz propust stvaraju nepoželjnu agitaciju unutar zaštićenog akvatorija. Agitacija valovima u akvatoriju, ukoliko je prevelika, može činiti štetu plovilima koji se nalaze na vezovima unutar marine ili luke, te drugim lučkim građevinama odnosno opremi ili narušiti djelovanje lučkog akvatorija. Valja propust oblikovati na način kako bi se transmisija valne energija umanjila do što veće moguće mjere, a istovremeno ne umanjivala cirkulacija koja omogućava bolju izmjenu mora u udaljenim dijelovima akvatorija (tzv. mrtvim zonama).

Laboratorijsko istraživanje je provedeno u valnom kanalu radi analize valnih parametara i parametara geometrije propusta na transmisiju energije valova kroz propuste (Slika 12) (Tsoukala i Moutzouris, 2009b). Navedeno ispitivanje se odnosi samo na slučaj kada os propusta visinski odgovara srednjoj razini mora što u pravilu ne odgovara realnosti jer uslijed oscilacija plime i oseke dolazi do promjene uronjenosti propusta.



Slika 12 Shematski prikaz laboratorijskog modela u svrhu ispitivanja utjecajnih čimbenika na penetraciju valne energije kroz propust koji je pozicioniran tako da os propusta odgovara srednjoj razini mora (prilagođeno od (Tsoukala i Moutzouris, 2009b))

Mjerenja transmisije valne energije provedena su kroz propuste pravokutnog poprečnog presjeka u valnom kanalu (mjerilo 1:60) i valnom bazenu (mjerilo 1:100), generiranjem monokromatskih valova i mjereći oscilaciju vodne površine pomoću visokofrekventnih sondi ispred i iza lukobrana (Tsoukala i Moutzouris, 2009b).

Razvijeni su empirijski izrazi u kojima se pomoću karakterističnih geometrijskih i valnih parametara poput širine, visine i dužine propusta, dubina vode u okolici propusta i dolaznih valnih parametara u obliku valne visine, dužine i incidentnog kuta nailaska vala, određuje koeficijent transmisije kroz propust:

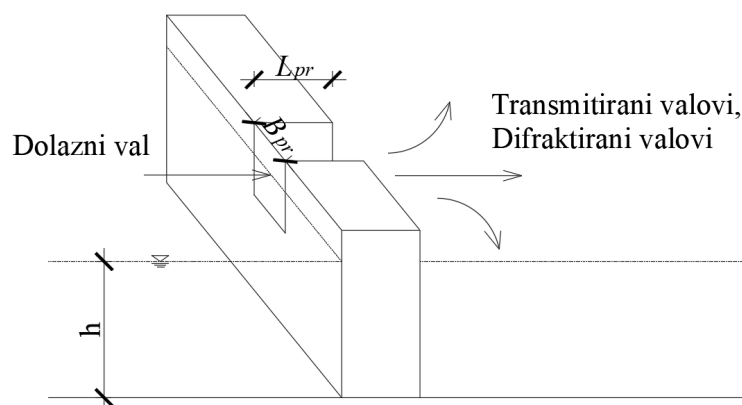
$$K_t = \left[ 0,1 \left( \frac{h_{pr}}{H_i} \right)^{0,76} + \left[ 2,64 \left( \frac{L_{pr}}{H_i} \right)^{0,032} - 3 \left( \frac{B_{pr}}{H_i} \right)^{-0,05} \right] \left( 1 - e^{-0,21\xi} \right) \right] \sin(\alpha_w^{2/3}) \quad (10)$$

gdje je  $K_t$  koeficijent transmisije,  $h_{pr}$  visinska razlika između dna propusta do srednje razine mora,  $H_i$  valna visina incidentnog vala,  $L_{pr}$  dužina propusta,  $B_{pr}$  širina propusta i  $\alpha_w$  kut nailaska incidentnog vala na propust (kut od  $90^\circ$  odgovara okomitom kutu nailaska na propust ugrađen u lukobran). Jednadžba (10) izvedena je u slučaju monokromatskih valova, propusta pravokutnog poprečnog presjeka, srednjih razina mora pri osi propusta i incidentnih valnih visina dovoljno malih da nemaju interakciju s gornjim rubom propusta. Uvjeti u prirodi gdje neće doći do interakcije između gornjeg ruba propusta i vala se može pojaviti samo ako su plimne oscilacije i valne visine iznimno male u odnosu na visinu ugrađenog propusta. Utvrđeno je da povećanjem dubine morske vode unutar propusta, širine propusta i dužine vala raste



vrijednost koeficijenta transmisije, dok dužina propusta i valna visina imaju obrnut utjecaj. Također je uočeno da je koeficijent transmisije veći za valove koji nailaze s manjim kutom u odnosu na uzdužnu os pravokutnog propusta. Autori su istaknuli potrebu za revizijom rezultata pomoću laboratorijskog modela većeg mjerila.

Istraživanje (Stagonas *i ostali*, 2009) je mjereći valnu transmisiju kroz propust u valnom kanalu (mjerilo 1:50) potvrdilo da veća valna visina rezultira manjom valnom transmisijom kroz propust, što je u skladu s već spomenutim istraživanjima (Tsoukala *i Moutzouris*, 2009b), dok rast valne dužine i širine propusta rezultira rastom koeficijenta transmisije. Autor predlaže tlocrtno asimetrične cijevne propuste (npr. u obliku lijevka) kao jedini oblik koji omogućava značajne količine protoka kroz cijevni propust pod utjecajem valova. U okviru navedenih analiza, valovi su također bili dovoljno mali da nemaju interakciju s gornjim rubom propusta, što posljedično rezultira učinkom jednakim poput uronjenog lukobrana konačne dužine.



Slika 13 Shematski prikaz difrakcije vala koji nema interakciju s gornjim rubom propusta (prilagođeno od (Belibassakis *i ostali*, 2014))

Koristeći 3D numerički model, provedena su ispitivanja koja analiziraju transformaciju vala koji prolazi kroz propust pravokutnog poprečnog presjeka ugrađenog u lukobran (Belibassakis *i ostali*, 2014). Autori su ustvari ispitivali slučaj u kojem je konstruiran potopljeni lukobran konačne dužine jer testirani valovi nisu imali priliku uspostaviti interakciju s gornjem rubom propusta zbog svoje relativno male valne visine s obzirom na visinu gornjeg ruba propusta (Slika 13). Fokus istraživanja su predstavljali oblici difrakcije koji se ostvaruju nakon što val prođe kroz propust u zaštićeni akvatorij. Autori su zaključili kako se oblici difrakcije valova kroz propust dobro slažu s prethodnim istraživanjima difrakcije za monokromatske

valove (Johnson, 1952). Detektirana je bitna uloga širine pravokutnih propusta u odnosu na druge geometrijske karakteristike propusta. Također veće dužine propusta umanjuju transmisiju valne energije uslijed utjecaja trenja dužih bočnih stranica. Manja strmost vala uzrokuje veće transmisije valne energije zbog manje prisutnog loma valova.

# 3

## PREDMET ISTRAŽIVANJA

Tijekom oblikovanja propusta valja uzeti u obzir oprečna djelovanja transmisije valne energije kroz propust, koja stvara nepoželjnu agitaciju unutar zaštićenog akvatorija i volumena vode koji proteče kroz propust uslijed dominantnog prirodnog generatora cirkulacije, koji pospješuje izmjenu mora, naročito unutar mrtvih zona. Optimalno oblikovan propust jamči najmanji ostvariv koeficijent transmisije valne energije i istovremeno najveći ostvariv volumen vode koji proteče kroz propust tokom referentnog vremenskog perioda. Kako bi se ostvario navedeni kompromis, potrebno je razumijevanje ovisnosti transmisije valne energije u akvatorij o parametrima valova i geometrijskim parametrima propusta. Nadalje je potrebno odrediti vrijednost protjecanja volumena vode kroz propust ugrađen u lukobran u ovisnosti o dominantnom generatoru protoka koji može varirati ovisno o lokaciji, odnosno o prisutnim oceanografskim i meteorološkim uvjetima. Do sada nije provedeno istraživanje koje je formiralo obrasce za definiranje vrijednosti protoka uslijed valova, već se poglavito

pretpostavljalo da rastom koeficijenta transmisije valova kroz propust raste protok kroz isti uzrokovan valovima.

Provedena istraživanja u svrhu određivanja transmisije valova kroz propust imaju sljedeća ograničenja:

- os propusta visinski postavljena tako da odgovara srednjoj razini mora,
- valna visina incidentnih valova je dovoljno mala da ne dolazi do interakcije između gornjeg ruba propusta i grebena valova,
- koristi se samo jedan samostalni propust umjesto grupe propusta kakvi se u pravilu konstruiraju u praksi.

U prethodnim istraživanjima također nije definirana ovisnost između doprinosa pojedinih generatora cirkulacije na volumen mora kroz propust u nekom referentnom vremenu s obzirom na postojeće oceanografske i meteorološke uvjete. Predloženo istraživanje planira definirati poveznice između oceanografskih i meteoroloških prilika koje se mogu naći na određenoj lokaciji i mogućih oblikovanja grupe propusta kako bi se mogla odrediti transmisija valne energije kroz propust tijekom valnih situacija i volumena koji proteče kroz propust tijekom referentnog vremenskog perioda, a uzrokovanog dominantnim generatorom cirkulacije. Koristeći se uspostavljenim funkcionalnim vezama između pojedinog oblikovanja grupe propusta i transmisije valne energije u akvatorij te volumena koji proteče kroz propust tijekom referentnog vremenskog perioda, planira se usporediti učinkovitost izmjene mora za pojedina oblikovanja grupe propusta. Nadalje se planira provjeriti postoji li domena oceanografskih i meteoroloških uvjeta u kojima je ostvaren najmanji mogući koeficijent transmisije valne energije i istovremeno najveći mogući volumen vode koji proteče kroz propust tijekom referentnog vremenskog perioda.

## **Ciljevi rada**

Na temelju pregleda stanja znanja na području od interesa definirani su ciljevi koji se planiraju ispuniti u ovoj disertaciji:

- 1) detektirati parametre valova koji dominantno utječu na transmisiju valne energije i volumen vode koji proteče kroz propust
- 2) odrediti optimalan visinski položaj propusta s obzirom na srednju razinu mora

- 3) definirati prihvatljiva geometrijska oblikovanja samostalnog propusta i grupe propusta s obzirom na funkcionalne zahtjeve
- 4) uspostaviti jednostavne matematičke obrasce za predviđanje valne transmisije i volumena vode koji proteče kroz propuste.

## **Hipoteza**

Oblikovanjem propusta moguće je uspostaviti kompromis između transmisije valne energije i volumena koji proteče kroz propust tokom referentnog vremenskog perioda.

## **Očekivani znanstveni doprinos**

Doprinos u okviru primjene propusta ugrađenog u lukobran s ciljem učinkovitije izmjene mora unutar akvatorija:

- 1) za pripadne valne parametre i geometrijske karakteristike propusta definirati koeficijente transmisije valne energije i volumen mora koji protječe kroz propust.
- 2) utvrditi matematičke obrasce za predviđanje koeficijenta transmisije valne energije i volumena koji protječe kroz propust pomoću podataka o valnim parametrima i geometrijskim karakteristikama propusta.
- 3) definirati povoljne geometrijske oblike i visinsku poziciju propusta s obzirom na razinu mora u svrhu optimiziranja oprečnih funkcionalnih zahtjeva propusta (transmisije valne energije i protočnosti).

# 4 METODOLOGIJA

Pregledom prikupljene literature unutar znanstvenog područja koje se bavi mehanizmima suzbijanja prirodnih i antropogenih onečišćenja, koja se mogu pojaviti unutar zaštićenih akvatorija marina i luka, dobio se uvid u primijenjene istraživačke metode i donesene zaključke koji rješavaju problem izmjene vode kroz propuste kao financijski povoljnog rješenja u lučkom inženjerstvu (prikazano u okviru poglavlja 2). Opažanja unutar laboratorijskih modela propusta (Tsoukala i Moutzouris, 2009a), istraživanja djelovanja propusta na terenu pod prirodnim uvjetima (Kim *i ostali*, 2011) i numeričko modeliranje hidrodinamike propusta (Tsoukala *i ostali*, 2014) su korištene metode u dosadašnjim istraživanjima, ali se uglavnom radi o pristupima koji se koncentriraju na pojedinu metodu samostalno s rijetkim iznimkama. Sinergijom triju metoda koje su u dosadašnjim istraživanjima upotrijebljene uglavnom odvojeno uz proširenje testiranih slučajeva parametara valova, geometrijskih oblika propusta te detaljnijeg numeričkog modela nego što je do sada korišten unutar predmetnog područja pokušat će se produbiti spoznaje unutar područja interesa.

Shodno ciljevima istraživanja, metodologija istraživanja će se razvijati u smjeru njihova ostvarenja:

1) detektirati parametre valova koji dominantno utječu na transmisiju valne energije i volumen vode koji proteče kroz propust

U svrhu ostvarivanja cilja, provoditi će se laboratorijska istraživanja na fizičkom modelu propusta ugrađenom u lukobran kako bi se prepoznali matematički obrasci koji opisuju kako koeficijent transmisije određen u točki i brzina vode na izlazu iz propusta ovise o incidentnim valnim parametrima i geometrijskim karakteristikama propusta (metodologija opisana u poglavlju 4.1, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.1). Koristeći se rezultatima i spoznajama dobivenim kroz laboratorijska ispitivanja, uspostaviti i validirati će se 3D numerički model koji će omogućiti uvid u transmisiju valne energije kao prostorne varijable unutar zaštićenog akvatorija i protoka koji se ostvaruje kroz grupu propusta uslijed valova (metodologija opisana u poglavljima 4.4.1 i 4.4.2, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.4). Konačno će se na osnovu rezultata dobivenih iz numeričkog modela valovanja detektirati koji parametri valova dominantno utječu na transmisiju valne energije i volumena vode kroz propust.

2) odrediti optimalan visinski položaj propusta s obzirom na srednju razinu mora

U okviru laboratorijskih ispitivanja će se ispitati utjecaj uronjenosti propusta na transmisiju valne energije i brzinu vode na izlazu iz propusta uslijed isti incidentnih valova. Ispitat će se potpuno uronjeni propust (srednja razina vode visinski odgovara gornjem rubu propusta) i djelomično uronjeni propust (srednja razina vode visinski odgovara osi propusta) (metodologija opisana u poglavlju 4.1, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.1). Koristeći se numeričkim modelom validiranim na osnovu laboratorijskih rezultata dobit će se uvid u utjecaj uronjenosti propusta pod jednakim incidentnim valovima na transmisiju valne energije u zaštićeni akvatorij i protok kroz propust (metodologija opisana u poglavljima 4.4.1 i 4.4.2, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.4). Izvođenjem terenskih mjerenja u ACI marini Opatija koja uključuju mjerenje protoka unutar propusta, odredit će se udio pojedinog generatora cirkulacije (plimnih oscilacija, valova, vjetera, slatkovodnih izvora) u ukupnom volumenu mora koji je protekao kroz propust u razdoblju mjerenja (metodologija opisana u poglavljima 4.2, a rezultati prezentirani u poglavljima 5.2.1 i 5.2.2). Za prepoznati dominantni generator

cirkulacije kroz propust, uspostaviti će se numerički model kako bi se moglo odrediti kako parametri dominantnog generatora utječu na volumen mora koji protječe kroz propust tijekom referentnog vremena (metodologija opisana u poglavlju 4.4.3, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.5). Konačno će se na osnovu omjera volumena mora koji protječe kroz propust i količine transmitirane energije valova za uronjeno i djelomično uronjeno stanje grupe propusta detektirati optimalno stanje za oceanografske uvjete na pojedinoj lokaciji (rezultati prezentirani u poglavlju 6).

3) definirati prihvatljiva geometrijska oblikovanja samostalnog propusta i grupe propusta s obzirom na funkcionalne zahtjeve

U laboratoriju će se ispitati utjecaj raznih geometrijskih karakteristika propusta pod utjecajem jednakih valnih parametara u svrhu dobivanja rezultata transmisije valne energije u točki unutar zaštićenog akvatorija i brzine vode na izlazu iz propusta (metodologija opisana u poglavlju 4.1, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.1). Koristeći se numeričkim modelom validiranim na osnovu laboratorijskih rezultata dobiti će se uvid u utjecaj različitih geometrijskih oblikovanja grupe propusta pod utjecajem valova na transmisiju valne energije u zaštićeni akvatorij i protok kroz propust (metodologija opisana u poglavljima 4.4.1 i 4.4.2, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.4). Izvođenjem terenskih mjerenja u ACI marini Opatija koja uključuju mjerenje protoka unutar propusta, odrediti će se udio pojedinog generatora cirkulacije (plimnih oscilacija, valova, vjetra, slatkovodnih izvora) u ukupnom volumenu mora koji je protekao kroz propust u razdoblju mjerenja (metodologija opisana u poglavlju 4.2, a rezultati prezentirani u poglavljima 5.2.1 i 5.2.2). Za prepoznati dominantni generator cirkulacije kroz propust, uspostaviti će se numerički model kako bi se mogao odrediti utjecaj geometrijskog oblikovanja grupe propusta na volumen mora koji protječe kroz propust tijekom referentnog vremena pod djelovanjem dominantnog generatora cirkulacije (metodologija opisana u poglavlju 4.4.3, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.5). Uvjet zadovoljenja oprečnih funkcionalnih djelovanja na grupu propusta, definirat će se obilaskom lokacije gdje je uočen pozitivan učinak propusta (metodologija opisana u poglavlju 4.3, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.3). Konačno će se na osnovu omjera volumena mora koji protječe kroz propust i količine transmitirane energije valova za različita oblikovanja grupe propusta detektirati prihvatljiva oblikovanja za oceanografske uvjete na pojedinoj lokaciji (rezultati prezentirani u poglavlju 6).



4) uspostaviti jednostavne matematičke obrasce za predviđanje valne transmisije i volumena vode koji proteče kroz propuste.

Ostvarenje cilja kreće od laboratorijskih ispitivanja unutar valnog kanala opažanjem samostalnog hidrodinamičkog djelovanja incidentnih valova na transmisiju valne energije kroz propust i brzine vode koje se ostvaruju na izlazu iz propusta (metodologija opisana u poglavlju 4.1, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.1). Nakon analize testova na laboratorijskom modelu, izmjerene vrijednosti koeficijenta valne transmisije u točki i brzine vode u točki na izlazu iz propusta služiti će za validaciju 3D numeričkog modela valovanja kroz propust (metodologija opisana u poglavljima 4.4.1 i 4.4.2, a rezultati prezentirani u poglavlju 5.4). Posredstvom validiranog numeričkog modela analizirat će se protok i transmisija valne energije kroz propust. Numerički model omogućit će detaljan uvid u prostornu i vremensku raspodjelu valnih visina i protoka kroz propust. Konačno će se prezentirati jednostavni matematički obrasci za predviđanje valne transmisije i protoka kroz razne grupe propusta pod utjecajem valova (rezultati prezentirani u poglavlju 5.4).

Provjera hipoteze će se ostvariti konačnim uvidom u prihvatljiva oblikovanja grupe propusta za proizvoljne oceanografske prilike na pojedinoj lokaciji koji su postignuti ciljem 3. Ako postoji geometrijsko rješenje za proizvoljne realne oceanografske uvjete koje zadovoljava kriterij za kompromis oprečnih funkcionalnih djelovanja transmisije valne energije u akvatorij i volumena mora kroz grupu propusta u referentnom vremenu, tada se smatra da je hipoteza potvrđena.

## **4.1 Laboratorijska ispitivanja**

Rezultati laboratorijskih ispitivanja propusta ugrađenog u tijelo lukobrana pod utjecajem valova su predstavljeni u okviru poglavlja 5.1.

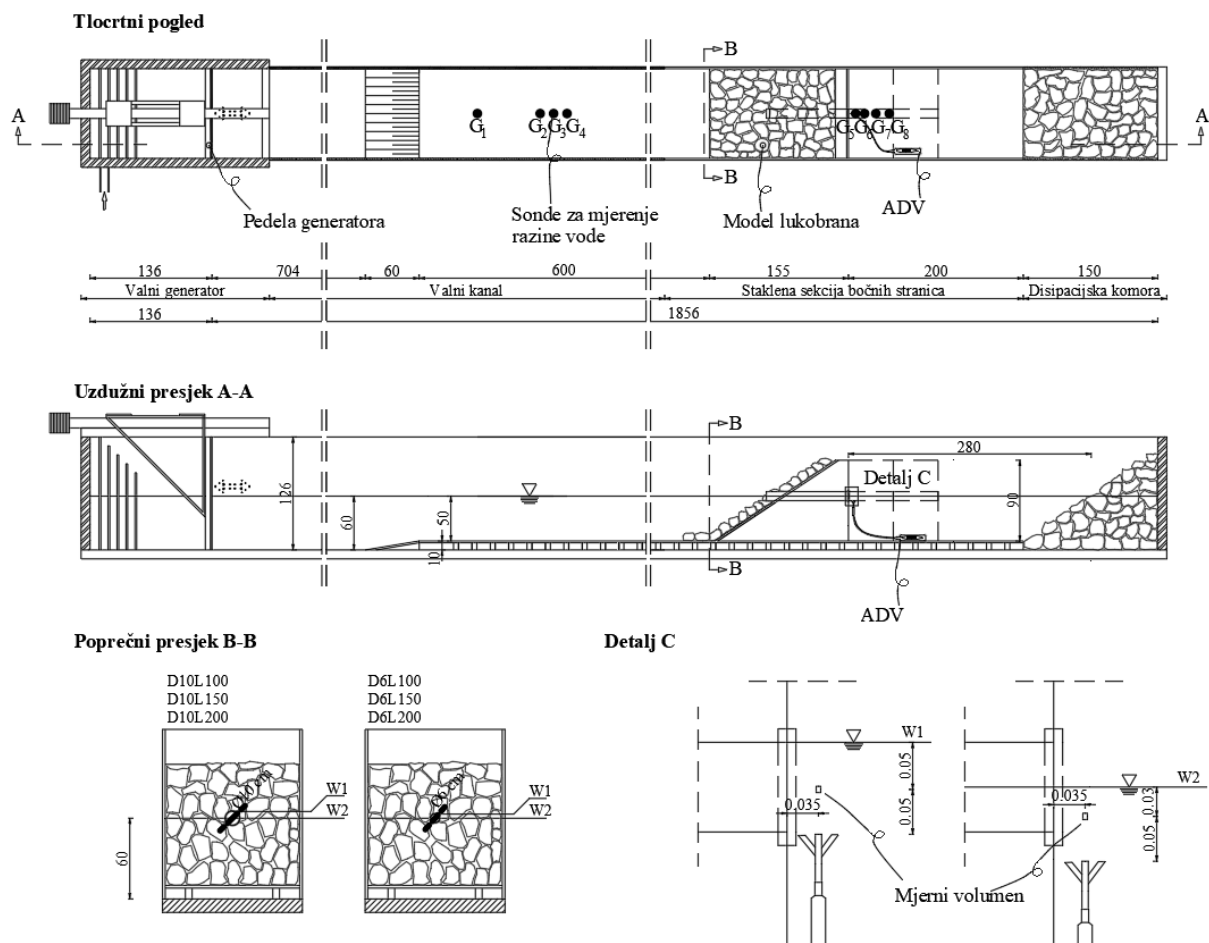
### **4.1.1 Opis valnog kanala i modela lukobrana**

Laboratorijska ispitivanja provedena su u valnom kanalu Hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta u Zagrebu s ciljem istraživanja transmisije valne energije kroz propust i brzina koje se ostvaruju na izlazu iz propusta uslijed incidentnih valova. Dužina valnog kanala iznosi 18,35 m, visina 1,10 m, a širina 1,00 m (Slika 14). Pod i bočni zidovi su obloženi vodonepropusnom izolacijom, a na kraju valnog kanala su s jedne strane ugrađeni stakleni paneli radi vizualnog praćenja hidrodinamike unutar i u okolici propusta. Testovi su se kroz stakleni zid snimali kamerom na stativu radi kasnijih analiza ispitivanja.



Slika 14 Valni kanal unutar Hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta

Na početak valnog kanala postavljen je valni generator koji generira incidentne valove koji nailaze na 13,6 m udaljen fizički model lukobrana (Slika 15 i Slika 16). Na udaljenosti 7,6 m od valnog generatora smanjuje se dubina u valnom kanalu uzdizanjem poda za 0,1 m (Slika 15). Uzdizanje poda je prisutno kako bi se fizički model mogao fiksirati za podlogu bez da naštetí vodonepropusnoj oblozi po obodu kanala. Povišena podloga sačinjena je od drvenog materijala koji omogućuje učvršćivanje modela lukobrana za dno bez oštećenja vodonepropusne membrane koja je ugrađena po obodu valnog kanala. Valovi koji propagiraju prema modelu lukobrana se nalaze u prijelaznom području, zbog čega se počinju pojavljivati Stoksove komponente drugog reda. Model lukobrana se nalazi 2,0 m ispred disipacijske komore, sačinjene od manjih kamenih blokova srednjeg promjera 0,3 m, kojoj je svrha što efikasnije smanjiti refleksiju valova od kraja valnog kanala (Slika 15 i Slika 16).



Slika 15 Nacrt valnog kanala i ugrađene opreme, te fizičkog modela lukobrana s ugrađenim propustom s ucrtanom mjernom pozicijom brzine vode na izlazu iz propusta i mjernim pozicijama razine vode ispred i iza modela lukobrana; Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta

Istaknut nepovoljan utjecaj laboratorijskog modela lukobrana s ugrađenim propustom prethodnih istraživanja je vrlo malo mjerilo modela, što implicira mogući utjecaj kapilarnih sila unutar propusta modelskog promjera u iznosu 2-3 cm (Stagonas *i ostali*, 2009). Fizički modeli drugih autora također posjeduju svojstvo malog mjerila modela u iznosu od 1:60 i 1:100, zbog čega druge sile (npr. kapilarine sile) mogu preuzeti dominantnu ulogu umjesto Froudovim brojem predviđene inercijalne i gravitacijske sile (Tsoukala i Moutzouris, 2009b). U skladu s opažanjima i preporukama prethodnih istraživača, fizički model se izradio prema Froudovoj sličnosti u mjerilu koje iznosi 1:10 kako bi se izbjegli potencijalni nepovoljni utjecaji malog mjerila na mjerenja (Slika 15 i Slika 17).

Uzevši u obzir širinu lukobrana, u prirodnom mjerilu u horizontalnom presjeku na mjestu propusta, koja je obično u rasponu između 5 m i 25 m, laboratorijska istraživanja su provedena za dužine propusta  $L_{pr} = 10$  m, 15 m i 20 m u prirodnom mjerilu, odnosno 1 m, 1,5 m i 2 m u modelskom mjerilu. Izabrana su dva promjera propusta koja u prirodnom mjerilu iznose 1 m i 0,6 m, odnosno 0,1 m i 0,06 m u modelskom mjerilu. Na pokos lukobrana, nagiba 1:1,5, je postavljen kameni nabačaj u jednom redu koji simulira školjeru, gdje prosječna veličina kamena iznosi 0,1 m (Slika 17). Mjerenja su izvršena u slučaju potpuno uronjenog propusta kad je razina vode pri višem rubu propusta (razina W1 - Slika 18), djelomičnog uronjenog propusta kad je razina vode pri osi cijevnog propusta (razina W2) i potpuno izronjenog propusta gdje je razina vode pri nižem rubu propusta (razina W3). Model lukobrana je dovoljno visok kako bi se izbjeglo prelijevanje preko krune lukobrana (*engl. overtopping*) u zaštićeni bazen tijekom svih testiranih slučajeva, što bi izazvalo efekte izvan okvira ovog istraživanja.



Slika 16 Valni generator tipa „piston“ na početku valnog kanala (lijevo) i disipacijska komora za smanjenje refleksije valne energije (desno)



Slika 17 Model lukobrana s ugrađenim propustom kružnog poprečnog presjeka



Slika 18 Incidentni val koji djeluje na fizički model lukobrana u slučaju kada je propust u potpunosti uronjen (W1)

#### 4.1.2 Parametri valova

Laboratorijski testovi su provedeni korištenjem generatora valova tipa „piston“ kojeg je izradio Danski hidraulički institut (DHI) s ugrađenim AWACS sustavom (Active Wave Absorption Control System). Pomoću navedenog sustava je moguće izbjeći nepovoljan utjecaj refleksije valova od ploče generatora te stoga ostvariti duže kontinuirano mjerenje valne klime ispred i iza modelskog lukobrana.

Za adekvatnu statističku obradu zapisa spektralnog vala koji je prikladniji za opis valne klime u prirodi od matematički jednostavnijih monokromatskih valova je primijenjena vremenska serija od 300 valova ili 5 min (Journee i Massie, 2001). U slučaju testova koji primjenjuju monokromatske valove je potrebna vremenska serija valova znatno kraća za adekvatan opis potpune slike hidrodinamike, te prema prijašnjim istraživanjima uobičajeno iznosi 20 s (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014). Izabrano je devet karakterističnih spektralnih valova koji se mogu naći u morima sličnim Jadranskom u smislu dužini privjetrišta te jačini i smjeru vjetra (Tablica 7). Nadalje su se izvela laboratorijska mjerenja generirajući četiri karakteristična monokromatska vala u svrhu buduće validacije računalno zahtjevnih numeričkih modela (Tablica 8).

Tablica 7 Parametri spektralnih valova pojedinog testa koji su primijenjeni tijekom laboratorijskih ispitivanja unutar valnog kanala

Spektralni valovi							
Broj testa	$H_{s-i}$ (m)	$T_p$ (s)	$H_{s-i}/L_p$ (1)	$L_p$ (m)	$L_{pr}$ (m)	$D_{pr}$ (m)	Razina vode
1	0,06	0,83	0,056	1,08	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
2	0,10	1,07	0,056	1,80	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
3	0,16	1,36	0,056	2,88	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
4	0,06	0,98	0,040	1,50	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
5	0,11	1,33	0,040	2,75	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
6	0,14	1,50	0,040	3,50	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
7	0,07	1,21	0,030	2,30	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
8	0,08	1,30	0,030	2,65	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3
9	0,12	1,59	0,030	3,95	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1;W2;W3

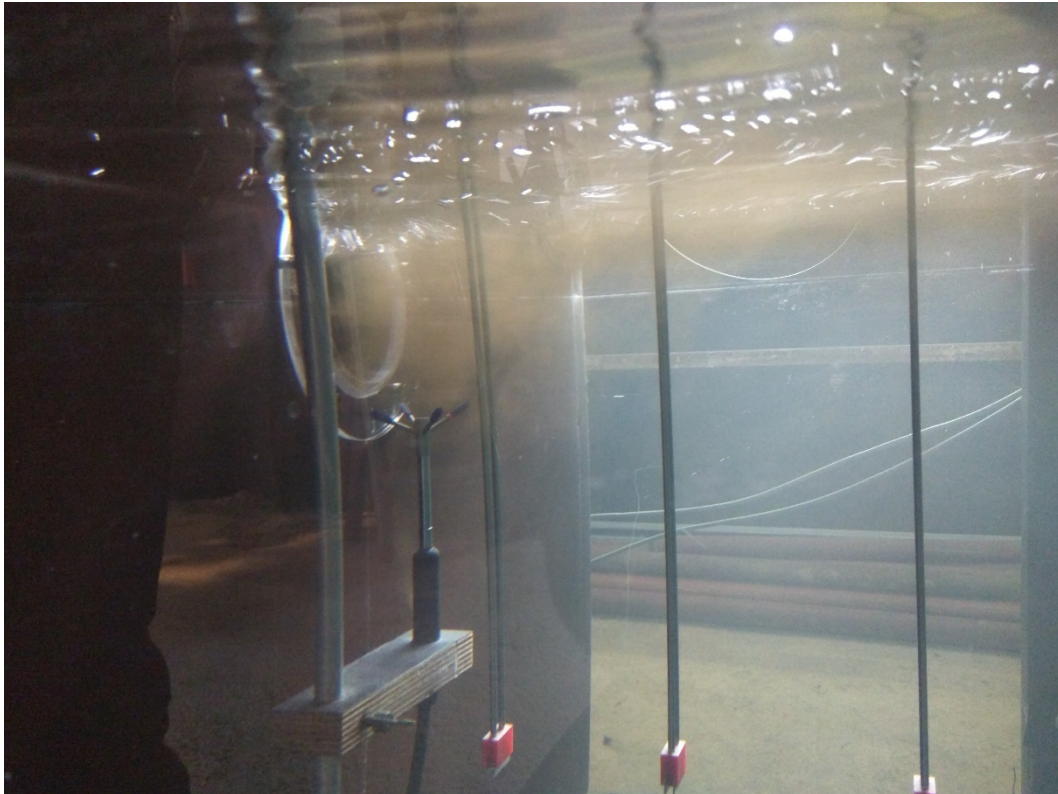
Tablica 8 Parametri monokromatskih valova pojedinog testa koji su primijenjeni tijekom laboratorijskih ispitivanja unutar valnog kanala koji će služiti za buduću validaciju numeričkog modela

Monokromatski valovi							
Broj testa	$H_i$ (m)	$T$ (s)	$H_i/L$ (1)	$L$ (m)	$L_{pr}$ (m)	$D_{pr}$ (m)	Razina vode
1	0,09	1,07	0,05	1,8	1,0	0,1	W1;W2
2	0,09	1,32	0,03	2,7	1,0	0,1	W1;W2
3	0,12	0,88	0,10	1,2	1,0	0,1	W1;W2
4	0,12	1,24	0,05	2,4	1,0	0,1	W1;W2

Refleksija difraktiranih valova koji transmitiraju kroz propust od bočnih zidova valnog kanala može uzrokovati na poziciji sonde (G5 – G8 na Slika 15) nerealno uvećane vrijednosti zabilježenih valnih visina. Događa se superpozicija vala koji je u određenom trenutku transmitirao u zaštićeno područje kroz propust ugrađen u model lukobrana i reflektiranog vala od bočnih zidova prethodno transmitiranog vala. Stoga će se u procesu numeričkog modeliranja najprije validirati model valovanja koji posjeduje istovjetne uvjete kao fizički model (s bočnim zidovima), te će se daljnja ispitivanja vršiti na numeričkom modelu koji na vanjskim granicama upija valnu energiju koja se transmitirala kroz propust. Navedenim postupkom može se ukloniti nepovoljno ograničenje fizičkog modela i promatrati situacija koja je bliža realnim uvjetima.

#### 4.1.3 Mjerna oprema u laboratoriju

Transmisija valne energije mjerena je korištenjem četiri kapacitivne sonde pozicionirane ispred modela lukobrana s ciljem mjerenja valnih parametara dolaznih valova (G1 – G4) i četiri kapacitivne sonde postavljene iza lukobrana u svrhu mjerenja valnih parametara transmitiranih valova kroz propust (G5 – G8) (Slika 19). Frekvencijom uzorkovanja kapacitivnih sondi u iznosu od 40 Hz se osigurava izbjegavanje poduzorkovanja (*engl. Aliasing*). Podaci valnih visina mjereni pomoću kapacitivnih sondi su u potpunosti vjerodostojni (osim već spomenutog efekta modela gdje se valovi reflektiraju od bočnih zidova), stoga su se koristile izvorne vremenske serije u daljnjoj obradi u okviru numeričkog modeliranja. Za analizu transmisije spektralnih valova provela se separacija incidentnog i reflektiranog vala kako bi se tako određene valne visine mogle koristiti u daljnjim analizama i definiranju obrazaca.



Slika 19 ADV uređaja za mjerenje brzine u točki i kapacitivne sonde G5, G6 i G7 za mjerenje valnih parametara na stražnjoj strani modela lukorana s ugrađenim potpuno uronjenim (razina W1) propustom kružnog poprečnog presjeka promjera koji iznosi 10 cm

Rezultati po pojedinim sondama za transmisiju spektralnih valova su prezentirani u okviru poglavlja 5.1.1, a za transmisiju monokromatskih valova u okviru poglavlja 5.1.3.

Tokom pojedinog testa, valovi udaraju okomito na konstrukciju lukobrana te se posljedično kroz propust ostvaruje maseni protok vode i penetracija valne energije što uzrokuje valovanje u lučkom bazenu. Brzina u točki na izlazu iz propusta bilježena je korištenjem ADV (*engl. Acoustic Doppler Velocimeter*) uređaja (Slika 19). Frekvencija uzorkovanja ADV uređaja iznosi 25 Hz što je bitno veće od frekvencije pojave koja se opaža i time neće doći do poduzorkovanja (*engl. Aliasing*) tijekom ispitivanja.

Dobivene vremenske serije brzina mjerene pomoću ADV uređaja bile su podvrgnute filtriranju, radi razdvajanja nepouzdanih podataka. U svrhu filtriranja podataka korištena je Phase-Space metoda koja detektira nepouzdanosti (tzv. „šiljci“) pomoću trodimenzionalne elipse u koordinatnom sustavu čije su osi definirane samom brzinom, prvom derivacijom brzine u vremenu i drugom derivacijom brzine u vremenu (Goring i Nikora, 2002).



Ukoliko je nepouzdana vrijednost detektirana unutar vremenske serije brzine, vrijednost se zamjenjuje novom koja je definirana polinomom 4. stupnja kroz 24 susjedne točke, te se navedeni postupak izvršava u više iteracija. Rezultati mjerenja u obliku srednjih brzina unutar mjernog volumena (Slika 15) pod utjecajem spektralnih valova prezentirani su u okviru poglavlja 5.1.2, a pod utjecajem monokromatskih valova u okviru poglavlja 5.1.4.

## 4.2 Terenska mjerenja

Rezultati mjerenja provedena na terenu (ACI marini Opatija) su predstavljani u okviru poglavlja 5.2.

### 4.2.1 Lokacija mjerenja

Mjerenjem u prirodi omogućava se realan uvid u procese koje nije moguće ili je financijski neisplativo uspostaviti i mjeriti unutar kontroliranih uvjeta laboratorija, poput utjecaja vjetrova, kombiniranog djelovanja vjetrova i valova ili nekog drugog generatora koji uzrokuje izmjenu mora unutar akvatorija.

S ciljem opažanja utjecaja različitih generatora cirkulacije na izmjenu mora, terenska mjerenja su provedena u ACI marini Opatija u Ičićima, Republika Hrvatska (Slika 20). Lokacija marine je udaljena oko 11 km zračne udaljenosti zapadno od grada Rijeke. Sjeverno od lokacije marine izdiže se planina Učka. Navedena marina je odabrana za provedbu terenskih mjerenja jer se nalazi na lokaciji izloženoj čestim vjetrovima, te ima ugrađenu grupu propusta kružnog poprečnog presjeka.

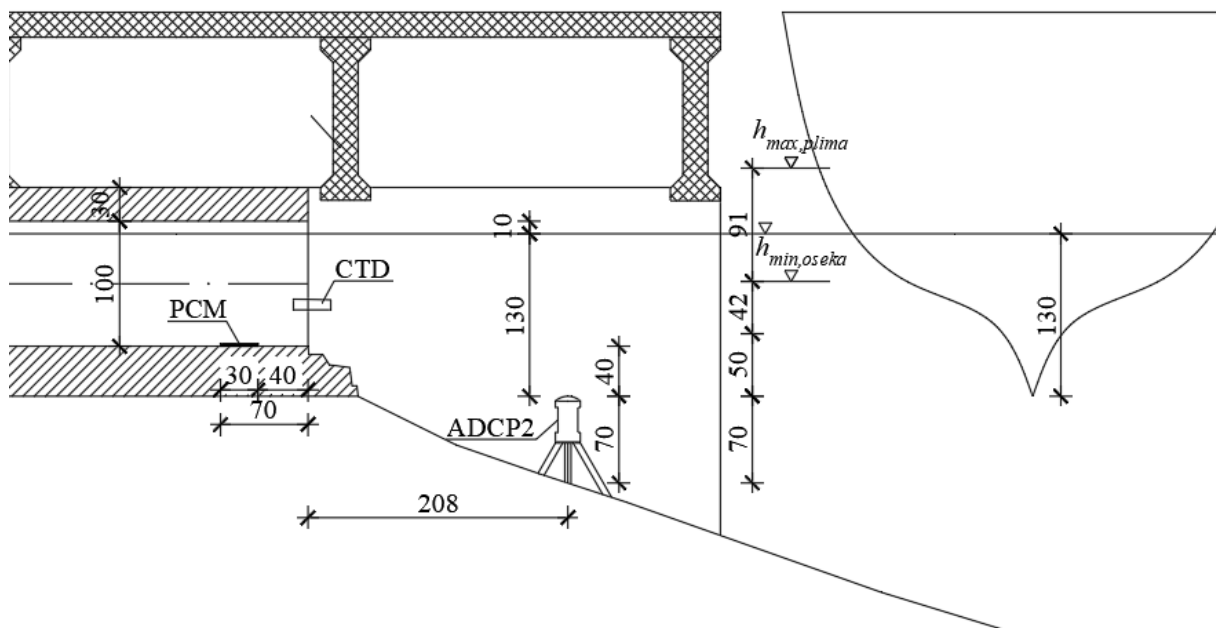


Slika 20 Lokacija ACI marine Opatije u okviru jugoistočne Europe

Primarni lukobran u ACI marini Opatija u sebi ima ugrađen sustav od 8 paralelnih cijevnih propusta promjera od 1 m, visinski postavljenih da srednja razina visinski odgovara gornjem rubu cijevnog propusta (Slika 21, Slika 22, Slika 23 i Slika 24). Svi propusti grupe postavljeni su u jednom redu, te razmak između dviju cijevi iznosi 0,5 m. Propusti su projektirani i ugrađeni u lukobran s ciljem poboljšanja cirkulacije mora u marini.



Slika 21 Propusti kružnog poprečnog presjeka ugrađeni u lukobran u ACI marini Opatija (autor fotografije: Dalibor Carević)



Slika 22 Uzdužni presjek kroz propust u ACI marini Opatija (Slika 21) s prikazanim mjernim uređajima ADCP 2, CTD i PCM (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2)



Slika 23 Tlocrtni prikaz ACI marine Opatija s pripadnim pozicijama instrumenata za mjerenje za zimsko razdoblje mjerenja (15.2.2017 – 31.3.2017) (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2)



Slika 24 Tlocrtni prikaz ACI marine Opatija s pripadnim pozicijama instrumenata za mjerenje za ljetno razdoblje mjerenja (4.7.2017 – 31.8.2017) (instrumenti opisani u okviru poglavlja 4.2.2)

Propusti su ugrađeni u lukobran na poziciji gdje se mijenja smjer primarnog lukobrana iz smjera pružanja NW-SE u NE-SW i smjer pružanja propusta nije jednak smjeru ulaza (kut koji zatvaraju smjer pružanja propusta i smjer ulaza ugrubo iznosi  $90^\circ$ ) (Slika 23 i Slika 24). Zaštićeno područje (površine oko 40 000 m<sup>2</sup>) proteže se približno 350 m duž obale i 150 m okomito na obalu, dok srednja dubina unutar akvatorija iznosi 5 m. Marina je povezana s Jadranskim morem s jednim ulazom širine 30 m koji se nalazi u sjeveroistočnom dijelu akvatorija i s već spomenutom grupom od 8 cijevnih propusta.

Prvo mjerenje izvršeno je tijekom zimskog razdoblja (15. 2. 2017. - 31. 3. 2017.) (Slika 23), a drugo tijekom ljetnog razdoblja (4. 7. 2017. - 31. 8. 2017.) (Slika 24). Izabrana su dva različita godišnja doba zbog prisutnosti bitno različitih vremenskih uvjeta na lokaciji tijekom pojedinog mjernog razdoblja, npr. u pogledu trajanja i smjera vjetra (koji posljedično uzrokuje i valove) i količine padalina koje su uočene na hidrometeorološkoj postaji u Rijeci (DHMZ MS Rijeka) koja je u neposrednoj blizini promatrane lokacije, očekivanih promjena u vertikalnoj raspodjeli temperature i saliniteta u stupcu mora, itd.

#### **4.2.2 Instrumenti korišteni u sklopu terenskih mjerenja**

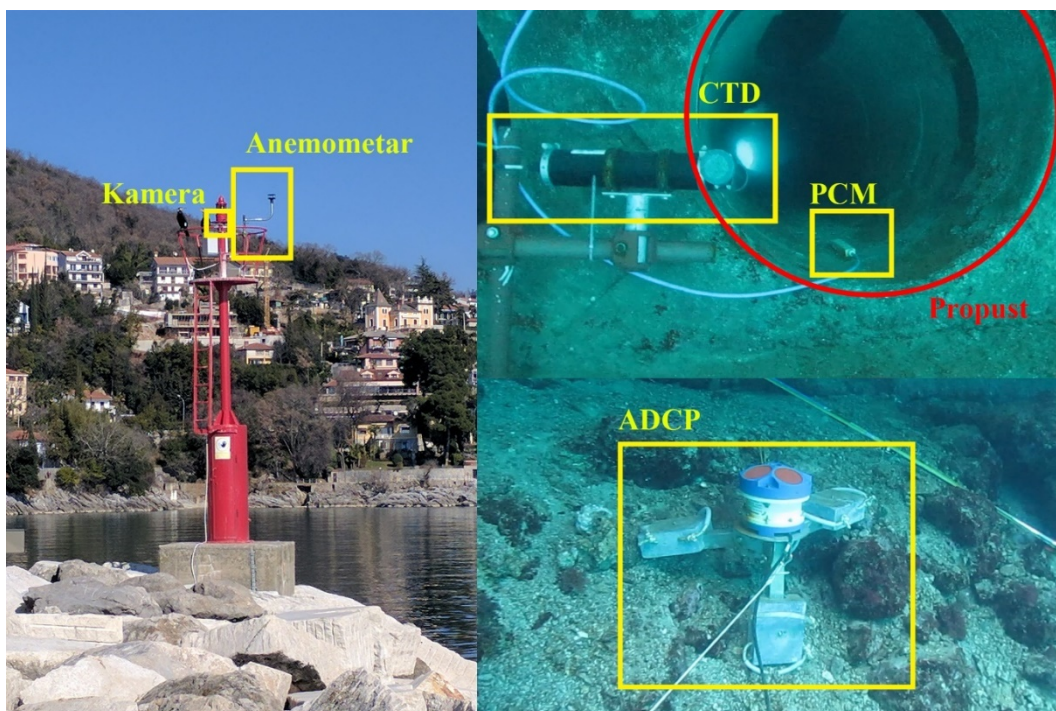
Postavljanjem pet strujomjera (ADCP za *engl. Acoustic Doppler Current Profiler*) u okolici cijevnih propusta u ACI marini Opatija bilježiti će se vertikalni profil strujanja mora i valovi na površini mora (Slika 23 i Slika 24). Dva od pet raspoređenih strujomjera postavljena su s obje strane cijevnih propusta (ADCP1 i ADCP2 na Slika 23 i Slika 24), jedan je postavljen u središtu marine (ADCP5) i jedan na ulazu u marinu (ADCP4). Posljednji strujomjer (ADCP3) je tijekom zimskog razdoblja bio postavljen u otvoreno more 100 metara zapadno od primarnog lukobrana (Slika 23), a tijekom ljetnog razdoblja je premješten također na ulaz u marinu (Slika 24). Premještanje se opravdava namjerom detaljnijeg mjerenja volumena mora koji prolazi kroz ulaz, nakon nezadovoljavajućih rezultata koje je obavio jedan strujomjer samostalno tijekom zimskog mjernog razdoblja. Strujomjeri u neposrednoj okolici grupe cijevnih propusta (ADCP1 i ADCP2) mjerili su valne parametre (visina vala, valni period i smjer vala) uz morske struje, dok su ostali strujomjeri bilježili samo morske struje. Svi strujomjeri su pričvršćeni za metalno postolje koje je dodatno otežano olovnim utezima kako ne bi došlo do translacije ili rotacije mjernog instrumenta. Senzor obavlja mjerenje vertikalnog profila brzina primjenjujući princip Dopplerovog efekta. Instrument promatra pomak u frekvenciji odbijenih zvučnih valova od

čestica u moru s obzirom na frekvenciju odašiljanih valova od senzora uređaja. Odnos pomaka u frekvenciji odbijenog vala i frekvencije odašiljanog vala se može prikazati:

$$\Delta f_a = 2f_a \frac{v_c}{c_a} \quad (11)$$

gdje je  $\Delta f_a$  pomak u frekvenciji odbijenog vala,  $f_a$  frekvencija vala koji instrument šalje,  $v_c$  brzina medija (ovdje more) i  $c_a$  brzina zvuka unutar medija.

Prijenosni sustav za mjerenje protoka (PCM) smješten je unutar jedne od osam cijevnih propusta u marini, na kraju propusta, bližem zaštićenom akvatoriju (Slika 25). Instrument bilježi vertikalni profil brzine unutar propusta i oscilacije razine mora, te posljedično može definirati protok koji se ostvaruje kroz cijevni propust u određenom trenutku. PCM omogućuje podatke o protoku koji se mogu povezati s učincima različitih prirodnih generatora cirkulacije mora (npr. vjetra, valova i plimnih oscilacija). Razinu površine mora instrument bilježi pomoću senzora tlaka unutar uređaja, a profil brzine mjeri pomoću Dopplerovog efekta. Senzor je fiksiran na kraj cijevi pomoću metalnog obruča koji je učvršćen za unutarnju stjenku cijevnog propusta.



Slika 25 Mjerni instrumenti (ADCP, PCM, CTD, anemometar i kamera) postavljeni na odgovarajuće pozicije u ACI marini Opatija (autor fotografije: Krunoslav Zubčić)

Anemometar je postavljen na svjetionik na glavi lukobrana, tako da ne bude zaklonjen infrastrukturom marine (Slika 25). Senzor je učvršćen pomoću zavinute metalne cijevi za svjetionik čime se omogućuje dodatno nadvišenje senzora nad samim svjetionikom. Anemometar mjeri brzinu vjetra i smjerove ultrasoničnim senzorom u horizontalnoj ravnini velikom učestalosti, uz pomoć koje se mogu dobiti i informacije o udaru vjetra. Mjerni instrument spojen je direktno u električnu mrežu marine jer kapacitet raspoložive baterije nije zadovoljavao potrebu za električnom energijom, već je baterija služila tek kao pričuva u slučaju kratkog nestanka struje u električnoj mreži. Broj plovila i njihov raspored tijekom mjerenja vizualno je zabilježen kamerom (*engl. time lapse camera*) koja je smještena pored senzora anemometra na vrhu svjetionika (Slika 25).

Mjerenja fizikalnih veličina poput temperature i saliniteta provedena su pomoću CTD uređaja (CTD za *engl. Conductivity, Temperature and Depth of seawater*) (Slika 25). Posredno provodljivošću električne energije mora uređaj proračuna salinitet morske vode, a dubinu pomoću tlaka na poziciji kojoj se senzor nalazi. Instrument za mjerenje je pozicioniran na kraju cijevnog propusta bliže zaštićenom akvatoriju pored instrumenta za mjerenje protoka (Slika 25). Senzor je fiksiran pomoću niza metalnih cijevi na postolju kako bi visinski odgovarao osi cijevi.

Frekvencija uzorkovanja i učestalosti zapisivanja mjernih instrumenata varirale su ovisno o potrošnji baterije i kapacitetu baterija ili raspoloživosti električne energije za pojedine instrumente (Tablica 9). Zabilježeni sirovi podaci svih instrumenata podvrgnuti su satnom osrednjavanju kako bi se omogućila jednostavnija analiza i usporedba između rezultata instrumenata. Navedeno osrednjenjavanje podataka smatra se razumnim jer se kod vremena izmjene mora u većini luka i marina radi o više dana, a procesi generacije cirkulacije poput plimnih oscilacija i vjetra traju uglavnom u poludnevnim okvirima ili duže. Frekvencija uzorkovanja svih uređaja zadovoljavajuće je velika zbog čega tijekom opažanja pojave neće doći do poduzorkovanja (*engl. Aliasing*).

Tablica 9 Učestalost uzorkovanja i zapisivanja mjerenih vrijednosti po pojedinim instrumentima raspoređenih u ACI marini Opatija.

Mjerni instrument	Učestalost uzorkovanja	Učestalost zapisivanja
ADCP 1,2	1 Hz	valovi - 15 min, struje - 10 min
ADCP 3,4,5	1 Hz	struje - 10 min
CTD	1 Hz	1 Hz
Anemometar	1 HZ	1 Hz
PCM	varira u ovisnosti o hidrauličkim i fizičkim uvjetima u trenutku uzorkovanja (15 – 45 s)	2 min

Prije buduće analize su se sve mjerene vremenske serije neovisno o učestalosti uzorkovanja pojedinog uređaja satno osrednjile kako bi se olakšalo rukovanje i usporedba u budućim analizama. Navedeno se smatra opravdanim s obzirom da periodi prirodnih pojava poput plimnih oscilacija iznose nekoliko sati.

Kako bi se proučila varijacija nagiba površine mora tijekom mjernih razdoblja, vremenski niz nagiba podvrgnut je visokopropusnom filtru (engl. *high-pass filter*) kako bi se isključile varijacije niskih frekvencija zbog atmosferskih i oceanografskih učinaka iz ukupne promjene nagiba. Proces kreće od konstrukcije niskopropusnog filtera (engl. *low-pass filter*) korištenjem Butterworth IRR filtera za obradu signala (Roberts i Roberts, 1978). Brzina uzorkovanja signala bila je 1 Hz, period propusnog opsega za dizajn filtera bio je definirana na 1/120 Hz, a period zaustavljanja na 1/96 Hz. Dizajn filtra izdvaja iz vremenske serije nagiba površine mora pojave u signalu čiji su periodi bili kraći od 4 dana, što bi u konačnici uklonilo učinke plimnih oscilacija, vjetrova, valova i ostalih pojave relativno kratkog perioda. Zatim se signal filtriran kroz niskopropusni filter, oduzima od početnog signala vremenske serije nagiba površine mora. Kao rezultat se dobije signal visoke vremenske frekvencije koji uključuje samo učinke koji imaju periode kraće od 4 dana, poput oscilacija plima i sl.



### 4.3 Anketiranje i terenski obilazak marina unutar Hrvatske

Hrvatskom obalom se rasprostiru mnogobrojne lučice i marine koje u svojim lučkim građevinama za zaštitu od nepovoljnog utjecaja valova imaju ugrađene propuste u svrhu efikasnije izmjene mora. Pregledom nekolicine primjera i anketiranjem osoblja u pripadajućim marinama i lučicama planiraju se definirati neka kvalitativna opažanja o funkcioniranju propusta u svrhu efikasnije izmjene vode. Opažanja ankete i terenskog obilaska marina unutar Hrvatske su prezentirana u okviru poglavlja 5.3.

U okviru ovog istraživanja obišla su se konstruktivna rješenja propusta na lokacijama lučice Vitrenjak (Zadar), ACI marine Split, ACI marine Vodice, marine Kornati u Biogradu, marina Zadar (Tankerkomerc), marina Lav (Podstrana) i gradska lučica Zenta u Splitu (Slika 26).



Slika 26 Prikaz lokacija marina i lučica za koje je proveden terenski obilazak

## **4.4 Numeričko modeliranje**

### **4.4.1 Vladajuće jednadžbe numeričkog modela**

Računalne simulacije definirane su sustavom jednadžbi uspostavljenih prema fizičkim zakonima, modelima i razmatranjima koje opisuju realnu tekućinu. Sustavom jednadžbi opisuju se numerički postupak ponašanja tekućine unutar definiranih granica modela, a na rubovima računalne domene definira se Neumannov, Dirichletov ili Robinov rubni uvjet. Sustav diferencijalnih jednadžbi izvedenih iz zakona očuvanja mase i količine gibanja zovu se Navier-Stokesove jednadžbe, a dodatni modeli koji opisuju površinu vode upotpunjuju set jednadžbi koji se tijekom numeričke simulacije trebaju riješiti.

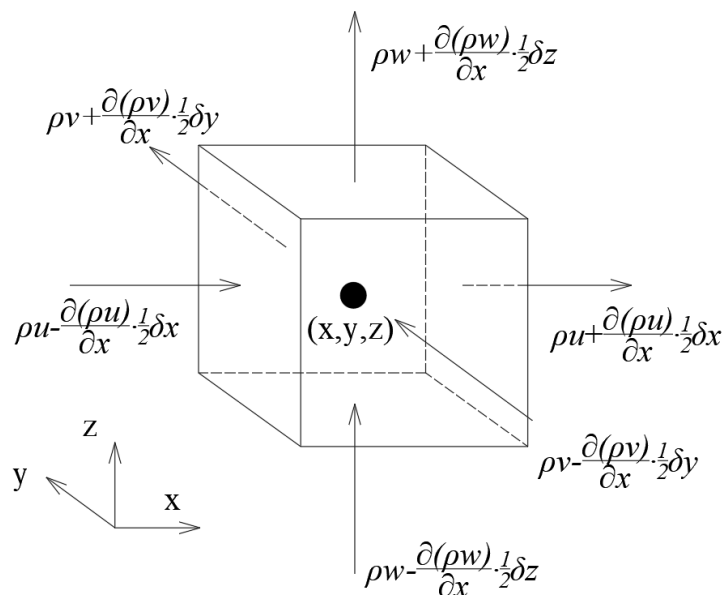
Princip očuvanja polja može se primijeniti na materijalni volumen (MV) gdje se promatra određena fizička veličina u pokretnoj točki fluida ili na kontrolni volumen (KV) gdje su prethodno definirani okviri nepokretnog volumena unutar kontinuuma fluida u središtu pažnje. Zakoni očuvanja govore da promjena polja mase ili količine gibanja unutar kontrolnog volumena kroz vrijeme konstantno je jednaka sumi svih vanjskih čimbenika na kontrolni volumen, odnosno razlika promjene polja unutar kontrolnog volumena i sume vanjskih čimbenika odgovara nuli. Kontrolni volumen se nalazi unutar trodimenzionalnog prostora, ovdje unutar Kartezijevog (x,y,z) sustava.

#### **4.4.1.1 Očuvanje mase**

Opažanjem pokretnog materijalnog volumena unutar fluida i pretpostavljajući da se masa ne može pretvoriti u energiju i obrnuto, ne postoje niti izvori niti ponori koji bi promijenili njegovu masu kroz vrijeme, stoga je njegova derivacija kroz vrijeme jednaka nuli:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{MV} = 0 \quad (12)$$

gdje je  $m$  masa materijalnog volumena i  $t$  vrijeme. Ako promatramo neki kontrolni volumen konstantnog okvira unutar kontinuuma tekućine tada promjena mase (odnosno promjena gustoće unutar konstantnog volumena) tekućine unutar volumena je jednaka sumi



Slika 27 Kontrolni volumen tekućine s prikazanim vektorima masenog protoka u/iz kontrolnog volumena

količine tekućine koje protječu kroz stranice kontrolnog volumena. Masa može ulaziti ili izlaziti kroz stranice iz samog volumena (Slika 27). Stoga se promjena mase kontrolnog volumena može napisati u obliku umnoška gustoće unutar kontrolnog volumena i obujma promatranog kontrolnog geometrijskog oblika:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t}(\delta x \delta y \delta z) \quad (13)$$

gdje je  $\rho$  gustoća tekućine unutar kontrolnog volumena, a  $\delta x$ ,  $\delta y$  i  $\delta z$  dužine bridova kontrolnog volumena. Nadalje treba uzeti u obzir količine mase koje protječu kroz 6 ploha kontrolnog volumena, koje su definirane umnoškom gustoće tekućine, površine stranica i komponente brzine normalne na ravninu stranica kontrolnog volumena (Slika 27):

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (14)$$

gdje su  $u$ ,  $v$  i  $w$  skalarne komponente vektora brzine u smjerovima osi Kartezijevog koordinatnog sustava  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Komponente koje definiraju ulaz mase u kontrolni volumen su označene s pozitivnim predznakom, a izlaz negativnim predznakom.

Promjena mase unutar kontrolnog volumena konstantnog volumena definirana jednačbom (13) izjednači se s komponentama protjecanja mase kroz plohe prikazane jednačbom (14). Svi članovi prebačeni su na lijevu stranu jednakosti, te je jednačba podijeljena obujmom kontrolnog volumena ( $\delta x \delta y \delta z$ ):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

Navedeno se može preformulirati u kraći vektorski oblik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (16)$$

gdje je  $\vec{v}$  vektor brzine. Formulacija prikazana u jednačbi (16) odgovara lokalnom i konvektivnom članu opće jednačbe pronosa polja fizičkog svojstva  $\phi$  (člana za difuziju fizičkog svojstva nema jer na masi se difuzija ne može ostvariti i nema člana koji označava izvore/ponore mase koji bi bio prisutan da se radi s pretpostavkom pretvorbe mase u energiju i obrnuto):

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{v}) \quad (17)$$

gdje  $\phi$  označava neko specifično fizičko svojstvo. Fizičko svojstvo prikazano oznakom  $\phi$  može određivati salinitet, koncentracija bojila ili drugu karakteristiku koja je u ovisnosti o količini tvari zbog čega se u formulaciji množi s gustoćom. Opisivanjem zakona očuvanja mase vrijednost koju svojstvo  $\phi$  poprima iznosi 1, što je prikazano u jednačbom (16). Primjenom Hamiltonovog operatora na veličine u zagradi drugog člana u jednačbi (16) slijedi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (18)$$

gdje prva dva člana s lijeve strane jednakosti daju totalni diferencijal fizičke varijable gustoće unutar kontrolnog volumena:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{d\rho}{dt} \quad (19)$$

Stoga se ubacivanjem jednadžbe (19) u jednadžbu (18) te dijeljenjem jednadžbe rezultira:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (21)$$

Ako promatramo slučaj nestišljive tekućine, gustoća uvijek ostaje konstantne vrijednosti u prostoru i vremenskom smislu, stoga prvi član u jednadžbi (21) iznosi 0 i zakon očuvanja mase se pojednostavljuje:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (22)$$

Jednadžba (22) se može prenijeti u integralni oblik koristeći Gaussov teorem gdje se može član s operatorom divergencije koji djeluje na određeni volumen pretvoriti u plošni integral:

$$\oint_S \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (23)$$

gdje  $S$  označava površinu plohe volumena kroz koji protječe masa, a  $\vec{n}$  jedinični normalni vektor pojedine plohe volumena. Promatrajući jednadžbu (23) može se zaključiti da prema zakonu očuvanja mase u svakom elementarnom volumenu tekućine suma masenih protoka koje protječu kroz njegove plohe iznosi 0. Integralni oblik jednadžbi nas dovodi do metode konačnih volumena (FVM za *engl. Finite volume method*) koja je stekla svoju popularnost zbog mogućnosti primjene na proizvoljan oblik konačnih volumena (tetraedar, heksaedar, oktaedar, itd.).

#### 4.4.1.2 Očuvanje količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja unutar materijalnog volumena prikazuje kako je ukupna promjena količine gibanja u vremenu jednaka sumi svih vanjskih sila koje djeluju na materijalni volumen:

$$\left( \frac{d(m\vec{v})}{dt} \right)_{MV} = \left( \int_V f dV \right)_{MV} \quad (24)$$

Koristeći prethodno prepoznatu jednadžbu pronosa polja fizičkog svojstva (jednadžba (17)) s lokalnim i konvektivnim članom može se opisati akumulacija fizičkog svojstva kroz vrijeme unutar kontrolnog volumena te brzina ulaska i izlaska fizičkog svojstva iz kontrolnog volumena. Jednadžba (17) se najprije raspiše kako bi se mogao uočiti njezin odnos s totalnim diferencijalom proizvoljnog fizičkog svojstva:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{v}) &= \rho \left[ \frac{\partial\phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla\phi \right] + \phi \left[ \frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) \right] \\ &= \rho \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (25)$$

Suma u zagradi drugog člana s desne strane jednakosti iznosi 0 što je već ustanovljeno u jednadžbi (16) kroz izvod jednadžbe za očuvanje mase, stoga navedeni član iščezava. Prvi član s desne strane jednakosti u zagradi sadrži totalni diferencijal fizičkog svojstva  $\phi$  kao što je prikazano u primjeru za totalni diferencijal gustoće iz jednadžbe (19). Konačno se desna strana jednakosti može prikazati u obliku umnoška gustoće i totalnog diferencijala nekog fizičkog svojstva što je prikazano u drugom redu jednadžbe (25).

Ulogu fizičkog svojstva  $\phi$  u slučaju očuvanja količine gibanja preuzima vektor brzine tekućine unutar kontrolnog volumena (kako bi se prihvatio inicijalni uvjet iz jednadžbe (24), gdje je predstavljena promjena umnoška mase i vektora brzine u vremenu s lijeve strane jednakosti). S ciljem pojednostavljenja prikazivanja postupka, vektor brzine rastavljen je u komponente sukladno smjerovima koordinatnih osi:

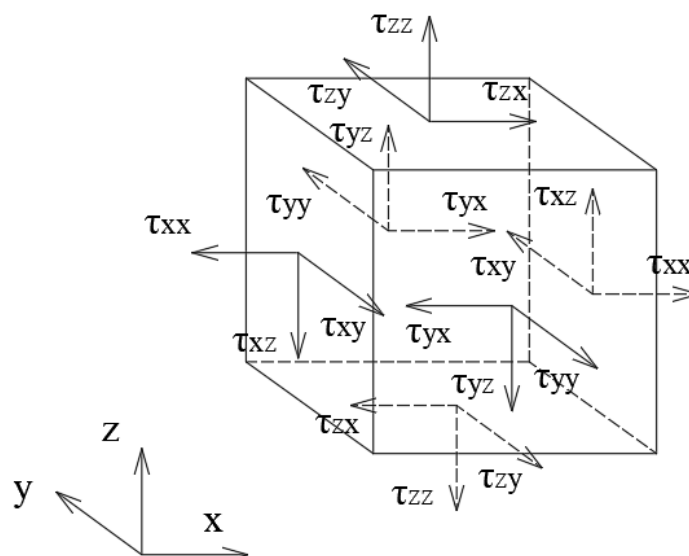
$$\rho \frac{du}{dt}, \rho \frac{dv}{dt}, \rho \frac{dw}{dt} \quad (26)$$

gdje su  $u, v$  i  $w$  komponente vektora brzine  $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ . Nadalje će se prikazati samo komponente količine gibanja u smjeru  $x$  osi, a zaključci proizašli iz postupka se mogu primijeniti i na ostale osi Kartezijevog sustava.

Prema napreznjima i tlakovima koji djeluju na kontrolni volumen tekućine na plohe normalne na  $x$  smjer, može se prikazati sljedeći izraz za prisutne vanjske sile (Slika 28):

$$\begin{aligned} & \left[ \left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[ - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & = \left( - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (27)$$

gdje  $\tau$  označava normalno ili posmično naprezanje neke vanjske površinske sile na plohu kontrolnog volumena i  $p$  tlak koji djeluje u normalnom smjeru na plohu kontrolnog volumena.



Slika 28 Kontrolni volumen tekućine s prikazanim vektorima vanjskih sila koje djeluju na kontrolni volumen

Vanjske sile koje djeluju na plohe kontrolnog volumena koje su normalne na y i z smjer, ali posmična komponenta naprezanja spomenutih sila koja djeluje u smjeru globalne x osi Kartezijevog sustava može se prikazati na sljedeći način:

$$-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (28)$$

$$-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta y \delta z + \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (29)$$

Ukoliko se zbroje sve vanjske površinske sile koje djeluju u x smjeru izražene jednadžbama (27), (28) i (29), te podjele s obujmom kontrolnog volumena ( $\delta x \delta y \delta z$ ) na koji djeluju, tada se dobije:

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (30)$$

Vanjske površinske sile koje djeluju na plohe kontrolnog volumena u obliku normalnih i posmičnih naprezanja (jednadžba (30)) s volumnim silama na kontrolni volumen čine promjenu količine gibanja u vremenu (prvi član unutar jednadžbe (26), koji opisuje promjenu količine gibanja u x smjeru), a za x smjer se navedeni mogu izjednačiti u okviru sljedećeg izraza:

$$\rho \frac{du}{dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (31)$$

gdje  $S_{Mx}$  označava volumnu silu koje djeluju na kontrolni volumen u x smjeru. Jednako kao jednadžbu za promjenu količine gibanja u vremenu nekog kontrolnog volumena u ovisnosti o vanjskim površinskim i volumnim silama koje djeluju u x smjeru (jednadžba (31)), mogu se izvesti ekvivalente jednadžbe za druga dva smjera y i z:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (32)$$



$$\rho \frac{dw}{dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (33)$$

Jednadžbe promjene količine gibanja definirane prema smjerovima Kartezijevog koordinatnog sustava, smjerovi  $x$ ,  $y$  i  $z$  (izražene jednadžbama (31), (32) i (33)), mogu se skupno prikazati u okviru vektorskog oblika jednadžbe promjene količine gibanja:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) - \nabla \cdot \tau - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (34)$$

gdje su komponente  $u$ ,  $v$  i  $w$  tvore vektor brzine  $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ ,  $t$  označava vrijeme,  $\rho$  gustoću tekućine,  $\tau$  označava normalno ili posmično naprezanje neke vanjske površinske sile na plohu kontrolnog volumena,  $p$  tlak u smjeru normalnom na plohu kontrolnog volumena,  $\vec{g}$  vektor gravitacijske sile, odnosno volumnu silu koja djeluje u  $z$  smjeru na kontrolni volumen prethodno uključen unutar člana  $S_{Mz}$  unutar jednadžbe (33). Jednadžba (34) može se prenijeti u integralni oblik koristeći Gaussov teorem gdje se može član s operatorom divergencije koji djeluje na određeni volumen pretvoriti u plošni integral:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \vec{v} dV = -\oint (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) \cdot \vec{n} dS - \oint \tau \cdot \vec{n} dS - \int p dV + \int \rho \vec{g} dV \quad (35)$$

gdje  $S$  označava površinu plohe volumena kroz koji protječe količina gibanja,  $\vec{n}$  jedinični normalni vektor pojedine plohe volumena,  $V$  obujam elementarnog volumena. Integralni oblik jednadžbe očuvanja količine gibanja prikazan jednadžbom (35), pogodan je za korištenje u okviru metode konačnih volumena.

#### **4.4.2 Numerički model propusta pod utjecajem valova**

Validacija numeričkog modela propusta je prikazana u okviru poglavlja 5.4.1 i rezultati numeričkog modeliranja grupe propusta su prikazani u okviru poglavlja 5.4.2.

U svrhu ispitivanja transmisije valne energije i protoka ostvarenog pod utjecajem valova kroz propust koristila se metoda konačnih volumena (engl. *finite volume method*) temeljena na vladajućim jednadžbama (23) i (35) u okviru OpenFOAM paketa kodova baziranih na otvorenom pristupu (The OpenFOAM Foundation, 2018). Dvofazni VOF (engl. *Volume Of Fluid*) interFoam model koji je sastavni dio OpenFOAM paketa, osim na vladajuće jednadžbe (23) i (35), oslanja se na definiciju indikatorske veličine kako bi prepoznao granicu između tekućina različitih fizičkih karakteristika. Indikator veličina ukazuje na udio volumena pojedine tekućine unutar pojedine ćelije diskretizirane mreže unutar koje se vrši proračun (engl. *interface-capturing*). Primjena indikatorske veličine temelji se na Eulerovom opisu svake tekućine (vode, zraka ili drugo) na nepokretnoj mreži i opisu vodnog lica između dvije tekućine pomoću jednadžbe transporta indikatorske veličine. Model interFoam pretpostavlja da su tekućine unutar diskretizirane mreže nestišljive (gustoća je konstantna u cijeloj domeni za pojedinu tekućinu s obzirom na neku prethodno definiranu vrijednost), što se za istraživanje gravitacijskih vodnih valova smatra razumnim pretpostavkom. Jednadžba pronosa indikatorske veličine unutar diskretizirane mreže može se definirati koristeći jednadžbu očuvanja polja prikazanu jednadžbom (17) gdje indikatorska veličina  $\alpha$  nije u funkciji mase odnosno gustoće. Navedeno se može prikazati u slijedećem obliku:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha) \vec{v}_r) = 0 \quad (36)$$

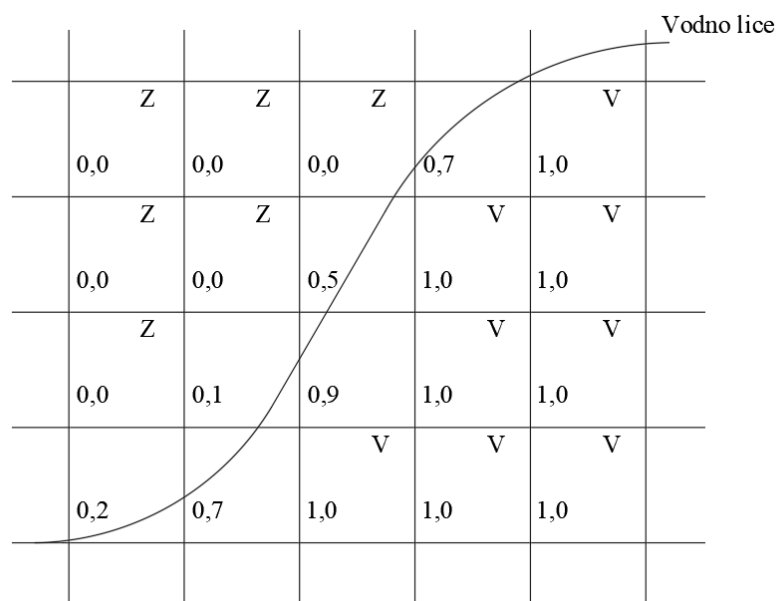
gdje  $\alpha$  označava udio pojedine tekućine unutar ćelije diskretizirane mreže,  $t$  vrijeme,  $\vec{v}$  vektor brzine i  $\vec{v}_r$  vektor relativne brzine. Treći član unutar jednadžbe (36) koji sadrži vektor relativne brzine nema fizikalni smisao, već služi kako bi se granica između pojedinih tekućina različitih karakteristika napravila oštrijom (Berberović i ostali, 2009). Također član vektora relativne brzine, iako formalno opisan mjernom jedinicom brzine (m/s), nema fizikalni smisao. Navedeni član je samo aktivan u okolici granice između tekućina ( $0 < \alpha < 1$ ), gdje je intenzitet utjecaja trećeg člana reguliran pomoću vektora relativne brzine. Kako bi se diferencijalna

jednadžba (36) vektorskog oblika koristila u okviru metode konačnih volumena, potrebno je izvesti integralni oblik koji se može prikazati na slijedeći način:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \alpha dV + \oint \alpha \vec{v} \vec{n} dS + \oint \alpha (1 - \alpha) \vec{v}_r \vec{n} dS = 0 \quad (37)$$

gdje članovi volumnog karaktera na koje djeluje operator divergencije su pretvoreni u plošne integrale koristeći Gaussov teorem divergencije, a oznaka  $S$  obilježava površinu plohe volumena kroz koji protječe skalarna vrijednost  $\alpha$ ,  $\vec{n}$  jedinični normalni vektor pojedine plohe volumena,  $V$  obujam elementarnog volumena. Kako bi se osigurala stabilnost proračuna jednadžbe (37) odnosno pronosa indikatorske veličine koristi se MULES shema (engl. *Multi-dimensional flux limited scheme*), dok u svrhu implicitnog rješavanja vladajućih jednadžbi (23) i (35) koristi se PIMPLE algoritam (Higuera i ostali, 2013).

U okviru slučaja morskih valova koji se obrađuju u ovom radu, ćelije potpuno ispunjene vodom su označene vrijednošću 1 ( $\alpha = 1$ ), dok je ćelijama potpuno ispunjene zrakom dodijeljena je vrijednost 0 ( $\alpha = 0$ ) (Slika 29). Ćelijama u okolice granice između faza vode i zraka, odnosno na vodnom licu, dodijeljena je vrijednost između 0 i 1 ( $0 < \alpha < 1$ ) ovisno o zastupljenosti pojedine faze unutar ćelije, te je u navedenom području aktivan treći član iz jednadžbe (36).



Slika 29 Shematski prikaz funkcioniranja VOF metode za definiranje granice između pojedinih tekućina različitih fizičkih svojstva

Prateći navedeni opis granice između faza odnosno vodnog lica, svakoj ćeliji diskretizirane mreže u okolici granice potrebno je pripisati gustoću i viskoznost mješavine tekućina. U okolici vodnog lica, gustoća i viskoznost linearno su interpolirani između dvije faze (vode i zraka) u skladu s udjelom indikatorske veličine  $\alpha$  pripisane pojedinoj ćeliji unutar diskretizirane mreže, što se može prikazati na slijedeći način:

$$\rho = (1 - \alpha)\rho_z + \alpha\rho_v \quad (38)$$

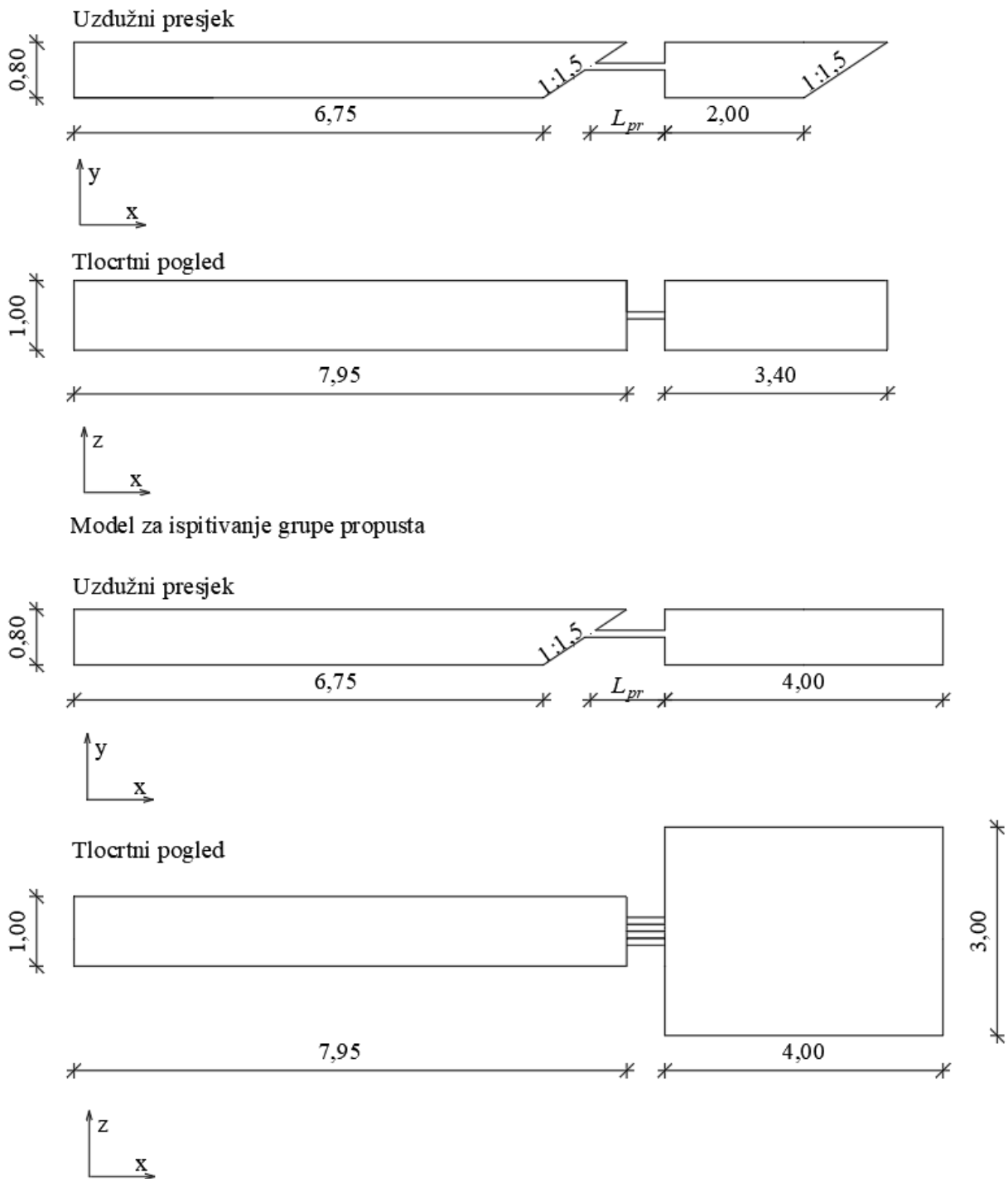
$$\mu = (1 - \alpha)\mu_z + \alpha\mu_v \quad (39)$$

gdje je  $\rho$  gustoća pojedine faze i  $\mu$  dinamička viskoznost pojedine faze. Indeks  $z$  označava fazu zraka i indeks  $v$  označava fazu vode. Navedeni model je već korišten u prethodnim istraživanjima dvofaznog strujanja sa slobodnim vodnim licem poput modeliranja gravitacijskih vodnih valova, sloma brane i ribljih staza (Zhainakov i Kurbanaliev, 2013; Duguay i ostali, 2017; Jacobsen i ostali, 2018).

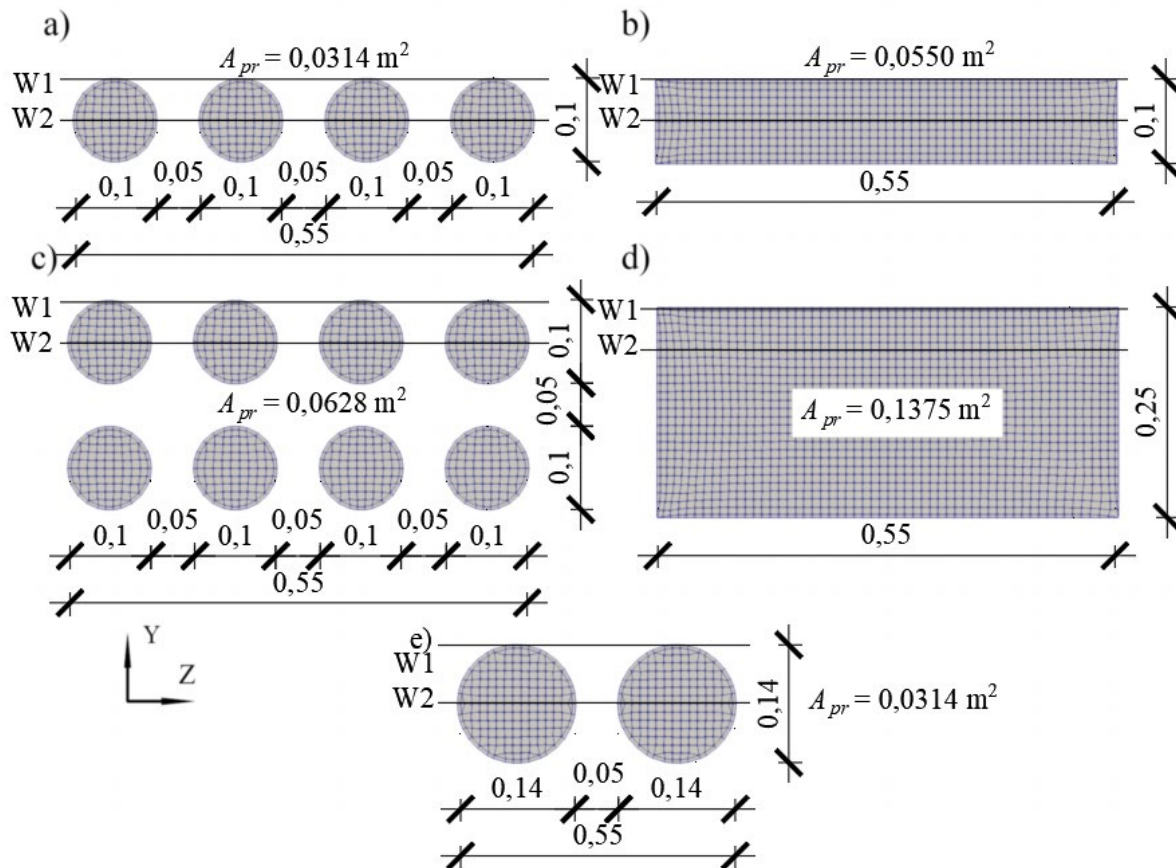
#### **4.4.2.1 Opis numeričkog modela za validaciju i numeričkog modela grupe propusta**

Numerički modeli se uspostavljaju na osnovu laboratorijskih mjerenja provedenih u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu, stoga će se također i diskretizirana mreža prilagoditi gabaritima valnog kanala i fizičkog modela lukobrana s propustom na kakvim se provode mjerenja (model za validaciju na Slika 30). Mjerenja koja su provedena u laboratorijskim uvjetima i dimenzije pojedinih dijelova fizičkog modela propusta pod utjecajem valova opisane su u poglavlju 4.1.1 (Slika 15). Koristeći se numeričkim modelom oblikovan prema uvjetima u hidrotehničkom laboratoriju, usporedit i validirat će se formulacija numeričkog modela prema podacima dobivenim mjerenjem provedenim u istovjetnim okolnostima unutar laboratorija (metodologija prikazana u okviru poglavlja 4.1, a rezultati u okviru poglavlja 5.1).

Nakon provedene validacije numeričkog modela, uspostavlja se numerički model proširene domene kako bi se mogle testirati različite varijante grupe propusta ugrađene u lukobran (model za ispitivanje grupe propusta na Slika 30). Akvatorij koji se nalazi u pozadini propusta proširen je na dužinu od 4 m i širinu od 3 m (laboratorijsko mjerilo), dok visina modela u svim točkama odgovara visini koja je određena unutar modela za validaciju.



Slika 30 Prikaz domene numeričkih modela za validaciju i ispitivanje grupe propusta



Slika 31 Poprečni presjeci ispitivanih tipova grupe propusta s prikazanim razinama za potpuno uronjenu grupu propusta (W1) i djelomično uronjenu grupu propusta (W2), te površinom ( $A_{pr}$ )

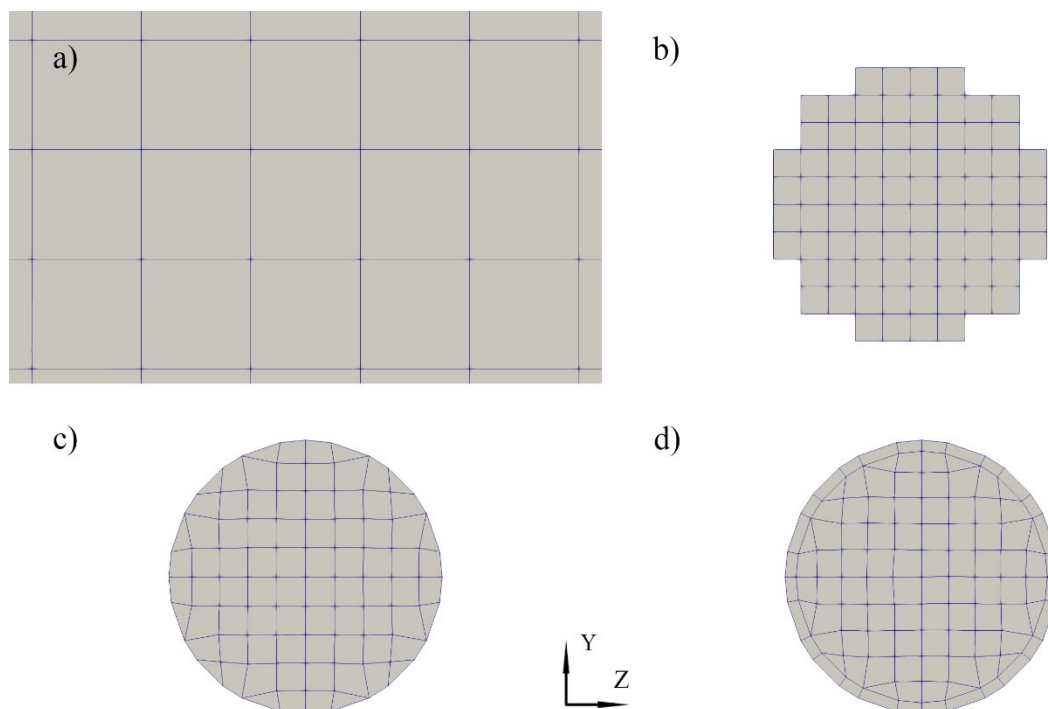
Prošireni gabariti zaštićenog akvatorija omogućit će promatranje difrakcije valova i prostorne raspodjele pronosa valne energije u ovisnosti o valnim parametrima incidentnog vala i oblikovanju grupe propusta. Oblici grupe propusta koji su ispitivani su:

- grupa od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu (označeno s (a)) na Slika 31),
- propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao (a) propust (označeno s (b)) na Slika 31),
- grupa od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređena u dva reda po 4 propusta (označeno s (c)) na Slika 31),
- propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao (c) propust (označeno s (d)) na Slika 31)
- grupa od 2 propusta kružnog poprečnog presjeka čija površina poprečnog presjeka jednog propusta odgovara površini poprečnog presjeka dvaju propusta iz (a) propusta (označeno s (e)) na Slika 31).

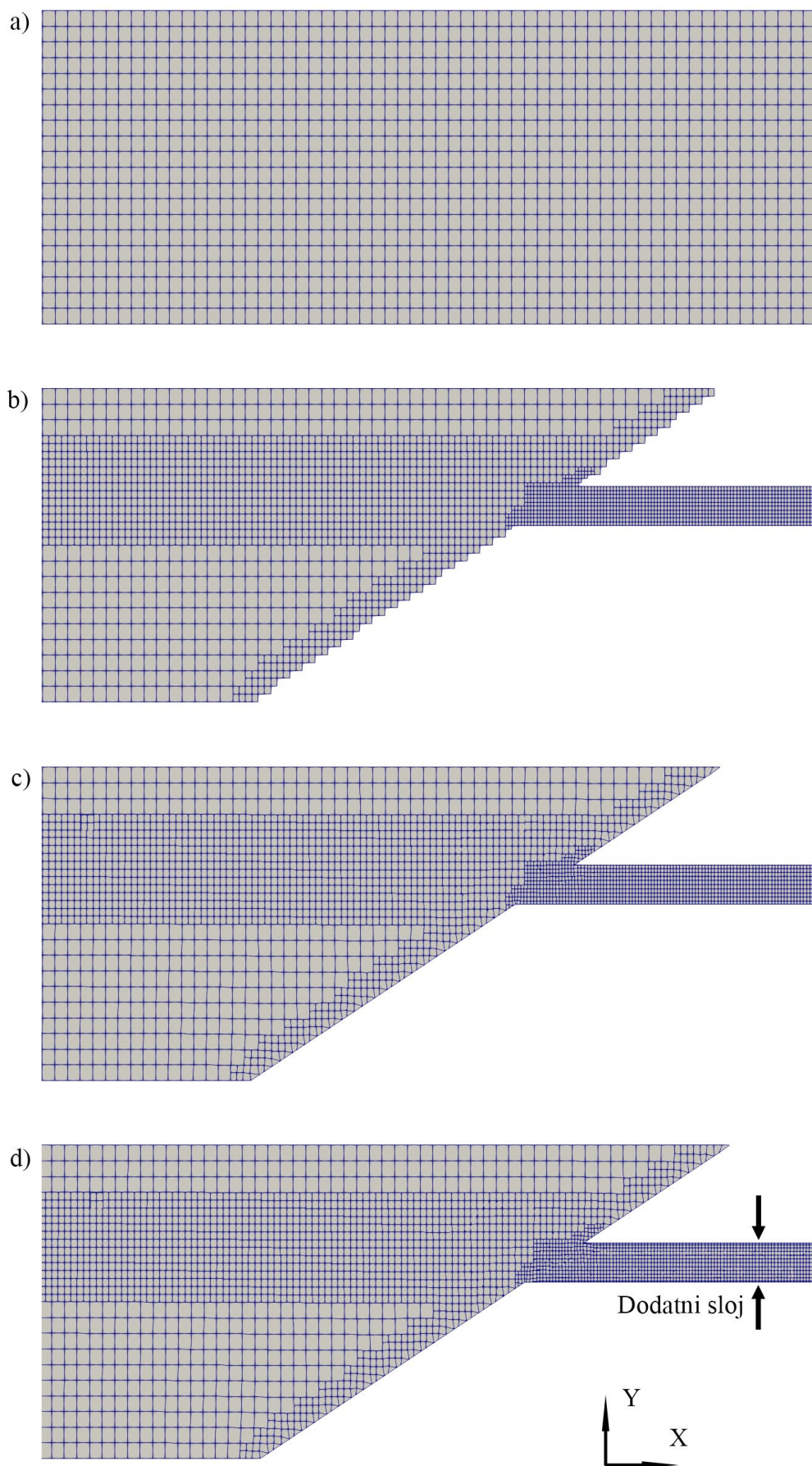
#### 4.4.2.2 Opis diskretizirane mreže

Osnovni gabariti diskretizirane mreže uspostavljeni su koristeći se alatima otvorenog pristupa blockMesh (alat formira osnovnu mrežu preko cijele domene interesa) i snappyHexMesh (alat iterativno usitnjuje diskretiziranu mrežu na prethodno definiranim mjestima i prilagođava oblik konačne mreže s obzirom na zadanu geometriju).

Geometriju lukobrana i ugrađenog propusta je najprije potrebno definirati u programu koji omogućuje trodimenzionalno modeliranje oblika (poput Blender, Autodesk 3ds Max ili slično). Nadalje je potrebno formirati osnovnu diskretiziranu mrežu koja se proteže po cijeloj domeni numeričkog modela i definirati imena ploha koja omeđuju domenu (za koje se definiraju rubni uvjeti u kasnijim fazama) (a) na Slika 32 i Slika 33). Heksagoni čine osnovni element unutar formirane diskretizirane mreže. Prethodno formirana geometrija je u obliku .stl datoteke uvedena u postupak formiranja konačnog oblika diskretizirane mreže pomoću alata snappyHexMesh. Alat najprije izdvoji ćelije koje se nalaze unutar definirane geometrije (b) na Slika 32 i Slika 33), potom oblikuje ćelije unutar domene tako da odgovaraju oblikovanju geometrije (c) na Slika 32 i Slika 33), a konačno dodaje sloj ćelija po obrubu geometrije (d) na Slika 32 i Slika 33).

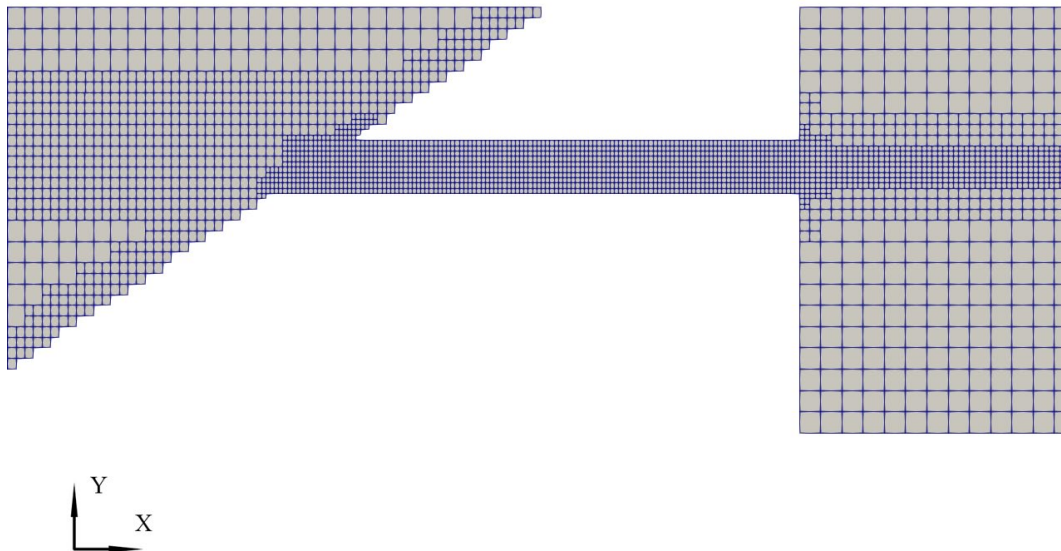


Slika 32 Poprečni presjek diskretizirane mreže na lokaciji propusta



Slika 33 Uzdužni presjek diskretizirane mreže





Slika 34 Usitnjavanje ispred i iza lukobrana unutar numeričkog modela

Dodatni sloj se uspostavlja samo unutar propusta, gdje je prostor kroz koji je omogućeno protjecanje vode pod utjecajem valova bio najuži, kako bi omogućio detaljniji opis slike strujanja unutar propusta (d) na Slika 32 i Slika 33). Uzimajući u obzir dostupne računalne resurse i prethodno provedene analize osjetljivosti utjecaja diskretizirane mreže na rezultate numeričkog modeliranja valova (Eltard *i ostali*, 2017), pozadinska diskretizacijska mreža, formirana koristeći alat blockMesh okarakterizirana je ćelijom veličine 4 cm ( $\Delta x = 4$  cm). U području gdje se očekuje tijekom proračuna numeričkog modela pojava granice između vode i zraka, ćelije se dodatno usitnjuju na veličinu od 2 cm ( $\Delta x = 2$  cm), a u okolici i unutar samog propusta se ćelije usitnjuju na veličinu od 1 cm ( $\Delta x = 1$  cm). Uzimajući u obzir očekivano značajno manje valne visine koji se transmitiraju u akvatorij kroz propust, područje u okolici srednje razine mora u pozadini lukobrana su zadržane pri većem usitnjenju od 1 cm kako bi se mogli kvalitetnije opisati manji valovi (Slika 34). Konačni broj ćelija koji se koristi u opisu numeričkog modela ovisi o varijanti koja se testirala (oblikovanju grupe propusta, razini srednje razine mora, itd.), ali varira unutar raspona od 1 800 000 ćelija  $\pm 5\%$ . S obzirom na pokazatelje koji ukazuju na kvalitetu diskretizirane mreže modela, neortogonalnost je zadovoljavajuće niska (maksimalna neortogonalnost unutar mreže iznosi  $50^\circ$ ) i „vidljivost“ čvorova je također zadovoljavajuće niska (engl. *skewness*) (maksimalna vrijednost unutar mreže iznosi 1,5).

Kako bi se ograničio vremenski korak tijekom proračuna numeričkog modela u stabilnim okvirima korišten je Courantov uvjet u svim ćelijama mreže. Uvjet se može matematički za trodimenzionalno područje prikazati na slijedeći način:

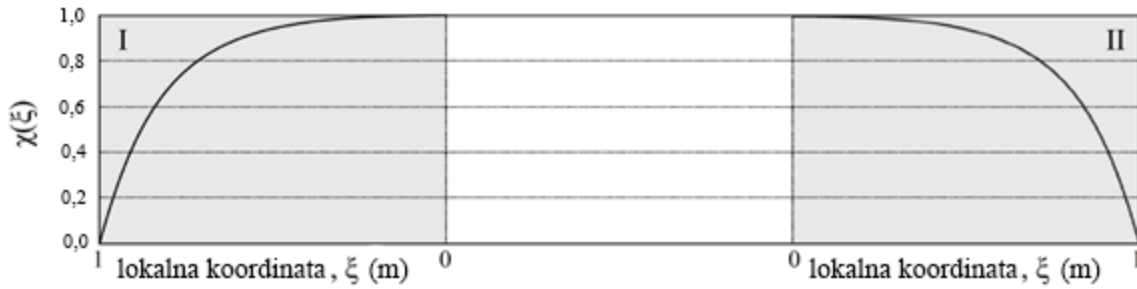
$$Co = \frac{|u|\Delta t}{\Delta x} + \frac{|v|\Delta t}{\Delta y} + \frac{|w|\Delta t}{\Delta z} \leq Co_{\max} \quad (40)$$

gdje  $Co$  označava Courantov broj,  $u$  komponentu vektora brzine u x smjeru,  $v$  komponentu vektora brzine u y smjeru,  $w$  komponentu vektora brzine u z smjeru,  $\Delta t$  vremenski korak i  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  i  $\Delta z$  dimenzije u x, y i z smjeru pojedine ćelije u kojoj se Courantov broj proračunava. Kroz proračun nestacionarnog numeričkog modela vremenski korak varira kako bi Courantov uvjet definiran jednadžbom (40) uvijek bio zadovoljen. Za sve slučajeve provedenih ispitivanja (parametara valova i parametara geometrijskih karakteristika propusta) maksimalni dopušteni Courantov broj iznosi 0,15.

Za proračun jednog numeričkog modela pod utjecajem monokromatskih valova za navedeni broj ćelija numeričkog modela (Tablica 10), maksimalni vremenski korak reguliran maksimalnim dopuštenim Courantovim brojem i dostupne računalne resurse potrebno je oko 10 dana. Valja napomenuti kako se numerički model valovanja izradio u jednakom mjerilu kao fizički model (1:10) postavljen u laboratoriju radi jednostavnije validacije i usporedbe podataka s mjerenim podacima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima.

#### **4.4.2.3 Opis rubnih i početnih uvjeta**

Kako bi se definirao signal koji generira valove unutar domene numeričkog modela, korišten je waves2foam alat (Jacobsen *i ostali*, 2012). Alat definira područja relaksacije (engl. *relaxation zones*) unutar domene temeljene prema izvodu metode relaksacije određene u prethodnim istraživanjima (Mayer *i ostali*, 1998). Područja relaksacije su implementirana kako bi spriječila refleksiju od granica domene numeričkog modela, odnosno kako bi se valovi apsorbirali pred samim rubom domene. Navedeno je potrebno ukoliko postoji refleksija od građevine koja se nalazi unutar numeričkog modela, kako bi se na ulaznom rubnom uvjetu (gdje se generiraju valovi) valna energija reflektiranog vala apsorbirala (područje označeno sa simbolom I na Slika 35).



Slika 35 Shematski prikaz područja generacije valova (I) i područja umirenja valova (II)

Kako ne bi došlo do refleksije valova od samog ruba domene potrebno je na izlaznom rubnom uvjetu također definirati područje relaksacije (područje označeno sa simbolom II na Slika 35). Proizvoljan broj relaksacijskih zona može se definirati unutar domene koje se mogu definirati kao ulazni ili izlazni rubni uvjet. Unutar relaksacijske zone, polje brzina i indikatorska veličina  $\alpha$  se iznova računaju za svaki vremenski korak prema slijedećoj formulaciji:

$$\psi = \chi \psi_{cilj} + (1 - \chi) \psi_{proračun}, \psi \in \{\vec{v}, \alpha\} \quad (41)$$

gdje  $\psi_{cilj}$  označava ciljanu vrijednost na rubnom uvjetu koja se može definirati u obliku neke valne teorije ili struje, a  $\psi_{proračun}$  proračunate vrijednosti vektora brzine i indikatorske veličine  $\alpha$  unutar domene numeričkog modela pomoću vladajućih jednadžbi (23) i (35). Oznakom  $\chi$  definira se ponder između ciljane i proračunatih vrijednost unutar područja relaksacije preko slijedeće relacije:

$$\chi(\xi) = 1 - \frac{e^{\xi\beta} - 1}{e - 1} \quad (42)$$

gdje  $\xi$  označava lokalnu koordinatu unutar područja relaksacije (označeno na Slika 35, gdje vrijednost 0 odgovara unutarnjem rubu područja relaksacije, a vrijednost 1 vanjskom rubu područja relaksacije). Faktor oblika označen s  $\beta$  se može proizvoljno odrediti, a u okviru ovog rada je korištena vrijednost 3,5.

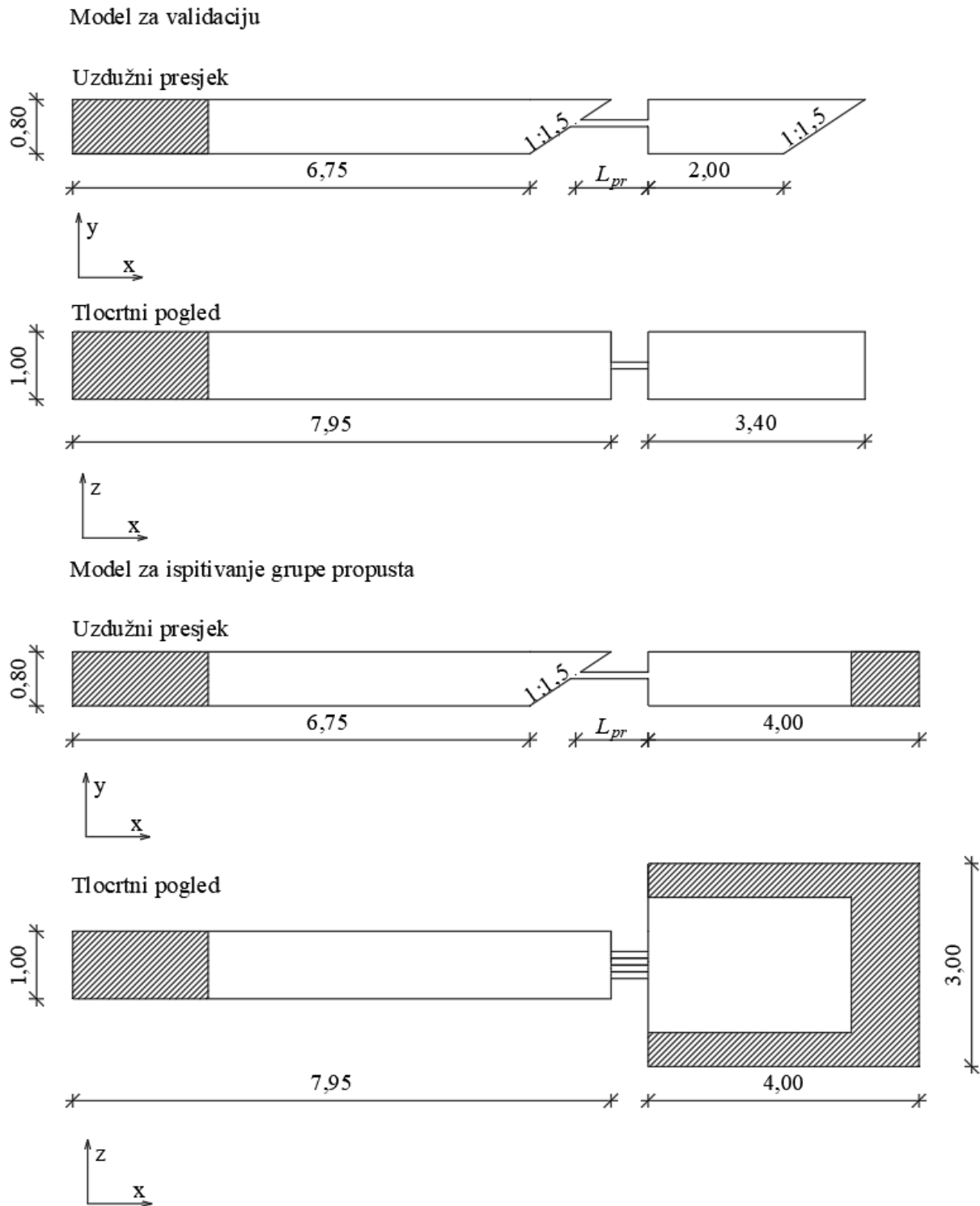
Signal na ulaznom rubnom uvjetu koji formira val unutar numeričkog modela se prije početka proračuna modela generira kroz waves2foam alat (Jacobsen i ostali, 2012). Navedeni alat omogućava za zadane valne parametre (poput valne visine, perioda vala, pomaka u fazi,

itd.) definiranje vremenske serije rubnog uvjeta u obliku prostornog rasporeda vektora brzine, tlakova i indikatorske veličine koje numerički model interFoam zahtjeva kako bi se izvršio proračun. U području ispred ulaznog rubnog uvjeta definirano je relaksacijsko područje koje apsorbira valnu energiju reflektiranu od građevine (Slika 36).

U okviru modela za validaciju, područje relaksacije je definirano samo na ulaznom rubnom uvjetu, dok je zaštićeni akvatorij okružen zidovima sa svih strana (model za validaciju na Slika 36). Najudaljenija ploha rubnog uvjeta geometrije je oblikovana pod kutom, jednako kao i u laboratorijskim uvjetima, kako bi se ostvarila smanjena refleksija valne energije. Na rubnim uvjetima gdje su određeni zidovi, definiran je rubni uvjet za vektor brzine koji iznosi 0 m/s (eng. *no slip*). U svrhu provedbe validacije numeričkog modela, koristit će se prethodno provedena mjerenja unutar valnog kanala koja su monokromatskog karaktera (Tablica 8). Testovi će se provesti za dvije razine vodnog lica W1 i W2 (W1 označava situaciju gdje je vodno lice visinski pri gornjem rubu propusta, a W2 situaciju gdje je vodno lice visinski pri osi propusta). U slučaju proširenog modela za ispitivanje grupe propusta, unutar zaštićenog akvatorija su definirana područja relaksacije za umirenje valne energije po svim rubovima numeričkog modela, kako bi se simulirala otvorena granica gdje valovi „izlaze“ iz domene modela (model za ispitivanje grupe propusta na Slika 36). Kako bi se provela ispitivanja grupe propusta izabrane su valne situacije sa 7 različitih incidentnih valova za djelomično uronjenu grupu propusta (W2) i 4 incidentna vala za potpuno uronjenu grupu propusta (Tablica 10). Ukupno se provelo 55 ispitivanja (11 valova iz Tablica 10 za 5 različitih geometrija grupe propusta). Trajanje pojedinog testa unutar numeričkog modela iznosi 25 s.

Tablica 10 Parametri monokromatskih valova koji su primijenjeni tijekom ispitivanja grupe propusta unutar numeričkog modela

Monokromatski valovi							
Broj testa	$H_i$ (m)	$T$ (s)	$H_i/L$ (1)	$L$ (m)	$L_{pr}$ (m)	$D_{pr}$ (m)	Razina vode
1	0,06	0,88	0,05	1,2	1,0	0,1	W1;W2
2	0,09	1,07	0,05	1,8	1,0	0,1	W1;W2
3	0,09	1,32	0,03	2,7	1,0	0,1	W1;W2
4	0,12	1,24	0,05	2,4	1,0	0,1	W1;W2
5	0,12	1,52	0,03	3,6	1,0	0,1	W2
6	0,15	1,39	0,05	3,0	1,0	0,1	W2
7	0,15	1,70	0,03	4,5	1,0	0,1	W2



Slika 36 Prikaz područja relaksacije za modele validacije i ispitivanja grupe propusta

Posebni modeli turbulencije, koji opisuju turbulenciju za skale manje od veličine ćelija diskretizirane mreže, se unutar numeričkog modela koji opisuju valove nisu uzeli u obzir. Sukladno tome, turbulencija je riješena u relativno većoj skali koja se može direktno opisati strujanjem unutar ćelija. Turbulentni modeli koji neće utjecati na propagaciju vodne površine (najčešće u obliku numerički uzrokovanom disipacijom valne visine vala koja putuje kroz prostor) su tema današnjih istraživanja (Brown *i ostali*, 2016; Devolder *i ostali*, 2017, 2018; Larsen i Fuhrman, 2018).

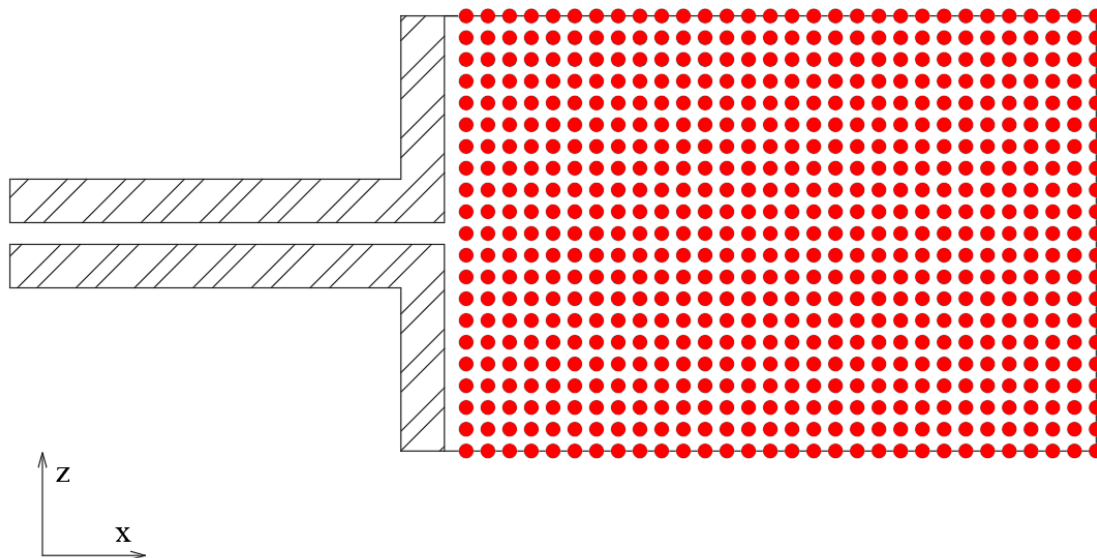
#### **4.4.2.4 Sonde za mjerenje oscilacija vodnog lica i protoka unutar numeričkog modela**

Kako je prethodno navedeno jednadžbom (36), odnosno u integralnom obliku jednadžbom (37), granica između faza tekućina različitih fizičkih karakteristika nije apsolutno oštra, već se radi o prijelaznoj zoni gdje indikatorska veličina  $\alpha$  varira između 0 i 1. Ukoliko je potrebno odrediti površinu vodnog lica tada se može vodno lice definirati plohom gdje za sve točke vrijedi vrijednost indikatorske veličine u iznosu od 0,5 ( $\alpha = 0,5$ ). Navedenom se metodom vodno lice može odrediti koristeći se sondama za mjerenje vodnog lica unutar numeričkog modela koje omogućuje waves2foam alat (Jacobsen *i ostali*, 2012). Proizvoljan broj sonde može se smjestiti unutar modela koje određuju razinu vodnog lica primjenjujući sljedeću matematičku formulaciju:

$$\eta = \int_{y_0}^{y_1} \alpha dy - h \quad (43)$$

gdje  $\eta$  označava razinu vodnog lica,  $\alpha$  indikatorsku veličinu,  $y_0$  i  $y_1$  proizvoljne granice najviše i najniže točke koje definiraju dužinu po kojoj se bilježi vodno lice i  $h$  vodno lice pri mirnim uvjetima.

U svrhu validacije numeričkog modela u skladu s mjerenim vrijednostima valnih visina provedenih na fizičkom modelu unutar valnog kanala, numeričke sonde su postavljene unutar modela jednako kao u laboratorijskim uvjetima (Slika 15). U okviru kasnije faze numeričkog ispitivanja grupe propusta unutar akvatorija je definiran niz numeričkih sonde kako bi se mogla promatrati prostorna raspodjela transmitirane valne energije koja prolazi kroz lukobran (Slika 37). Frekvencija uzorkovanja numeričkih sonde iznosi 100 Hz.



Slika 37 Pozicije numeričkih sondi unutar zaštićenog akvatorija dužine 3 m i širine 2 m (ne uključuje dio numeričke mreže gdje se obavlja relaksacija vala odnosno umirenje valne energije); mreža postavljena numeričkih sondi se sastoji od 30 stupaca i 21 reda

Na svakoj sondi provest će se analiza vremenske serije oscilacije razine vodnog lica kako bi se definirali relevantni valni parametri. Konačno će se provesti sinteza podataka po pojedinoj sondi kako bi se odredila prostorna raspodjela valne visine unutar zaštićenog akvatorija uslijed određenih valnih parametara (prikazano u okviru poglavlja 5.4.2). Navedena metodologija će omogućiti određivanje prostornog karaktera polja valne visine po pojedinoj grupi propusta, što u prijašnjim istraživanjima nije nikada provedeno.

Unutar samog propusta je tehnički zahtjevno direktno mjeriti protok ili brzinu vode unutar fizičkog modela jer za mjerenja na navedenoj lokaciji sam uređaj bi svojim volumenom suviše utjecao na strujnu sliku koju pokušava mjeriti. Stoga se odlučilo u fizičkom modelu mjeriti brzinu vode u točki na izlazu iz propusta (Slika 15) koja služi za validaciju proračunatih brzina vode unutar numeričkog modela (prikazano u okviru poglavlja 5.4.1). Nadalje će se koristiti validirani numerički model kako bi se mogao definirati protok uzrokovan valovima kroz propust (pomoću predefinirane mjerne plohe koja će biti pozicionirana unutar propusta) (rezultati prikazani u okviru poglavlja 5.4.2).

#### **4.4.3 Numerički model propusta pod utjecajem plimnih oscilacija**

Validacija numeričkog modela je prikaza u okviru poglavlja 5.5.1 i 5.5.2, a rezultati za grupu propusta su prikazani u poglavlju 5.5.3.

Numerički model protjecanja morske vode pod utjecajem plimnih oscilacija je uspostavljen jer se u okviru terenskih mjerenja prepoznalo da plimne oscilacije čine dominantni dugoročni utjecaj na protjecanje kroz propust u ACI marini Opatija. Navedeno je prezentirano kroz poglavlja 5.2.1 i 5.2.2 s prezentiranim udjelima pojedinog generatora (Slika 55).

Trodimenzionalni numerički model strujanja morske vode uslijed plimnih oscilacija kroz propust je uspostavljen na osnovu Navier-Stokesovih jednadžbi samo za vodenu fazu, što je razumna aproksimacija u slučajevima gdje se količina gibanja faze manje gustoće (ovdje zraka) može zanemariti. Stoga se diskretizacijska mreža izrađuje samo za fazu gdje očekujemo vodenu fazu. S obzirom da numerički model ne prati granicu između dviju faza koristeći funkciju pronosa indikatorske veličine  $\alpha$  (engl. *interface-capturing*), potrebni su bitno manji računalni resursi. Vladajuće Navier-Stokesove jednadžbe su već prezentirane u okviru poglavlja 4.4.1 jednadžbama (23) i (35).

##### **4.4.3.1 Opis numeričkog modela za validaciju i numeričkog modela grupe propusta**

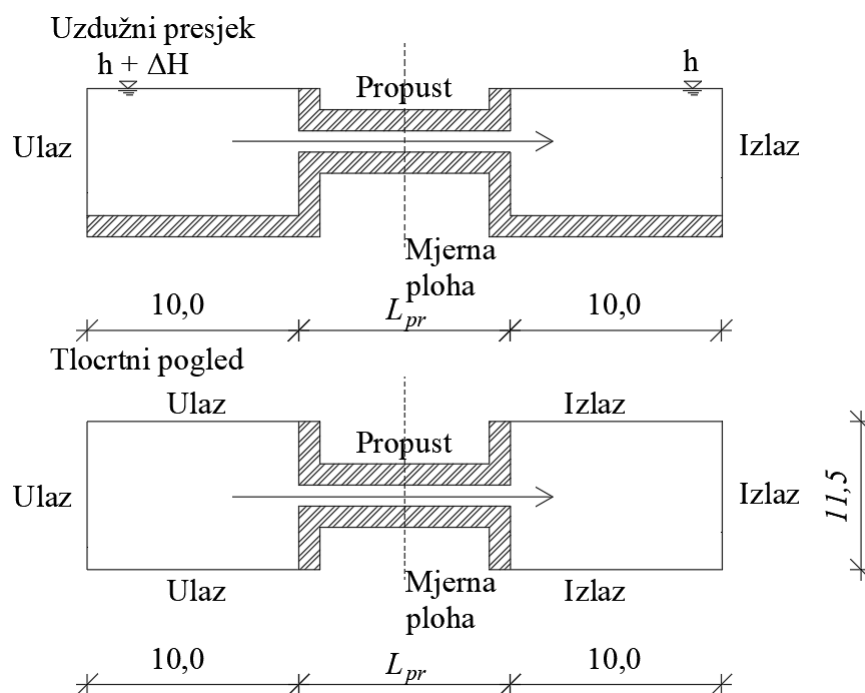
Prvo će se formirati numerički model koji sadrži jedan propust kružnog poprečnog presjeka. Kako bi se numerički model protjecanja morske vode pod utjecajem plimnih oscilacija validirao, usporediti će se s već poznatim i ustaljenim analitičkim modelom unutar literature za protjecanje vode kroz propust temeljenim na Manningovoj formuli. Nakon provedene validacije modela, numerički model će se proširiti kako bi se ispitala učinkovitost protjecanja kroz grupe propusta jednakih oblikovanja kao i za numerički model valovanja (Slika 31). Načelno, model se sastoji od dva rezervoara koji su spojeni grupom propusta kroz koji se omogućuje protjecanje (Slika 38).

U svrhu analitičkog proračuna protoka kroz cijevi, koristit će se obrasci za hidrauličko oblikovanje cijevnih propusta koji se često daju u formulaciji prikazani jednadžbom (9). U okviru jednadžbe (9) obuhvaćene su varijable  $\Delta H$  ukupni gubitak energije (visinska razlika površine vode između dva rezervoara koje spaja propust),  $k_{izlaz}$  koeficijent lokalnog gubitka



energije na izlazu,  $k_{ulaz}$  koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu,  $n$  Manningov koeficijent hrapavosti materijala od čega je izrađen propust,  $L_{pr}$  duljina propusta,  $R$  hidraulički radijus propusta,  $v_{pr}$  brzina unutar propusta,  $g$  gravitacijska konstanta ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). U okviru analitičkog modela, za koeficijent lokalnog gubitka energije na izlazu će se usvojiti vrijednost u iznosu od 1, a za koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu vrijednost u iznosu od 0,6, što odgovara literaturi za slično oblikovane propuste (White, 2002). Duljina propusta, hidraulički radijus, hrapavost materijala i ukupni gubitak energije ostvaren protjecanjem kroz propust biti unutar analitičkog modela određeni tako da odgovaraju gabaritima i oblikovanju propusta unutar numeričkog modela za pojedini test koji se ispituje. Primjerice, ako duljina propusta unutar numeričkog modela iznosi 10 m, tada će se jednaka vrijednost za duljinu propusta koristiti unutar analitičkog modela.

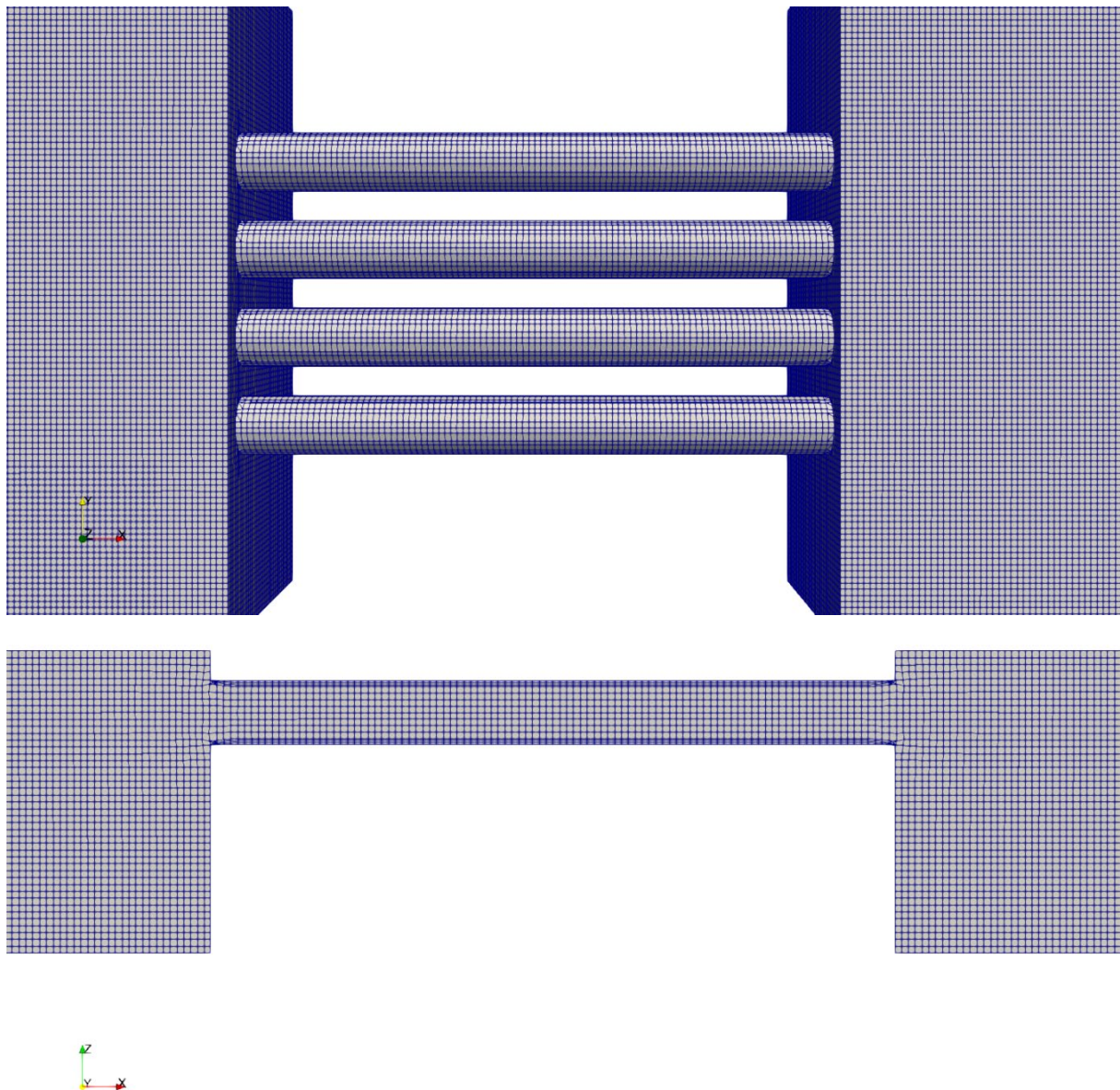
Iz analitičke jednadžbe (9) će se potom moći izvesti brzina morske vode koja protječe kroz propust pod utjecajem različitih razina vodnog lica između dva rezervoara koje propust spaja, s obzirom da su svi ostali podaci geometrijskog oblikovanja propusta za pojedini slučaj poznati. Pretpostaviti će se da brzina vode pomnožena sa omočenom površinom poprečnog presjeka kroz propust zadovoljavajuće točno može predstaviti protok koji se ostvaruje kroz propust. Konačno će se protok koji je predviđen analitičkom jednadžbom (9) usporediti s vrijednostima protoka koji su izmjereni unutar numeričkog modela kako bi se validirala pouzdanost numeričkog modela (prikazano u okviru poglavlja 5.5.1).



Slika 38 Shematski prikaz numeričkog modela protjecanja pod utjecajem plimnih oscilacija

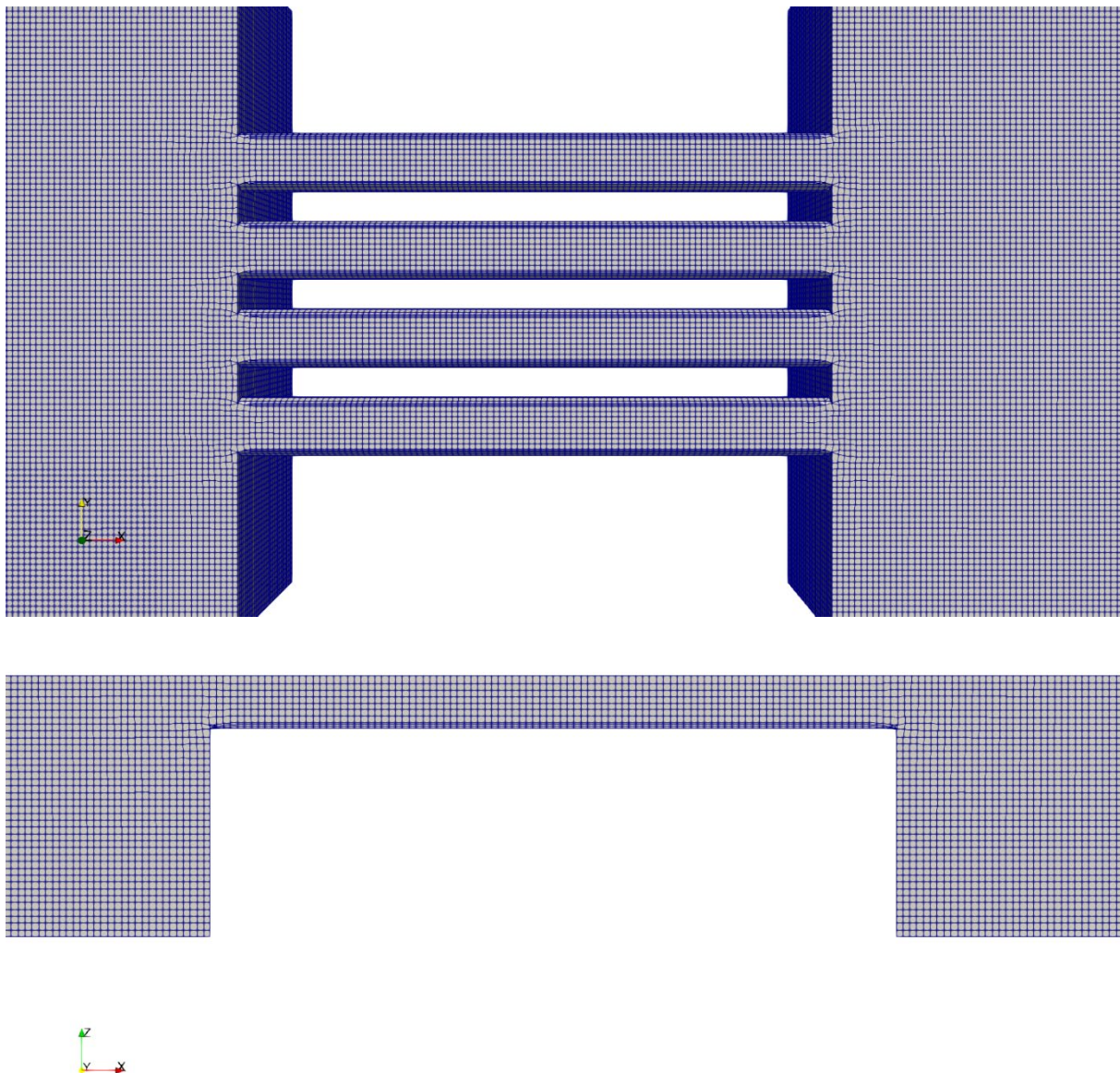
#### 4.4.3.2 Opis diskretizirane mreže

Numerički modeli protjecanja kroz propust pod utjecajem plimnih oscilacija je izrađen u prirodnom mjerilu. Osnovna diskretizacijska mreža sastoji se od ćelija veličine brida u iznosu 0,1 m, stvorena pomoću alata blockMesh, koja se potom oblikovala u svoj konačni oblik pomoću alata snappyHexMesh. Postupak definiranja pozadinske mreže i prilagođavanju oblika mreže prema prethodno definiranoj geometriji je istovjetan prema već opisanom procesu u poglavlju 4.4.2 za numerički model valovanja (Slika 32 i Slika 33).



Slika 39 Prikaz kako razina vodnog lica utječe na visinu diskretizacijske mreže; grupa propusta od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka promjera 1 m u jednom redu (grupa propusta (a)) za razinu vodnog lica koja iznosi 1,4 m iznad donjeg ruba propusta

U slučaju numeričkog modeliranja protjecanja kroz propust pod utjecajem plimnih oscilacija zrak nema značajan utjecaj na količinu gibanja vode, stoga se formira diskretizacijska mreža samo za vodenu fazu. Kao posljedicu navedenog, diskretizacijska mreža ima različite visine s obzirom na razinu vodnog lica za pojedini slučaj i također različit broj ćelija koje su potrebne da se strujanje opiše unutar modela (Slika 39 i Slika 40). U posljednjoj fazi generacije diskretizacijske mreže formiraju se tri sloja po unutarnjem obodu propusta koja prate geometriju propusta, slično kao što je već opisano za numerički model valovanja (Slika 32 i Slika 33).



Slika 40 Prikaz kako razina vodnog lica utječe na visinu diskretizacijske mreže; grupa propusta od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka promjera 1 m u jednom redu (grupa propusta (a)) za razinu vodnog lica koja iznosi 0,8 m iznad donjeg ruba propusta

Broj ćelija varira ovisno o razini vode koja se modelira između 600 000 ćelija  $\pm 10\%$  ćelija. S obzirom na pokazatelje koji ukazuju na kvalitetu diskretizirane mreže modela, neortogonalnost je zadovoljavajuće niska (maksimalna neortogonalnost unutar mreže iznosi  $30^\circ$ ) i „vidljivost“ čvorova je također zadovoljavajuće niska (engl. *skewness*) (maksimalna vrijednost unutar mreže iznosi 1,0). Vremenski koraci se drže na dovoljno maloj vrijednosti kako bi vrijednost Courantov broja bila manja od 0,4 i time osigurala stabilnost numeričkog modela.

#### **4.4.3.3 Opis rubnih i početnih uvjeta**

Rubni uvjet za definiranje konstante visine vodnog lica na otvorenim granicama modela je ustvari Dirichtleov rubni uvjet za tlak u obliku vremenski nepromjenjive vrijednosti po otvorenim granicama (Ulaz i Izlaz na Slika 39). Navedena pretpostavka se smatra razumnom jer su plimne oscilacije u stvarnosti relativno spor proces koji se odvija više sati. Za vektor brzine se pri otvorenim granicama definira se Neumanov rubni uvjet, gdje vrijednost gradijenta brzine okomitog na plohu rubnog uvjeta iznosi 0. Navedena kombinacija rubnih uvjeta tlaka i vektora brzine pri otvorenoj granici rezultira u nepoznatoj količini protoka koji ulazi i izlazi iz numeričkog modela kako bi se zadovoljili uvjeti konstantne razlike razina vodnog lica između dva rezervoara koja spaja propust. Podloga unutarnjeg i vanjskog akvatorija, te unutrašnjost propusta je definirana kao zid. Na samom zidu je za brzinu određena kao konstantni vektor iznosa od 0 m/s (engl. *no slip*).

Kako se unutar numeričkog modela pripisuju vrijednosti apsolutne hrapavosti zidova, u svrhu usporedbe s analitičkim modelom prezentira se funkcija pretvorbe između apsolutne hrapavost u Manningov koeficijent hrapavosti (Weber, 1971):

$$n = k_s^{1/6} / 26 \quad (44)$$

gdje je  $n$  Manningov koeficijent hrapavosti, a  $k_s$  apsolutna hrapavost izražena u milimetrima. Odnos vrijedi u slučajevima kada je iznos apsolutne hrapavosti unutar raspona 0,0001 – 0,01 m. U okviru ovih istraživanja u ovom radu će se zadržati konstantna vrijednost apsolutne hrapavost koja iznosi 0,005 m, što odgovara grubljem betonu. Jedina će iznimka biti

napravljena u slučaju usporedbe numeričkog modela protjecanja s terenskim mjerenjima u ACI marini Opatija (rezultati prezentirani u okviru poglavalja 5.5.2).

Za vladajuće jednadžbe (23) i (35) na kojima je vršeno Reynoldsovo osrednjavanje je moguće odrediti model turbulencije kako bi se uzeli u obzir oblici turbulencije manje skale koje nije moguće opisati s obzirom na veličinu ćelija unutar diskretizacijske mreže. Za modeliranje turbulencije koristi se  $k-\omega$  SST model, koji se sastoji od dvije jednadžbe za pronos turbulentne kinetičke energije  $k$  i brzina disipacije turbulencije  $\omega$ . Model  $k-\omega$  SST je mješavina  $k-\omega$  modela turbulencije u blizini zida, a  $k-\varepsilon$  model u toku tekućine koji nije pod utjecajem zidova (Menter, 1994). Nakon inicijalnih testnih modela (nisu prikazani u ovome radu) kako bi se okvirno kvantificirale veličine brzina pri zidovima modela, na svim rubovima modela su se naknadno formirala tri sloja ćelija koja služe adekvatnoj interpretaciji graničnog viskoznošnjog podsloja i rješavanju modela turbulencije u neposrednoj blizini zida. Udaljenost prve ćelije od zida za točan opis viskoznošnjog podsloja ovisi i o brzini fluida, te kinematskoj viskoznosti fluida. Navedeno se može uskladiti pomoću teoretskog opisa hidrauličkog podsloja (engl. *law of the wall*). On nas navodi da za sve ćelije indikator relativne udaljenosti prve ćelije od zida se treba nalaziti rasponu  $30 < y^+ < 300$  (von Kármán, 1930). Pomoću navedena dodana tri sloja je  $y^+$  zadržan unutar potrebnog raspona u cijeloj domeni modela kako bi se modeli turbulencije mogli precizno rješavati. Trajanje numeričkih modela odgovara vrijednosti u iznosu od 200 s, što se smatra zadovoljavajuće jer je unutar tog vremena postignuto hidrodinamički stacionarno stanje za svaki provedeni test protjecanja morske vode kroz propust.

U svrhu validacije modela s analitičkim modelom predstavljenim jednadžbom (9) testirati će se niz slučajeva s jednim propustom kružnog poprečnog presjeka s dubinom variranom od 0,5 m do 1,2 m s diskretizacijom po 0,1 m (mjereno od dna propusta promjera 1 m) u kombinaciji s 5 različitih  $\Delta H$  koji iznose 0,001 m, 0,002 m, 0,005 m, 0,01 m, 0,02 m (sveukupan broj testova za validaciju iznosi 40) (Tablica 11). Testovi su se provodili za propust duljine 10 m. Unutar numeričkog modela zadala se apsolutna hrapavost jednaka za sve testove u iznosu 0,005 m što odgovara grubom betonu, a pomoću jednadžbe (44) se može odrediti ekvivalent u obliku Manningovog koeficijenta hrapavosti koji se koristi unutar analitičkog modela u iznosu od  $0,016 \text{ s/m}^{1/3}$ . Hidraulički radijus ( $R_{pr}$ ) i površina protjecajnog poprečnog presjeka ( $A_{pr}$ ) korištenog unutar analitičkog modela je usklađena s razinom vode koja se modelira unutar numeričkog modela.

Tablica 11 Testovi za validaciju numeričkog modela s obzirom na tečenje kroz propust uslijed plimnih oscilacija

Broj testa	$\Delta H$ (m)	$L_{pr}$ (m)	$R_{pr}$ (m)	$A_{pr}$ (m)	$h_{pr}$ (m)
1	0,020	10	0,250	0,78	1,2
2	0,010	10	0,250	0,78	1,2
3	0,005	10	0,250	0,78	1,2
4	0,002	10	0,250	0,78	1,2
5	0,001	10	0,250	0,78	1,2
6	0,020	10	0,250	0,78	1,1
7	0,010	10	0,250	0,78	1,1
8	0,005	10	0,250	0,78	1,1
9	0,002	10	0,250	0,78	1,1
10	0,001	10	0,250	0,78	1,1
11	0,020	10	0,250	0,78	1,0
12	0,010	10	0,250	0,78	1,0
13	0,005	10	0,250	0,78	1,0
14	0,002	10	0,250	0,78	1,0
15	0,001	10	0,250	0,78	1,0
16	0,020	10	0,298	0,78	0,9
17	0,010	10	0,298	0,78	0,9
18	0,005	10	0,298	0,78	0,9
19	0,002	10	0,298	0,78	0,9
20	0,001	10	0,298	0,78	0,9
21	0,020	10	0,304	0,78	0,8
22	0,010	10	0,304	0,78	0,8
23	0,005	10	0,304	0,78	0,8
24	0,002	10	0,304	0,78	0,8
25	0,001	10	0,304	0,78	0,8
26	0,020	10	0,296	0,78	0,7
27	0,010	10	0,296	0,78	0,7
28	0,005	10	0,296	0,78	0,7
29	0,002	10	0,296	0,78	0,7
30	0,001	10	0,296	0,78	0,7
31	0,020	10	0,278	0,78	0,6
32	0,010	10	0,278	0,78	0,6
33	0,005	10	0,278	0,78	0,6
34	0,002	10	0,278	0,78	0,6
35	0,001	10	0,278	0,78	0,6
36	0,020	10	0,250	0,78	0,5
37	0,010	10	0,250	0,78	0,5
38	0,005	10	0,250	0,78	0,5
39	0,002	10	0,250	0,78	0,5
40	0,001	10	0,250	0,78	0,5

U svrhu testiranja protjecanja morske vode kroz razna oblikovanja grupe propusta (Slika 31) uslijed plimnih oscilacija, provest će se niz testova s potpuno uronjenom grupom propusta (W1) i djelomično uronjenom grupom propusta (W2) (Tablica 12). Zadavat će se visinska razlika između površine mora dva rezervoara koja spaja propust u iznosu od 0,001 m, 0,002 m i 0,005 m. Testovi se odnose na grupe propusta duljine 10 m i unutarne apsolutne hrapavosti u iznosu od 0,005 m što odgovara grubom betonu. Rezultati provedenih ispitivanja će se predstaviti u okviru poglavlja 5.5.3.

Tablica 12 Testovi za ispitivanje numeričkog modela grupe propusta s obzirom na tečenje kroz propust uslijed plimnih oscilacija

Grupa propusta	Broj testa	$\Delta H$ (m)	$L_{pr}$ (m)	$A_{pr}$ (m)	Razina vode
Grupa propusta (a)	1	0,005	10	3,14	W1
	2	0,002	10	3,14	W1
	3	0,001	10	3,14	W1
	4	0,005	10	3,14	W2
	5	0,002	10	3,14	W2
	6	0,001	10	3,14	W2
Grupa propusta (b)	7	0,005	10	6,28	W1
	8	0,002	10	6,28	W1
	9	0,001	10	6,28	W1
	10	0,005	10	6,28	W2
	11	0,002	10	6,28	W2
	12	0,001	10	6,28	W2
Grupa propusta (c)	13	0,005	10	5,50	W1
	14	0,002	10	5,50	W1
	15	0,001	10	5,50	W1
	16	0,005	10	5,50	W2
	17	0,002	10	5,50	W2
	18	0,001	10	5,50	W2
Grupa propusta (d)	19	0,005	10	13,75	W1
	20	0,002	10	13,75	W1
	21	0,001	10	13,75	W1
	22	0,005	10	13,75	W2
	23	0,002	10	13,75	W2
	24	0,001	10	13,75	W2
Grupa propusta (e)	25	0,005	10	3,14	W1
	26	0,002	10	3,14	W1
	27	0,001	10	3,14	W1
	28	0,005	10	3,14	W2
	29	0,002	10	3,14	W2
	30	0,001	10	3,14	W2

#### **4.4.3.4 Sonda za mjerenje protoka unutar numeričkog modela**

Protok kroz numerički model se ostvaruje kao posljedica rubnih uvjeta po otvorenim granicama, te se shodno tome u presjeku propusta bilježi protjecanje mora. Validirani numerički model će se koristiti kako bi se mogao definirati protok uzrokovan plimnim oscilacijama kroz propust po pojedinom oblikovanju grupe propusta. Predefinirana mjerna ploha koja će biti pozicionirana unutar propusta će omogućiti određivanje protoka morske vode koji protječe kroz grupu propusta kroz vrijeme (Slika 38).



## 4.5 Statistički indikatori

Kroz pregled rezultata će se koristiti nekoliko statističkih indikatora koji ukazuju na razlike između vrijednosti koje predviđa model i opservirane diskretne vrijednosti koja se pokušava aproksimirati modelom. Statistički indikatori se mogu matematičkom formulacijom prezentirati na slijedeći način:

- Nепrotumačeni zbroj kvadrata, SSE (engl. *sum of squared errors*)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (45)$$

- Koeficijent determinacije,  $R^2$  (engl. *coefficient of determination*)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (46)$$

- Korijen srednje kvadratne pogreške, RMSE (engl. *root-mean-square error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n}} \quad (47)$$

# 5

## OBRADA PODATAKA I REZULTATI

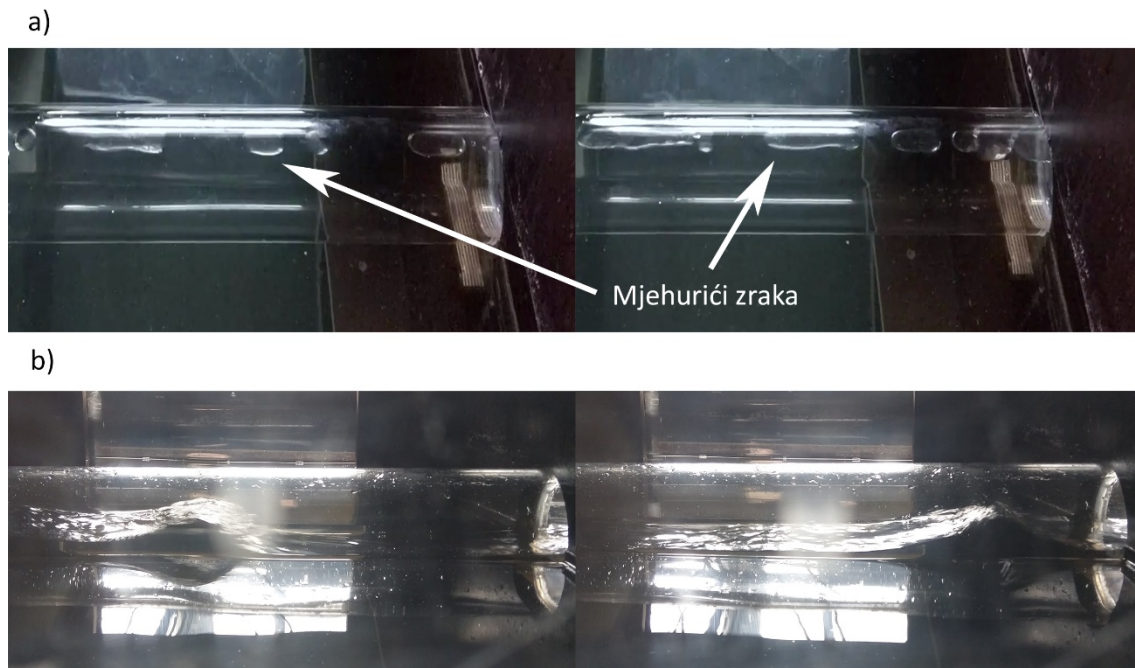
### 5.1 Laboratorijska ispitivanja

Laboratorijska mjerenja provedena u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu, omogućila su podatke o transmisiji valne energije kroz propust u točki i brzini vode na izlazu iz propusta pod utjecajem monokromatskih i spektralnih valova (Slika 18). Analizirajući podatke mjerene u laboratorijskim uvjetima, donijet će se zaključci vezani za rezultate testova pod utjecajem spektralnih valova, a rezultati vezani za monokromatske valove će se koristiti u narednoj analizi u okviru numeričkog modela valovanja koji će se prezentirati u poglavlju 5.4. Opis fizičkog modela lukobrana s ugrađenim propustom i testova koji su provedeni u okviru eksperimentalnih ispitivanja prezentirani su u poglavlju 4.1.1 i 4.1.2.

### 5.1.1 Transmisija valne energije uzrokovana spektralnim valovima

U akvatorij kroz propust pod utjecajem incidentnog valnog polja se transmitira valna energija. Transmitirani val se trenutno difraktira ulaskom u akvatorij iz propusta, stoga količina valne energije opada kako se mjesto opažanja prostorno udaljava od izlaza iz propusta, što je u skladu sa opažanjima u prijašnjim istraživanjima (Tsoukala *i ostali*, 2014). U okviru analize količine valne energije koja se transmitira u akvatorij po pojedinoj valnoj situaciji, promatrat će se određene lokacije unutar navedenog valnog polja na kojima su postavljane sonde. Prikaz postavljenih sondi G1 – G8 predstavljen je u poglavlju 4.1.3 (Slika 15).

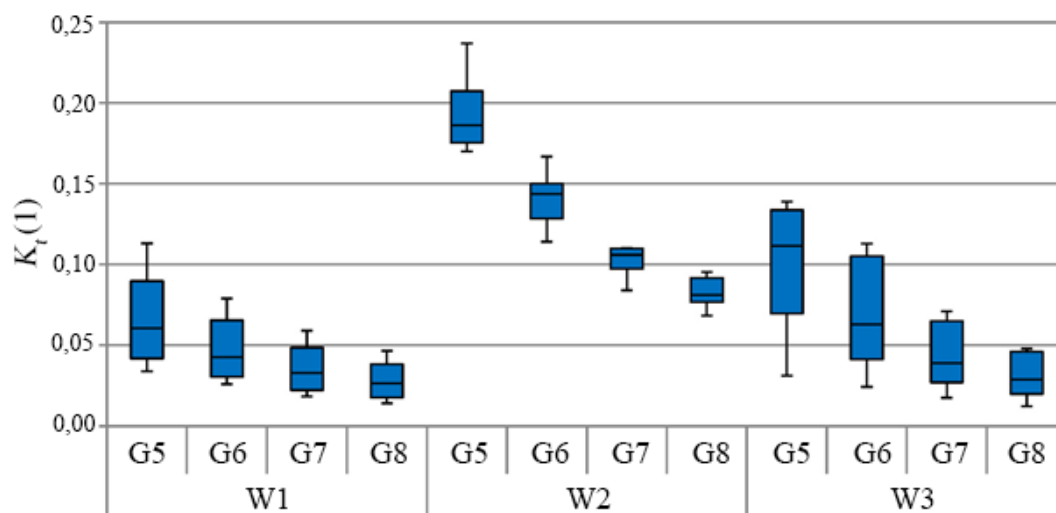
Tijekom udara valova na model lukobrana, ovisno o odnosu srednje razine vode i propusta mogu se razlikovati 3 značajno drukčija oblika strujanja vode kroz propust (Slika 41). U slučaju kada srednja razina vode odgovara gornjem rubu propusta (W1), na vrhu cijevnog propusta formiraju se manji mjehuri zraka na vrhu propusta koji se oscilatorno gibaju u smjeru pružanja propusta s neto smjerom gibanja u smjeru akvatorija (a) na Slika 41).



Slika 41 Fotografija dinamike pronosa valne energije za situacije gdje je: a) propust kružnog poprečnog presjeka u potpunosti potopljen (W1), b) propust kružnog poprečnog presjeka djelomično potopljen (W2)

Ako je propust visinski pozicioniran tako da srednja razina vode odgovara osi propusta (W2), tada se unutar propusta formiraju manji valovi koji se transmitiraju u akvatorij (b) na Slika 41). Posljednji slučaj kada je srednja razina vode pri dnu propusta (W3), pod utjecajem valova stvaraju se mlazovi vode koji se kreću po dnu propusta prije ulaska u sam akvatorij.

Promatrajući vremensku seriju zabilježenih razina površine vode koristeći se mjernim sondama G5, G6, G7 i G8 (Slika 15), mogu se uočiti najveći koeficijenti transmisije u slučaju djelomično uronjenog propusta (W2) (Slika 42). Slučaj u kojem je propust djelomično uronjen (W2) ostvaruje 2-3 puta veće koeficijente transmisije nego što je to slučaj za potpuno uronjen propust (W1) i neuronjen propust (W3) za ispitane valove (Slika 42). Na mjernoj sondi G5 za djelomično uronjeni propust se u prosjeku uočavaju najveći koeficijenti transmisije što je očekivano jer se radi o sondi koja je prostorno najbliže izlazu iz propusta. Prosječne vrijednosti koeficijenta transmisije očekivano opadaju kako se mjerna pozicija pojedine sonde udaljava od izlaza iz propusta. Ovaj proces smanjenja valne visine iza cijevi je vrlo sličan smanjenju valne visine uslijed difrakcije kroz otvor kod monokromatskih valova (Johnson, 1952) što je također istraženo u prethodnim istraživanjima za propuste u okviru slučaja kada nema interakcije između gornjeg ruba propusta i grebena vala (Belibassakis *i ostali*, 2014), a nadalje će se istražiti u okviru ovog rada za razne grupe propusta.



Slika 42 Koeficijenti transmisije energije valova ( $K_t$ ) kroz propust na sondama G5 – G8, za razine vodnog lica W1, W2 i W3 (promjer propusta kružnog poprečnog presjeka iznosi 10 cm i dužina propusta 92 cm); (Carević *i ostali*, 2018)

Uvodi se fluks parametar koji se definira pomoću sljedeće formulacije:

$$FP = A \frac{L_p}{L_{pr}} D_{pr}^2 H_{s-i}^2 \quad (48)$$

gdje je  $A$  koeficijent gubitka energije ( $m^{-4}$ ),  $L_p$  valna dužina,  $L_{pr}$  dužina propusta,  $D_{pr}$  promjer propusta kružnog poprečnog presjeka,  $H_{s-i}$  valna visina incidentnog vala na lukobran. Koeficijent gubitka  $A$  dolazi u rasponu  $[0,1]$  i opisuje gubitke energije unutar cijevi kao što su trenje s unutrašnjim stjenkama propusta i drugim pregradama/preprekama unutar cijevi. Ne postoje objavljene preporuke za koeficijent  $A$ , stoga je za potrebe ove analize koeficijent određen na vrijednost 1.

Na osnovu provedenih laboratorijskih ispitivanja definirane su sljedeće empirijske jednadžbe za određivanje koeficijenata transmisije za tri različite razine mora u odnosu na visinsku poziciju propusta ( $W1$ ,  $W2$  i  $W3$ ) u slučajevima kada postoji interakcija između valnog profila i gornjeg ruba propusta, te vrijedi ( $H_{s-i}/D_{pr} \geq 0,8$ ) (crtkane linije na Slika 43) (Carević i ostali, 2018):

$$K_t = 0,711 \cdot FP^{0,316} \quad (49)$$

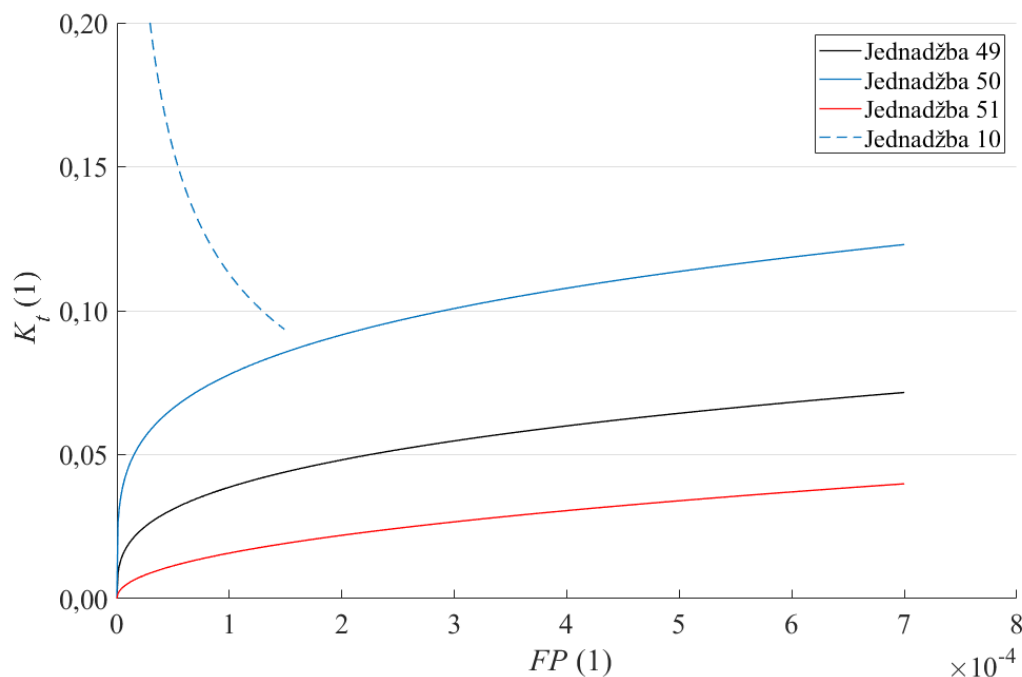
$$K_t = 0,678 \cdot FP^{0,235} \quad (50)$$

$$K_t = 1,257 \cdot FP^{0,475} \quad (51)$$

gdje je  $K_t$  koeficijent transmisije valne energije kroz propust dobiven je kao omjer između značajne valne visine mjerene u jednoj točki (sonda G6 prema Slika 15) i značajne valne visine incidentnog vala, te  $FP$  fluks parametar. Koeficijenti transmisije valne energije proračunati pomoću jednadžbi (49), (50) i (51) se odnose na točku na poziciji približno 1,8 m iza kraja propusta (u prirodnom mjerilu), te se očekuju veće valne visine ukoliko se pozicija opažanja približava kraju propusta i manje valne visine udaljavanjem od kraja propusta. Iz perspektive funkcionalnosti akvatorija zaštićenog pomoću lukobrana, najpovoljnije je koristiti potpuno uronjeni propust zbog malih vrijednosti ostvarenih koeficijenata transmisije, dok propusti koji su potpuno izronjeni nisu funkcionalni jer ne omogućuju protjecanje pod utjecajem drugih generatora poput plimnih oscilacija (Slika 43). U slučaju jednadžbe (10) proračunati koeficijent transmisije se odnosi na srednju vrijednost koeficijenta transmisije, koja je dobivena kao srednja vrijednost na tri pozicije iza propusta (Tsoukala i Moutzouris, 2009b).

Promatrajući samo slučaj djelomično uronjenog propusta (W2), bitno se razlikuju propusti koji imaju gornji rub (ploču, vrh cijevi ili neku drugu konstrukciju) i oni koji ga nemaju jer gornji rub propusta potencijalno može uzrokovati reakciju na putujući valni profil. Kod propusta koji imaju gornji rub može se izvršiti podjela na propuste kod kojih su valne visine značajno veće od visine propusta što se karakterizira omjerom  $H_{s-i}/D_{pr} \geq 0,8$ , odnosno  $H_{s-i}/h_{pr} \geq 0,8$  te valne visine kod kojih su valovi mali u odnosu na visinu propusta  $H_{s-i}/D_{pr} < 0,8$ , odnosno  $H_{s-i}/h_{pr} < 0,8$ . Prethodni se mogu opisati pomoću koeficijenata transmisije proračunatima prema jednadžbi (10) navedenoj u okviru pregleda stanja znanja o penetraciji valne energije kroz propuste, poglavlja 2.4.2 (crtkana linija na Slika 43).

Laboratorijska ispitivanja provedena u svrhu formiranja jednadžbe (10) obuhvaćaju samo slučajeve kada nema interakcije između vala i vrha propusta (Tsoukala i Moutzouris, 2009b). U slučaju valne situacije za koju vrijedi  $H_{s-i}/D_{pr} \geq 0,8$ , disipacija valne energije na školjeri oko ulaza u cijev je velika jer grebeni pojedinih valova sežu do visine iznad gornjeg ruba konstrukcije propusta te se disipiraju u interakciji s kamenom školjerom. Kod valova za koje vrijedi  $H_{s-i}/D_{pr} < 0,8$ , većina valova ulazi u cijev bez značajne disipacije energije na ulazu te se stoga ostvaruju veći koeficijenti transmisije.

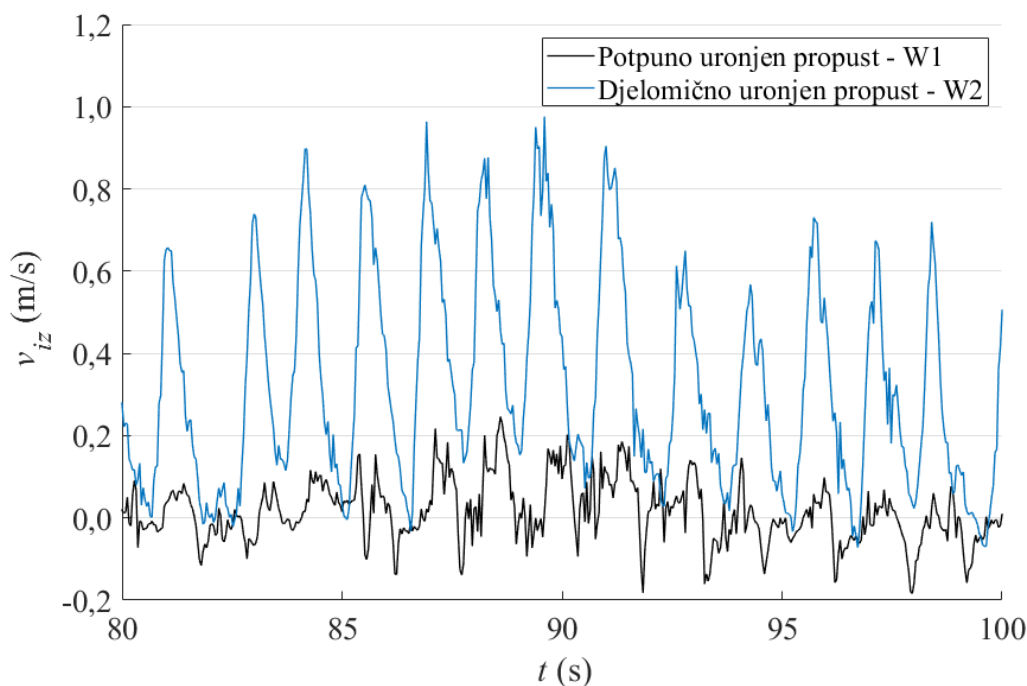


Slika 43 Krivulje koeficijenata transmisije ( $K_t$ ) za slučajeve pločastih i cijevnih samostalnih propusta ugrađenih u tijelo lukobrana prema uronjenosti propusta (W1, W2 i W3) (Carević i ostali, 2018)

Shodno trendu krivulja koje opisuju koeficijent transmisije  $K_t$  za različite odnose razine vodnog lica s obzirom na propust i  $FP$  parametra definiranog jednačinom (48), može se zaključiti kako rastom vrijednosti valne dužine i visine incidentnog vala, te rastom površine poprečnog presjeka propusta, raste količina transmitirane energije kroz propust u zaštićeni akvatorij. Jedino u slučaju rasta dužine propusta se može očekivati pad koeficijenta transmisije valne energije zbog povećanih gubitaka uslijed trenja duž cijevi.

### 5.1.2 Brzine uzrokovane spektralnim valovima

Brzina na izlazu iz propusta se mjerila pomoću ADV uređaja kako je opisano u poglavlju 4.1.3. Zbog ograničenja mjernog uređaja čije zrake se u potpunosti moraju nalaziti unutar jedne faze, nisu se mogla pouzdano obaviti mjerenja brzine vode na izlazu iz propusta za slučaj gdje je srednja razina vode pri donjem rubu propusta (W3). Stoga će se u nastavku analizirati situacija gdje je srednja razina vode pri gornjem rubu propusta (W1) i pri osi propusta (W2).

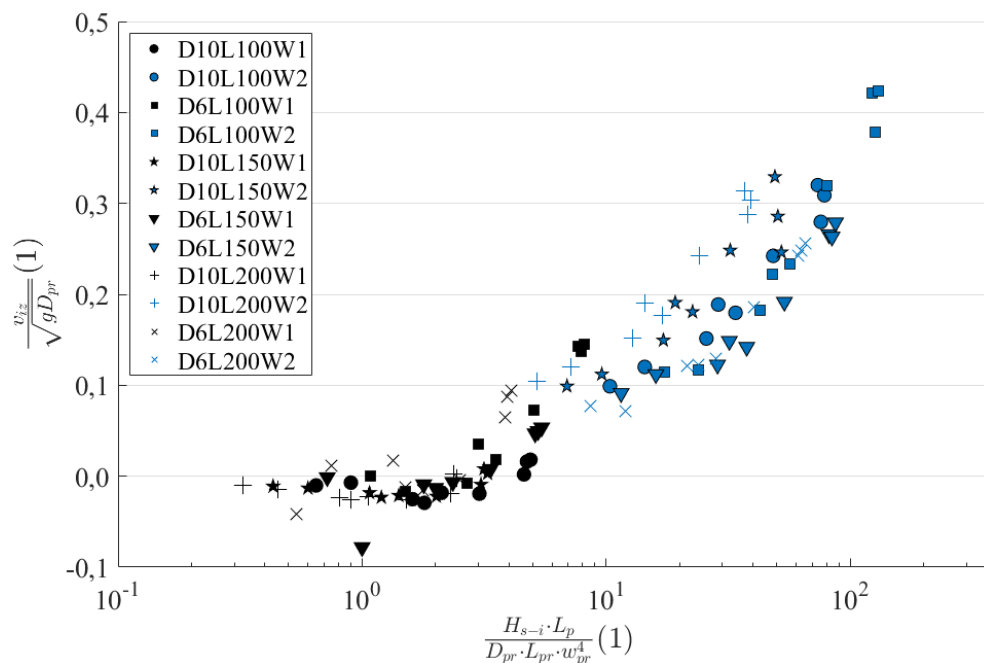


Slika 44 Vremenska serija mjerene brzine ( $v_{iz}$ ) pomoću ADV uređaja na izlazu iz propusta; prikazana je vrijednost komponente vektora brzine koja je paralelna smjeru pružanja propusta; prikaz mjernih vrijednosti za test 6 (Tablica 7) za potpuno uronjen propust (W1) i djelomično uronjen propust (W2); pozitivna vrijednost smjera označava ulazak u zaštićeni akvatorij kroz propust, a negativna izlazak (Bujak i ostali, 2017)

Jednako kao u slučaju opažanja transmisije energije valova kroz propust, uočava se snažan utjecaj odnosa srednje razine vode i visinskog položaja propusta. Slučaj gdje je srednja razina vode pri osi cijevi (W2), ostvaruju se značajno veće brzine na izlazu iz propusta u odnosu na slučaj gdje je srednja razina pri gornjem rubu propusta (W1) (Slika 44). U oba slučaja se uočava oscilatorni karakter mjerene brzine. Ako se promatra vremenska serija brzine za slučaj uronjenog propusta (W1), nema značajnog kretanja vode, već se ona kreće oko 0 m/s. Uronjeni propust djeluje poput prigušivača za valove, zbog čega se uočava značajno manja transmisija valne energije i manje vrijednosti brzine vode na izlazu iz propusta. Za djelomično uronjeni propust (W2) srednja brzine na izlazu iz propusta usmjerena je prema akvatoriju.

### 5.1.2.1 Srednja brzina vode na izlazu iz propusta

Koristeći se Buckinghamovim  $\pi$  teoremom dimenzijske analize varijabli koje utječu na brzinu tekućine na izlazu iz propusta, definirano je 5  $\pi$  grupa (Bujak *i ostali*, 2017). Iz toga slijedi da rastom parametara vala (valna visina i valna dužina) raste brzina vode koja se ostvaruje na izlazu iz propusta. Dok rastom četvrte i pete  $\pi$  grupe ( $L_{pr}/D_{pr}$  i  $w_{pr}$ ) opada vrijednost brzine vode na izlazu iz propusta. Navedeno ukazuje kako povećanjem vrijednosti dužine propusta i koeficijenta uronjenosti opada brzina koja se ostvaruje na izlazu iz propusta.



Slika 45 Odnos zajedničke bezdimenzijske varijable sačinjene od druge, treće, četvrte i pete  $\pi$  grupe naspram prve  $\pi$  grupe koja sadrži srednju brzinu; Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta, W – razina vode; (Bujak *i ostali*, 2017)



Shodno provedenim analizama o utjecaju pojedine  $\pi$  grupe na brzinu koja se ostvaruje na izlazu iz propusta, definirana je sljedeća relacija koja opisuje njihov odnos (Slika 45):

$$v_{iz,sr} = \sqrt{gD_{pr}} \left( 0,097 \left( \frac{H_{s-i} L_p}{D_{pr} L_{pr} w_{pr}^4} \right)^{0,34} - 0,11 \right) \quad (52)$$

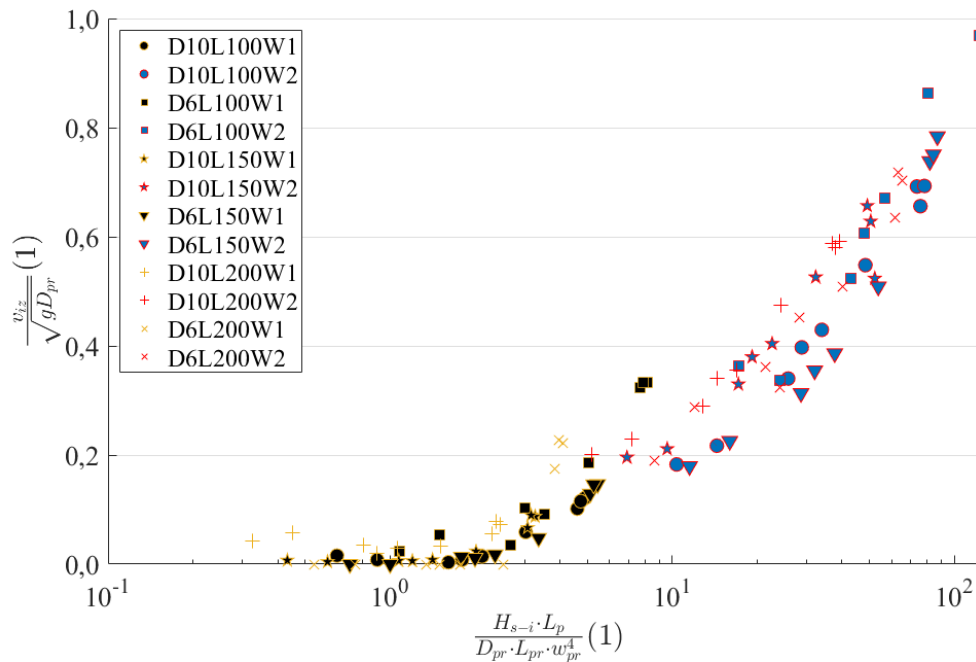
gdje je  $v_{iz,sr}$  komponenta srednjeg vektora brzine na izlazu iz propusta paralelna s propustom,  $H_{s-i}$  značajna valna visina incidentnog vala,  $L_p$  vršna valna dužina incidentnog vala,  $L_{pr}$  dužina propusta,  $D_{pr}$  promjer propusta,  $g$  gravitacijska konstanta,  $w_{pr}$  koeficijent uronjenosti koji je definiran udjelom uronjene površine poprečnog presjeka propusta.

Jednadžba (52) daje mogućnost proračuna srednje brzine vode na izlazu iz propusta uzrokovane valovima uz poznavanje vrijednosti incidentne valne visine, valne dužine, dužine propusta i uronjenosti propusta. Formulacija vrijedi u rasponu srednjih razina vodnog lica za koje su ispitivanja provedena, dakle za vrijednosti uronjenosti  $0,5 \leq w_{pr} \leq 1$ .

### **5.1.2.2 Maksimalne brzine vode na izlazu iz propusta**

U okviru laboratorijskih istraživanja na fizikalnim modelima opažena je pojava mlaza vode s lučke strane propusta koji je najizraženiji pri razini vode W3 te se smanjuje kako razina raste prema W1. Može se očekivati da doseg mlaza u slučaju razine W3 bude i do 2 m iza cijevi pri najdužim valovima (računajući u prirodnom mjerilu). Plovila privezana uz propust pri ovakvim situacijama mogu biti ugrožena od djelovanja mlaza, odnosno velikih brzine strujanja ostvarenih kroz utjecaj valova.

Jednakom metodom koristeći se Buckinghamovim  $\pi$  teoremom dimenzijske analize varijabli kako je prikazano u poglavlju 5.1.2.1, odnosno u publiciranom radu (Bujak i ostali, 2017), predstaviti će se odnos između maksimalnih brzina prema parametrima vala i geometrijskim karakteristikama propusta. Za maksimalnu brzinu će se uzeti 0,9 kvantil vremenske serije brzine, što znači da je 90% svih podataka u pojedinoj vremenskoj seriji manje od navedene vrijednosti za istu vremensku seriju. Odnosi parametara vala i geometrijskih karakteristika propusta prema maksimalnoj brzini su jednaki kako je opisano u okviru poglavlja 5.1.2.1.



Slika 46 Odnos zajedničke bezdimenzijske varijable sačinjene od druge, treće, četvrte i pete  $\pi$  grupe naspram prve  $\pi$  grupe koja sadrži maksimalnu brzinu ( $v_{iz,0,9}$  kvantil); Legenda: D – promjer propusta, L – duljina propusta, W – razina vode

Shodno provedenim analizama o utjecaju pojedine  $\pi$  grupe na brzinu koja se ostvaruje na izlazu iz propusta, definirana je sljedeća relacija koja opisuje njihov odnos (Slika 46):

$$v_{iz,max} = \sqrt{gD_{pr}} \left( 0,066 \left( \frac{H_{s-i} L_p}{D_{pr} L_{pr} w_{pr}^4} \right)^{0,60} - 0,04 \right) \quad (53)$$

gdje je  $v_{iz,max}$  komponenta maksimalnog vektora brzine na izlazu iz propusta paralelna s propustom,  $H_{s-i}$  značajna valna visina incidentnog vala,  $L_p$  vršna valna dužina incidentnog vala,  $L_{pr}$  dužina propusta,  $D_{pr}$  promjer propusta,  $g$  gravitacijska konstanta,  $w_{pr}$  koeficijent uronjenosti koji je definiran omjerom visinske udaljenosti između razine vode i donjeg ruba propusta naspram promjeru propusta.

### 5.1.3 Transmisija valne energije uzrokovane monokromatskim valovima

Rezultati laboratorijskih ispitivanja utjecaja incidentnih monokromatskih valova dobivenih u obliku koeficijenata transmisije mjerene sondama (G5 – G8, prikazane na Slika 15) unutar zaštićenog akvatorija, koristit će se za validaciju numeričkog modela za valove u okviru poglavlja 5.4. Za proračun valnih visina ( $i$  zatim koeficijenata transmisije) nije se obavljala separacija incidentnih i reflektiranih valova, već će se situacija reflektirajućih bočnih zidova i pasivnog umirivača energije na kraju kanala rekreirati unutar numeričkog modela za validaciju. U okviru numeričkih simulacija korišteni su monokromatski valovi umjesto spektralnih valova kako bi se smanjilo potrebno vrijeme simulacije. Kako bi se dobio reprezentativan uzorak, za spektralne valove je potrebno znatno veće trajanje simulacije (> 100 dana) nego za monokromatske valove (~ 10 dana).

Mjerenja transmisije valne energije kroz propust će se nadalje prikazati u tabličnom obliku (Tablica 13). Prikazani rezultati se odnose na testove monokromatskim valovima koji su prikazani u okviru poglavlja 4.1.2 (Tablica 8).

Tablica 13 Rezultati laboratorijskih ispitivanja u slučaju nailaska monokromatskih valova koji uključuju koeficijente transmisije bez separacije incidentnih i reflektiranih valova

Test	$H_i$ (m)	$L$ (m)	$T$ (s)	$H_{i,mj}$ (m)	$K_{t,G5}$ (1)	$K_{t,G6}$ (1)	$K_{t,G7}$ (1)	$K_{t,G8}$ (1)	Razina
1	0,09	1,80	1,07	0,117	0,091	0,072	0,059	0,055	W1
2	0,09	2,70	1,32	0,107	0,111	0,101	0,082	0,082	W1
3	0,12	1,20	0,88	0,119	0,087	0,069	0,042	0,047	W1
4	0,12	2,40	1,24	0,126	0,091	0,057	0,054	0,054	W1
5	0,09	1,80	1,07	0,096	0,201	0,190	0,172	0,182	W2
6	0,09	2,70	1,32	0,098	0,286	0,255	0,223	0,163	W2
7	0,12	1,20	0,88	0,113	0,182	0,177	0,146	0,114	W2
8	0,12	2,40	1,24	0,124	0,311	0,201	0,198	0,147	W2

### 5.1.4 Brzina uzrokovana monokromatskim valovima

Vrijednosti srednjih brzina na izlazu iz propusta mjerene ultrazvučnom sondom (ADV, prikazane na Slika 15) unutar zaštićenog akvatorija, koristit će se za validaciju numeričkog modela za valove u okviru poglavlja 5.4. Rezultati testova su prikazani u tabličnom obliku (Tablica 14).

Tablica 14 Rezultati laboratorijskih ispitivanja u slučaju nailaska monokromatskih valova koji uključuju srednje brzine na izlazu iz propusta

Test	$H_i$ (m)	$L$ (m)	$T$ (s)	$H_{i,mj}$ (m)	$v_{iz}$
1	0,09	1,80	1,07	0,117	-0,038
2	0,09	2,70	1,32	0,107	0,005
3	0,12	1,20	0,88	0,119	-0,037
4	0,12	2,40	1,24	0,126	0,008
5	0,09	1,80	1,07	0,096	0,273
6	0,09	2,70	1,32	0,098	0,311
7	0,12	1,20	0,88	0,113	0,238
8	0,12	2,40	1,24	0,124	0,353

## **5.2 Terenska ispitivanja**

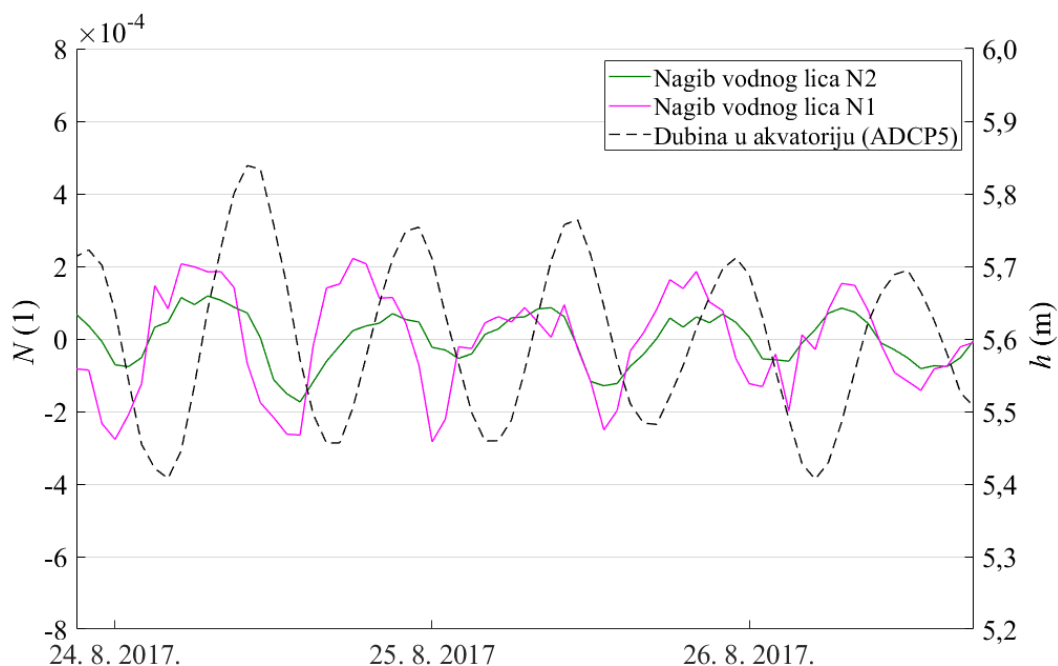
Mjerenja na terenu provedena u ACI marini Opatija, omogućuju uvid u funkcionalnost propusta za učinkovitiju izmjenu morske vode. Prezentirana terenska mjerenja prikazuju funkcionalnost za specifični slučaj oceanografskih uvjeta (plimnih oscilacija (opisano u poglavlju 5.2.1.1), vjetra (opisano u poglavlju 5.2.1.2), valova (opisano u poglavlju 5.2.1.3), podmorskih slatkovodnih izvora (opisano u poglavlju 5.2.1.4)) koji se mogu pojaviti na lokaciji. Rezultati terenskih mjerenja su prezentirani u okviru poglavlja 5.2.

### **5.2.1 Generatori cirkulacije**

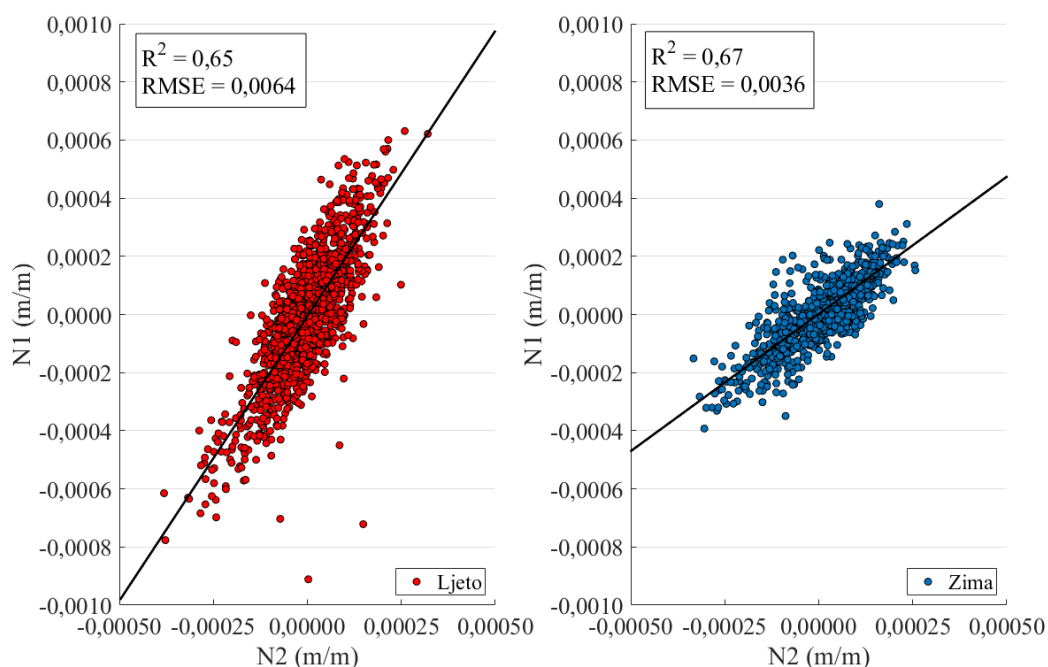
#### **5.2.1.1 Plimne oscilacije**

U svrhu istraživanja utjecaja plimnih oscilacija na cirkulaciju mora kroz propust, najprije se analizira nagib vodnog lica između ADCP1 i ADCP2 (kroz propust, nagib razine mora N1) koji je izveden koristeći se vremenskim serijama dubine zabilježene na lokacijama ADCP-ova prema metodi opisanoj u okviru poglavlja 4.2.2 (Bujak *i ostali*, 2018) (Slika 49). Ako se promatra promjena dubine mora u vremenu unutar akvatorija, izvedena vremenska serija nagiba je usklađena s očekivanim (Slika 47). Primjerice, ukoliko se dubina unutar akvatorija spušta zbog oseke, onda je nagib površine mora uspostavljen tako da vodno lice raste od ADCP1 prema ADCP2. Nadalje, nagibi površine mora koji su zabilježeni između ADCP5 i ADCP2 (unutar akvatorija, nagib razine mora N2) prate u vremenu nagibe površine mora koji su evidentirani kroz propust (Slika 48). Rast vrijednosti nagiba površine mora unutar akvatorija prati rast površine mora kroz propust ugrađen kroz lukobran.

Ako se pretpostavi da more cirkulira od pozicije više razine površine mora prema poziciji niže razine površine mora, može se formirati očekivani smjer cirkulacije vode unutar akvatorija i kroz propust (Slika 49) (Bujak *i ostali*, 2018). Može se uočiti kako na poziciji unutar akvatorija (ADCP5) koja je bitno bliže lokaciji propusta je dominantno pod utjecajem ulaza u marinu. Tijekom plime, razina površine mora brže raste na poziciji unutar akvatorija (ADCP5) nego na poziciji pored propusta (ADCP2) iako je pozicija pored propusta (ADCP2) očigledno znatno bliža propustu nego pozicija unutar akvatorija (ADCP5). Navedeno se ostvaruje upravo zbog snažnijeg utjecaja udaljenog ulaza u odnosu na bliži propust na dizanje razine površine mora tijekom plima.



Slika 47 Vremenska serija dubine ( $h$ ) unutar akvatorija ACI marine Opatija mjerene pomoću ADCP 5 i nagiba razine vodnog lica koji se ostvaruje kroz propust ( $NI$ ); pozitivna vrijednost nagiba  $NI$  uzrokuje ulazak morske vode u akvatorij, a negativna vrijednost nagiba  $NI$  izlazak iz akvatorija (Slika 49)



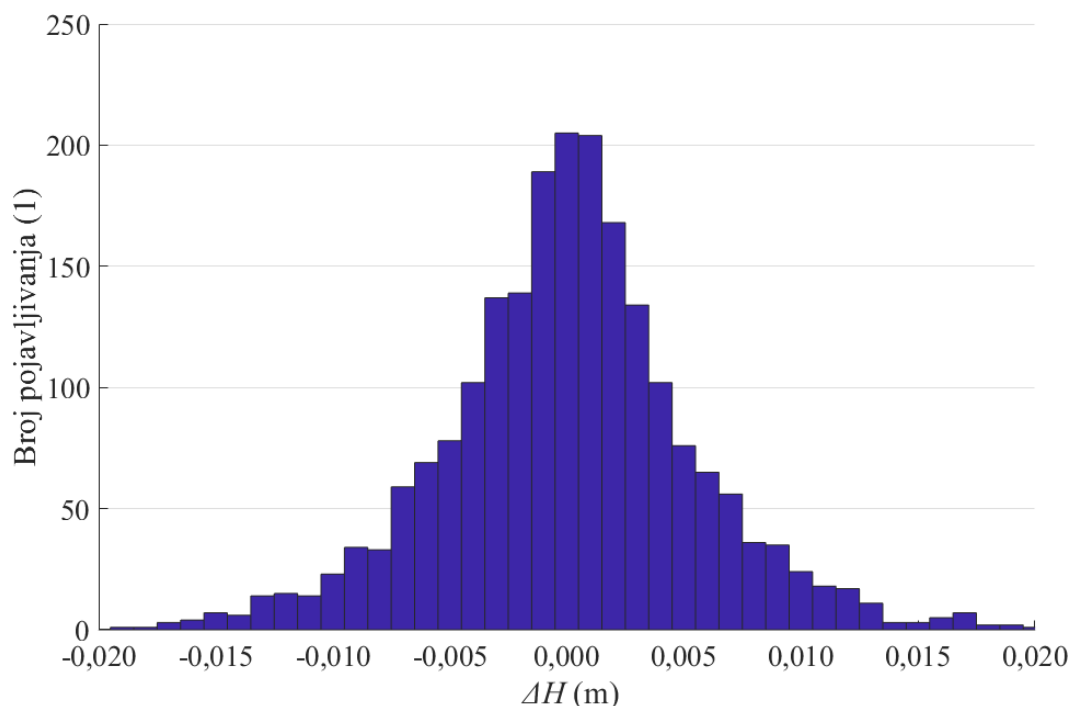
Slika 48 Usporedba nagiba koji se ostvaruje između ADCP 2 i ADCP 5 ( $N2$ )(unutar akvatorija), te ADCP 1 i ADCP 2 ( $NI$ )(kroz propust); pozitivna vrijednost nagiba uzrokuje ulazak morske vode u akvatorij, a negativna vrijednost nagiba izlazak iz akvatorija (Bujak *i ostali*, 2018)



Slika 49 Očekivani smjer cirkulacije mora za vrijeme plime i oseke ustanovljen na temelju informacije o nagibima, ako nisu prisutni ostali prirodni generatori cirkulacije koji mogu utjecati na sliku (Bujak i ostali, 2018)

Jednaka dinamika u obrnutom smjeru je uočena tijekom oseke (Slika 49). Također je uočeno da ulaz u marinu ima veći utjecaj na razinu površine mora pri lokaciji ADCP5 uređaja, iako je ADCP5 znatno udaljeniji od ulaza u marinu nego od propusta.

Ako se satne vrijednosti nagiba površine mora kroz propust (N1) pomnože s udaljenošću između ADCP1 i ADCP2 proračunaju se vrijednosti visinske razlike površine mora između akvatorija i vanjskog mora. Ako se visinske razlike površine mora raspodjele prema razredima, može se uvidjeti da se radi o normalnoj raspodjeli što se podudara s očekivanjima, koja govore o otprilike jednakoj prisutnosti nagiba koji stvaraju utjecanje i istjecanje tijekom mjernih razdoblja povodom plimnih oscilacija (Slika 50). Negativne vrijednosti visinske razlike površine mora govore o situaciji kada morska voda istječe iz akvatorija kroz propust, a pozitivne vrijednosti visinske razlike površine mora ukazuju na utjecanje morske vode u akvatorij kroz propust. Medijan i srednja vrijednost svih visinskih razlika koje su se pojavile su blago negativne vrijednosti što govori o tendenciji istjecanja kroz propust tijekom mjernih razdoblja (Tablica 15). Navedeno se podudara s mjerenim vrijednostima protoka unutar propusta koristeći se PCM uređajem koji pokazuje dominantno istjecanje iz akvatorija kroz propust tijekom ukupnog mjernog razdoblja (Slika 54). Ukoliko uzmemo u obzir medijan apsolutnih vrijednosti visinskih razlika površina mora koji se pojavljuje tijekom mjernih razdoblja, odredit ćemo relevantnu vrijednost visinske razlike za ACI marini Opatija koja je bila najdominantnija tijekom mjernog razdoblja (Tablica 15).



Slika 50 Raspodjela mjerenih visinskih razlika razina mora ( $\Delta H$ ) između dviju strana propusta koji se pojavljuje tijekom ljeta i zime

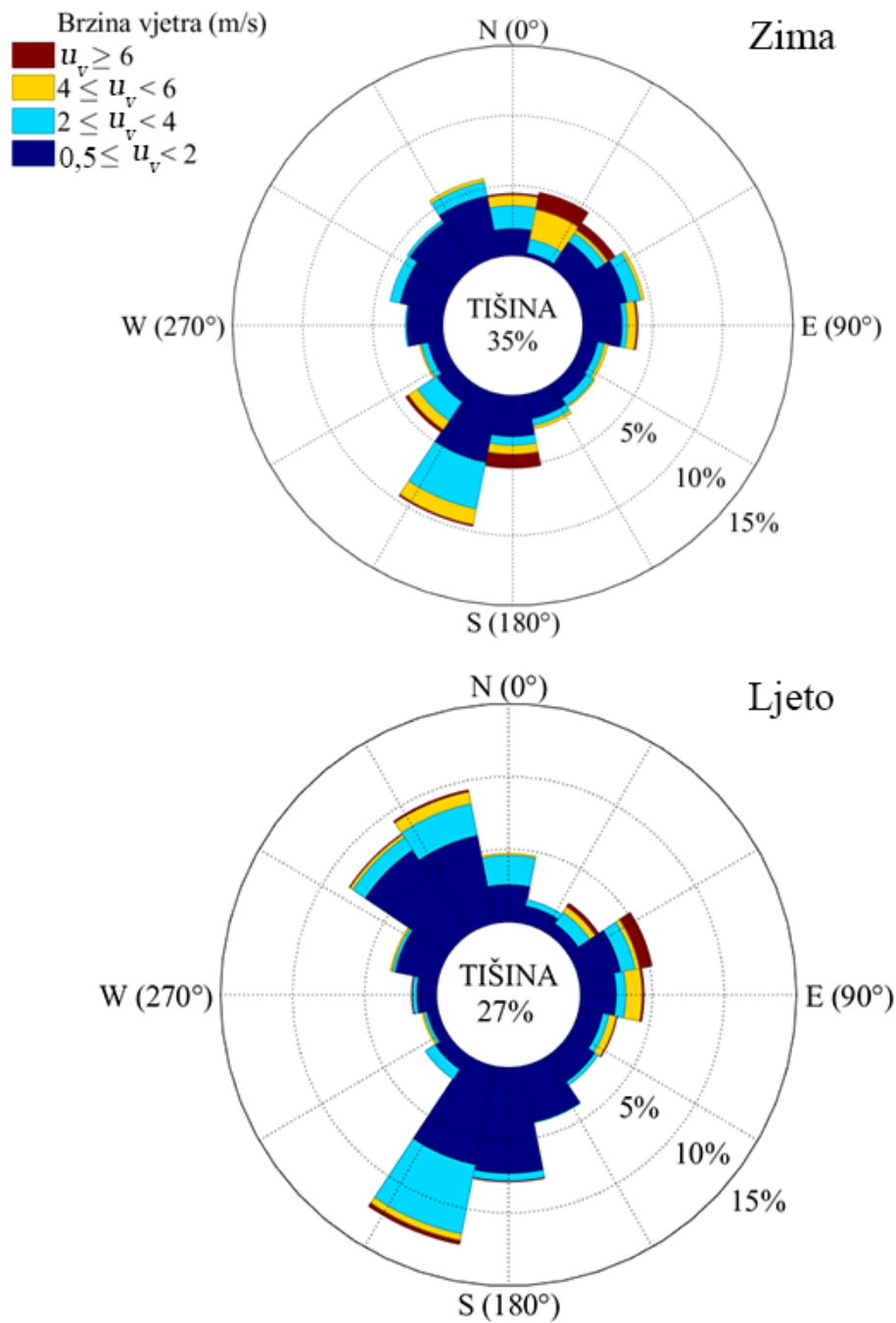
Tablica 15 Statistički podaci raspodjele visinske razlike ( $\Delta H$ ) između dviju strana propusta koji se pojavljuje tijekom ljeta i zime (Slika 50)

Srednja vrijednost (m)	-0,00088
Standardna devijacija (m)	0,0045
Medijan (apsolutne vrijednosti) (m)	0,0026

### 5.2.1.2 Vjetar

Tijekom zimskog mjernog razdoblja, vjetar najčešće puše iz pravca jugozapada (10 %), dok najjači vjetrovi pušu s juga i sjeveroistoka (0,5 % zabilježenih satnih srednjih brzina vjetra imalo je jakost veću od 6 m/s) (Slika 51). Sjever-sjeveroistočni vjetar je istog smjera kao i ulaz u marinu, što potencijalno može uzrokovati veći utjecaj na strujanje mora kroz ulaz tijekom navedenih vjetrova, a posljedično na cirkulaciju kroz cijelu marinu. Mirna razdoblja (kada je intenzitet vjetra ispod 0,5 m/s) su opažena tijekom 39 % mjerenog razdoblja. Konačno se može očekivati kako će na navedenoj lokaciji ACI marine Opatija poglavito vjetrovi iz sjever-sjeveroistoka i jug-jugozapada voditi dominantnu ulogu izmjene mora povodom vjetra.





Slika 51 Ruže vjetrova temeljene na mjerenjima provedenim pomoću anemometra na glavi lukobrana tijekom zimskog (15. 2. 2017. - 31. 3. 2017.) i ljetnog razdoblja (4. 7. 2017. - 31. 8. 2017.); izvedene ruže odnose se na satno osrednjene vrijednosti brzine vjetra

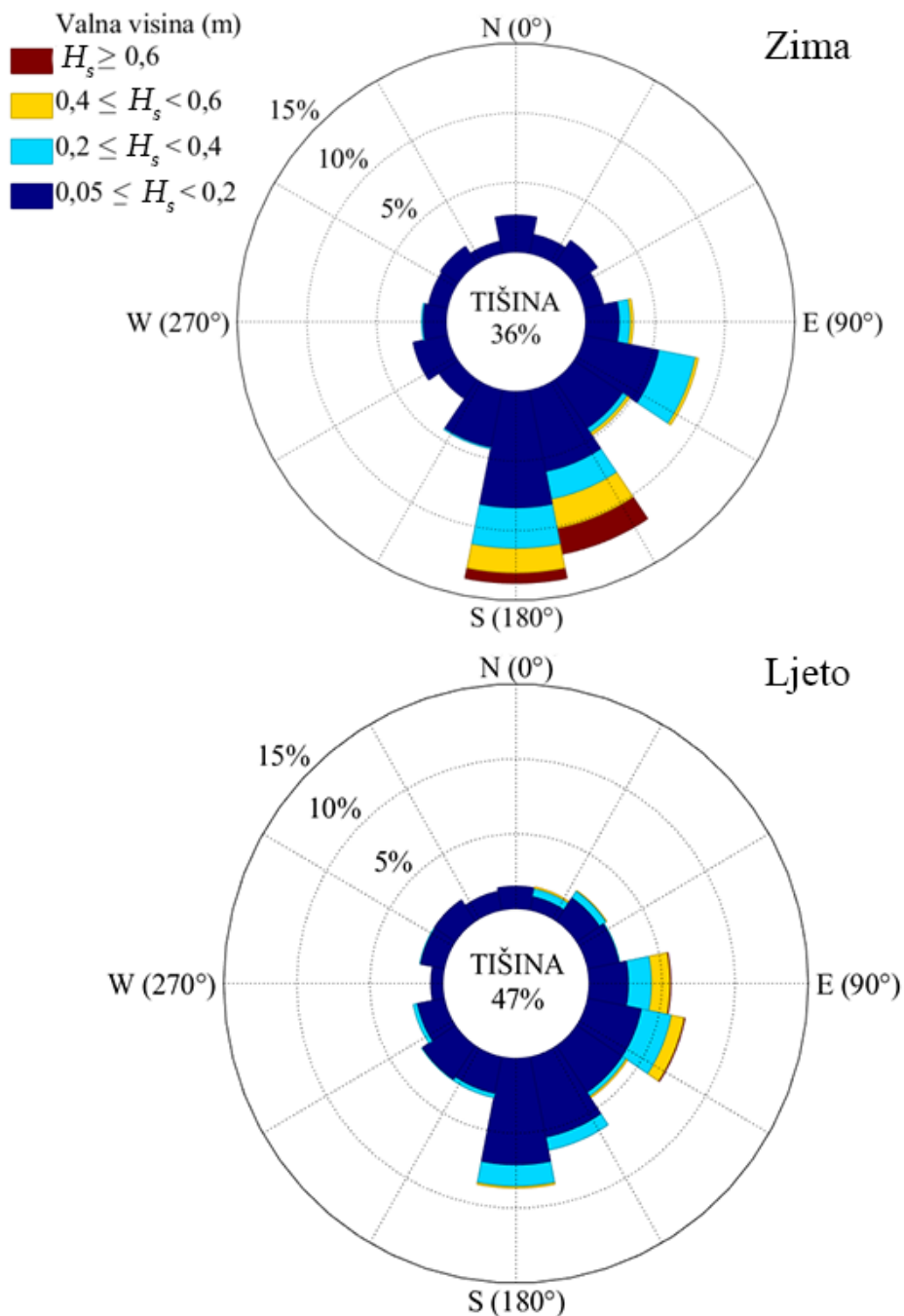
Tijekom ljetnog razdoblja se uz veliku učestalost jug-jugozapadnog vjetra (12,5 %), često pojavljuje vjetar iz pravca sjeverozapada i sjever-sjeverozapada (9 %), s jednako čestom pojavom vjetra veće jakosti (veće od 6 m/s), kao u zimskom razdoblju vjetra iz smjera jug-jugozapad (Slika 51). Najjači vjetrovi tijekom ljetnog razdoblja dolaze iz istok-sjeveroistočnog smjera, smjer koji se nije znatno promijenio u odnosu na zimsko mjerno razdoblje gdje najjači vjetrovi dolaze iz pravca sjeveroistoka. Tijekom ljeta se rjeđe pojavljuje tišina, gdje samo tijekom 27 % ukupnog ljetnog mjernog razdoblja se pojavio vjetar brzine manje od 0,5 m/s, za razliku od 39 % ukupnog zimskog mjernog razdoblja.

### **5.2.1.3 Valovi**

Valna situacija se veći dio zimskog mjernog razdoblja smatrala mirnom (36 % promatranog razdoblja je značajna valna visina bila manja od 0,1 m), a smjer valova je uglavnom varirao između istoka i juga, što je očekivano s obzirom na topografiju i prisutnost privjetrišta (Slika 52). Tijekom intenzivnijih valnih situacija, valovi su uglavnom prilazili iz smjera juga i jugoistoka (valni uvjeti sa značajnom valnom visinom iznad 0,6 m). U odnosu na smjer propusta ( $135^\circ$ ), incidentni kutovi valova uglavnom su između  $-45^\circ$  i  $+45^\circ$ , pri čemu su valovi većih valnih visina prilazili pod kutom od  $+15^\circ$  do  $+45^\circ$ .

Tijekom ljetnog mjernog razdoblja udio vremena u kojem se smatra da vlada tišina je značajan (47 % promatranog razdoblja je značajna valna visina bila ispod vrijednosti od 0,05 m) (Slika 52). Valovi se pojavljuju iz smjerova između istoka i juga, jednako utvrđenim za zimsko razdoblje. Najčešći valovi se pojavljuju iz smjera istoka i istok-jugoistok što odgovara opaženom smjeru vjetra koji se pojavljuje tijekom ljetnog mjernog perioda (Slika 51), iako isti su manjih značajnih valnih visina nego što su opaženi tijekom zimskog mjernog razdoblja iz smjera juga i jugoistoka.

Očekuje se da valovi koji ne nailaze na propuste u smjeru paralelnom smjeru pružanja propusta uzrokovati manju transmisiju valne energije i protok (Tsoukala i Moutzouris, 2009a).



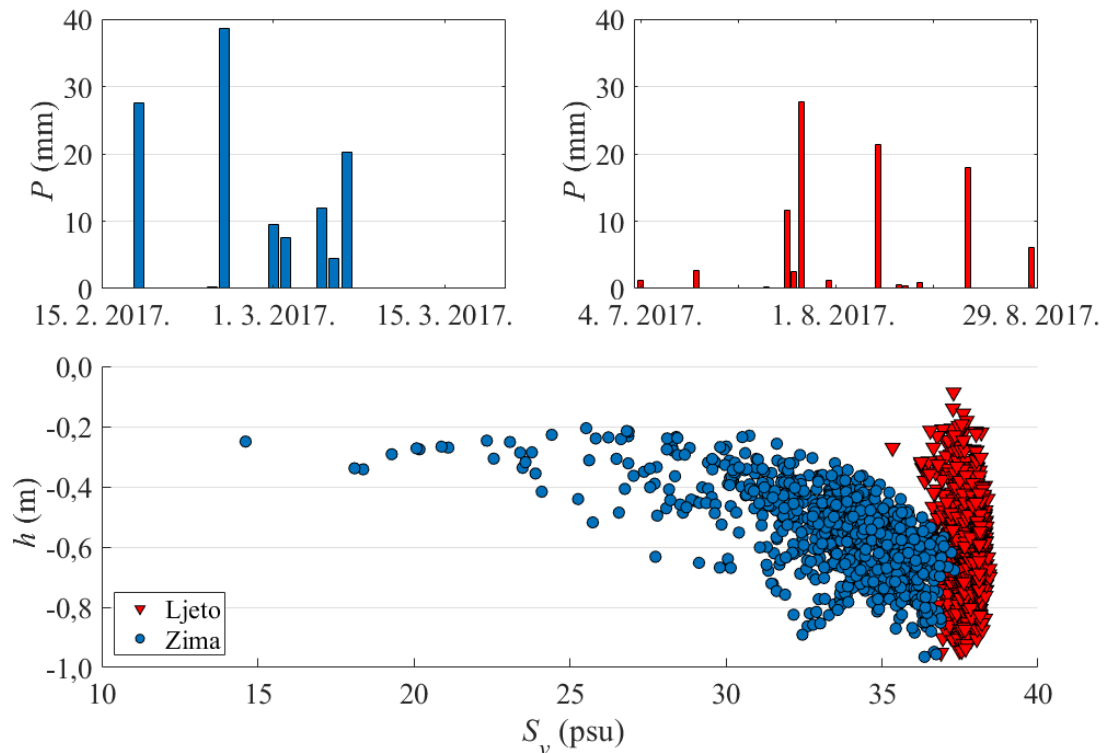
Slika 52 Ruže valova temeljene na mjerenjima provedenim pomoću ADCP 1 koji se nalazi ispred propusta tijekom zimskog (15. 2. 2017. - 31. 3. 2017.) i ljetnog razdoblja (4. 7. 2017. - 31. 8. 2017.); izvedene ruže odnose se na satno osrednjene vrijednosti valnih visina

#### **5.2.1.4 Slatkovodni izvori**

U mjestu Ičići velika su izviranja podzemnih voda, koja se javljaju na kontaktu krškog vodonosnika i morske vode. Zona istjecanja je uz cijeli obalni pojas naselja Ičići, pa tako i u ACI marini Opatija. O izdašnosti tih istjecanja najbolje govori i činjenica da je još 1884. godine kaptiran obližnji izvor Klara (Kostelac, 2009). Jugozapadno od marine u more utječu bujični vodotoci Ičići 1 i 2, kojima istjecanja podzemnih voda čini glavninu vodne bilance. Na potezu između izvora Klara i bujica Ičići 1 i 2, nalazi se ACI marina Opatija, gdje je također značajno istjecanje podzemnih voda.

Na lokaciji ACI marine Opatija prethodno je bila poznata prisutnost podmorskih izvora slatke vode. U svrhu analize doprinosa slatkovodnih izvora na lokaciji ACI marine Opatija, isprva se obrađuju podaci količine oborina mjereni na obližnjoj meteorološkoj postaji u Rijeci, Državnog Hidrometeorološkog Zavoda, tijekom razdoblja mjerenja (Slika 53). Korišteni su dnevni podaci o oborinama. Tijekom istog mjernog razdoblja pomoću CTD sonde koje je postavljena kod ulaza u propust, mjeren je salinitet unutar akvatorija koji može ukazati na prisutnost slatke vode unutar akvatorija (Slika 23 i Slika 25). CTD sonda je postavljena tako da omogućuje mjerenja saliniteta u neposrednoj blizini vodnog lica na dubini od 0,1 m do 1 m (Slika 53).

Promatrajući rezultate saliniteta u blizini vodnog lica, za vrijeme zimskog razdoblja uočen je značajan pad saliniteta sa oko 38 psu, na 15 psu, što ukazuje na prisutnost slatke vode na površini mora. Ova dramatična promjena slanosti na površini je vjerojatno posljedica prethodno dokumentiranih slatkovodnih izvora prisutnih na dnu akvatorija i obalnom zidu.



Slika 53 Vremenska serija padalina koje su zabilježene na meteorološkoj postaji u Rijeci tijekom zimskog i ljetnog mjernog razdoblja, te mjerenja saliniteta po visini u neposrednoj blizini propusta (visina mjerena od površine prema nižem)

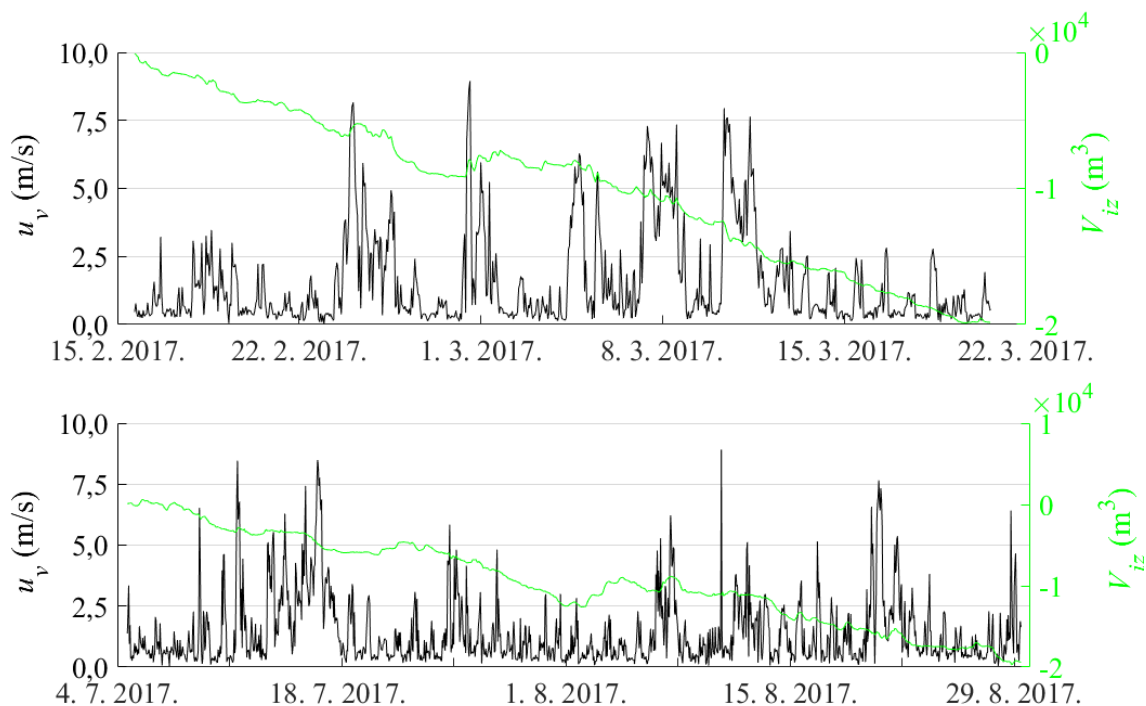
Istjecanje slatkih voda je uzrokovano kišom u Liburnijskom zaleđu Ičića, kod kojeg dolazi do brzog istjecanja, odnosno priobalnog izviranja zbog velikih nagiba terena i krškog tla. Zbog toga se formira tanki sloj slatke vode na površini mora unutar akvatorija marine.

Navedena posljedica izviranja slatke vode u obliku pada saliniteta nije opažena tijekom ljetnog razdoblja mjerenja, iako su na meteorološkoj stanici Rijeka zabilježene oborine. Ukupno tijekom zimskog razdoblja palo je 120 mm oborina u 33 dana, a tijekom ljetnog razdoblja 95 mm oborina u 58 dana na lokaciji meteorološke postaje u Rijeci. Tijekom zimskog mjernog razdoblja najveća dnevna oborina iznosi 38 mm, a tijekom ljetnog mjernog razdoblja ona iznosi 28 mm. Ukoliko se uzme u obzir različito trajanje mjernih razdoblja (zimskog mjerno razdoblje iznosi 33 dana, a ljetno mjerno razdoblje 58 dana), tada srednja količina padalina kroz zimsko mjerno razdoblje iznosi 3,64 mm/dan, a za ljetno mjerno razdoblje 1,64 mm/dan. Navedene razlike između količine zabilježenih padalina i opaženih saliniteta pri ulazu u propust, ukazuju da su tijekom ljetnih mjeseci višestruko manja izviranja podzemnih voda unutar akvatorija marine zbog manjih intenziteta oborina, većih temperatura, evapotranspiracije i stanja krškog vodonosnika.

Shodno statističkim vrijednostima protjecanja kroz propust i volumnoj analizi za zimsko i ljetno mjesto razdoblje može se kvantificirati utjecaj slatkovodnih izvora s obzirom na protjecanje kroz propust (uzimajući u obzir samo izlazni smjer protjecanja koji mogu uzrokovati slatkovodni izvori) na vrijednost od 6% u odnosu na ukupnu cirkulaciju kroz propust (Bujak i ostali, 2018).

## 5.2.2 Komparacija generatora cirkulacije kroz propust

Analizom mjerenih vrijednosti volumena mora koji protječu kroz propust, provedenih u ACI marini Ičići tijekom zime i ljeta pomoću PCM uređaja (Slika 54), mogu se ugrubo definirati udjeli prirodnih generatora plimnih oscilacija (opisano u poglavlju 5.2.1.1), vjetra (opisano u poglavlju 5.2.1.2), valova (opisano u poglavlju 5.2.1.3), i slatkovodnih izvora (opisano u poglavlju 5.2.1.4).

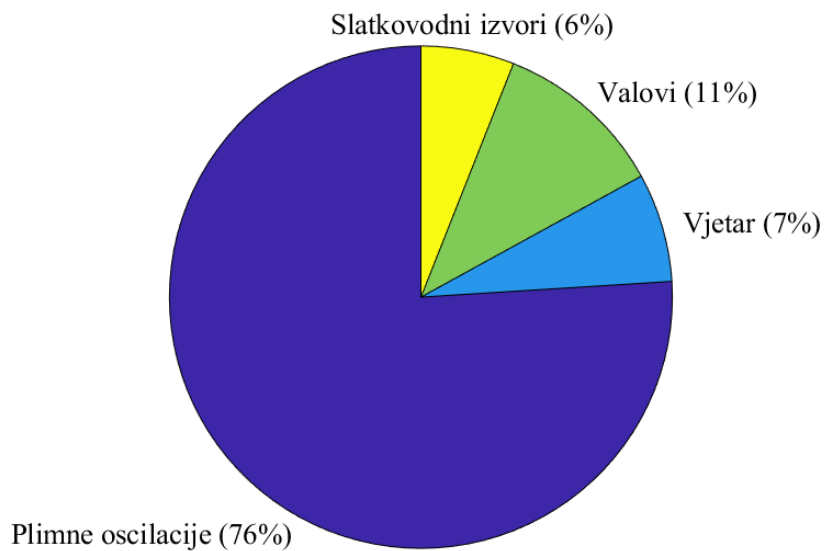


Slika 54 Vremenska serija brzine vjetra ( $u_v$ ) mjerena anemometrom postavljenim na glavu lukobrana i kumulativni volumen koji je cirkulirao kroz jedan propust ( $V_{iz}$ ) mjereno pomoću PCM uređaja tijekom zimskog i ljetnog razdoblja mjerenja; negativna vrijednost se pridaje izlasku morske vode kroz propust iz marine, a pozitivna ulasku morske vode kroz propust u marinu

Protok kroz propust se smatrao da je prouzročen valovima ako je u datom trenutku značajna valna visina ispred propusta iznosila 0,3 m, prouzročena vjetrom ako je brzina vjetra iznad 4 m/s, a u svim ostalim situacijama se smatralo da je prouzročena plimnim oscilacijama. Konačno će se udio plimnih oscilacija umanjiti za prethodno procijenjeni udio slatkovodnih izvora na ukupnu količinu cirkulacije kroz propust u iznosu od 6 % (predstavljeno u okviru poglavlja 5.2.1.4 i (Bujak *i ostali*, 2018)).

Udjeli pojedinog generatora cirkulacije u ukupnoj cirkulaciji mora kroz propust tijekom razdoblja mjerenja iznose 7 % uzrokovane vjetrom, 11 % uzrokovane valovima, 6 % uzrokovane slatkovodnim izvorima i 76 % uzrokovane plimnim oscilacijama (Slika 55). Uz moguća mala odstupanja radi grube metode definiranja udjela pojedinih prirodnih generatora, jasan je veliki doprinos plimnih oscilacija u iznosu od 76 % u odnosu na sveukupni volumen morske vode koji je cirkulirao kroz propust tijekom 103 dana mjerenja (ljetno razdoblje i zimsko razdoblje mjerenja zajedno). Može se zaključiti da su dugoročno plimne oscilacije dominantni mehanizam cirkulacije morske vode kroz propust na lokaciji ACI marina Opatije, iako na razini jednog dana vjetar i valovi zasigurno mogu uzrokovati veći protok ovisno o valnoj i vjetrovnoj situaciji tijekom pojedinog dana što je pokazano drugim istraživanjima (Bujak *i ostali*, 2018; Carević *i ostali*, 2019).

Visinska razlika između dviju strana propusta koja se ostvaruje zbog plimnih oscilacija omogućuju bitno veće protoke za razliku od protoka od valova na lokaciji ACI marine Opatija, koji se često navode kao dominantni generator protoka za propuste u okviru mnogih prethodnih istraživanja (Stamou *i ostali*, 2004; Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014). Razlog manjem uočenom protoku uslijed valova može se objasniti visinskom pozicijom propusta gdje je gornji rub propusta pozicioniran da odgovara srednjoj razini mora, što prigušuje protok koji se ostvaruje uslijed valova (prikazano u okviru poglavlja 5.4.2). Nadalje, na drugim lokacijama gdje su prisutne drukčije oceanografske prilike (npr. veće privjetrište i veće prosječne valne visine) postoji mogućnost da protok kroz propust uzrokovan plimnim oscilacijama neće biti dominantan, već će drugi generatori poput vjetra i valova preuzeti dominantniju ulogu.



Slika 55 Udjeli volumena morske vode koje je pojedini generator cirkulacije uzrokovao kroz propust ugrađen u lukobran na lokaciji ACI marine Opatija (zajednički prikaz za ljeto i zimu)

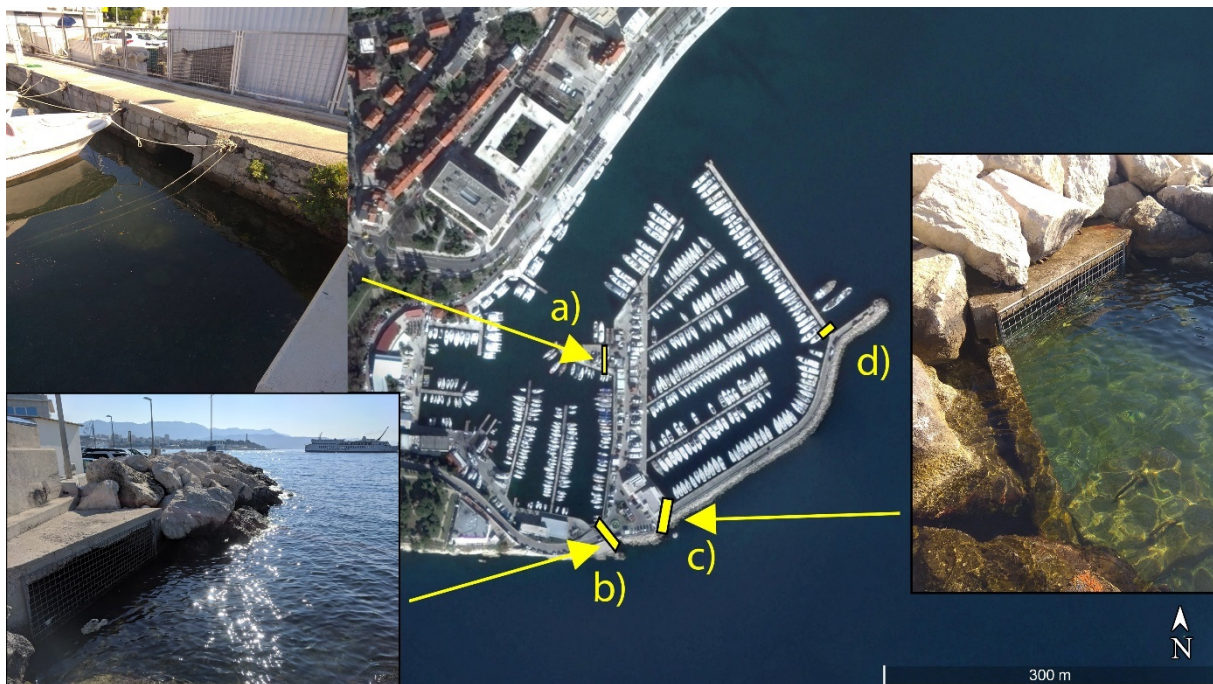


### 5.3 Anketiranje i obilazak terena

U okviru ovog poglavlja dat će se pregled dvije međusobno kratko udaljene lokacije, ACI marine Split i lučice Zenta u Splitu. Opažanja za ostale lokacije su prezentirana u okviru publiciranog rada (Carević *i ostali*, 2019). Pregled je proveden tijekom mjeseca lipnja i srpnja 2018. godine.

#### 5.3.1 ACI marina Split

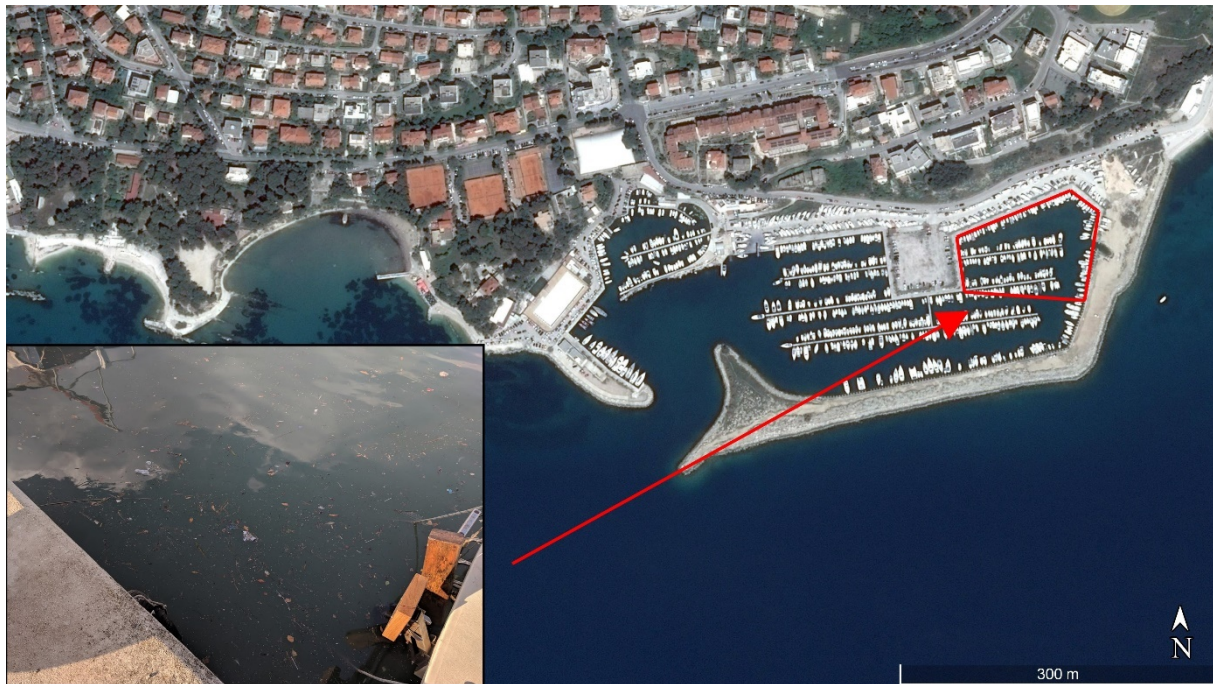
Četiri propusta su ugrađena u lučnim građevinama u ACI marini Split i sportskoj lučici Labud koja se nadovezuje nju (Slika 56). Propust (a) širine 0,75 m, naizgled nedjelotvorno funkcionira s obzirom na zatečeno vidljivo onečišćenje mora s južne strane propusta. Veća dva pločasta propusta (b i c) koji spajaju akvatorij s otvorenim morem su dimenzija širine 3,3 m i 3,8 m. U korijenu lukobrana se nalazi pločasti propust (d) širine 4 m. Anketom zaposlenika je utvrđeno da je uočena cirkulacija mora kroz propuste b, c i d. Istaknuto je kako se vrši redovito čišćenje propusta od školjkaša s unutarnjih ploha propusta.



Slika 56 ACI marina Split; a) pločasti propust – pop. površina = 0,8 m<sup>2</sup>; b) pločasti propust – pop. površina = 4,2 m<sup>2</sup>; c) pločasti propust – pop. površina = 5,3 m<sup>2</sup>; d) pločasti propust – pop. površina = 12 m<sup>2</sup>

### **5.3.2 Lučica Zenta (Split)**

U okviru pregleda napravljen je pregled lučice Zenta koja je od ACI marine Split udaljena približno 2,5 km. U gradskoj lučici Zenta uočeni su onečišćeni dijelovi akvatorija što je najizraženije u istočnom dijelu (crveno na Slika 57). U lučici Zenta nisu utvrđeni propusti za cirkulaciju niti neke druge mjere poboljšanja izmjene mora.



Slika 57 Gradska lučica Zenta u Splitu u kojoj nema propusta; mrtva zona – crveni poligon

### **5.3.3 Usporedba ACI marine Split i lučice Zenta**

Kako se radi o dvjema bliskim lokacijama (ACI marina Split i lučica Zenta), mogu se očekivati slični oceanografski, klimatski i antropogeni utjecaji u obje luke. Lošija kakvoća mora uočena je u zavučenom djelu akvatorija lučice Zenta, odnosno dijela koji je najdalji od ulaza u lučicu (mrtva zona), što nije slučaj u ACI marini Split kod koje u zavučenom dijelu akvatorija nije uočena lošija kakvoća mora. U slučaju ACI marine Split je područje mrtvo zone povezano direktno s otvorenim moram pomoću propusta b) (Slika 56). Može se pretpostaviti da je lošije zatečeno stanje kakvoće mora u lučici Zenta uzrokovano nedostatkom provedenih pasivnih ili aktivnih mjera poboljšanja cirkulacije mora u luci poput propusta ugrađenih u tijelo lukobrana. Ova pretpostavka bi trebala biti dokazana primjenom znanstvene metodologije (mjerenje i numeričko modeliranje).

## **5.4 Numeričko modeliranje valovanja**

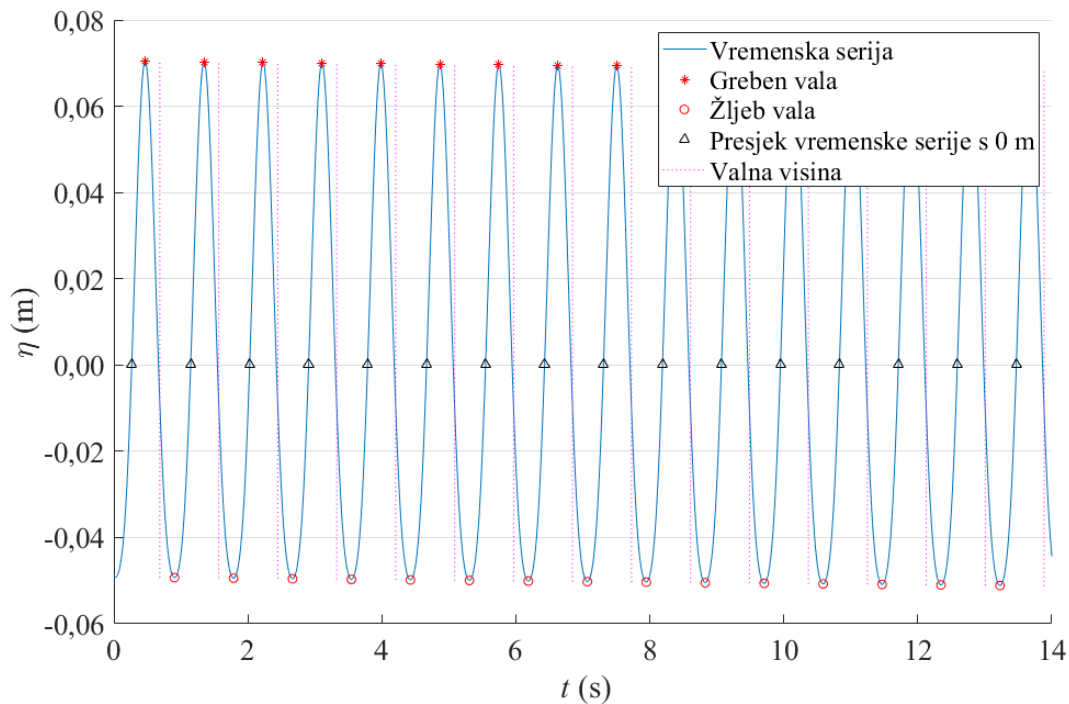
Numerički model temeljen na predstavljenoj matematičkoj formulaciji i kriterijima modela (početni i rubni uvjeti, domena modela, Courantov broj, itd.) unutar poglavlja 4.4.1 i 4.4.2, potrebno je prvo validirati s obzirom na mjerene podatke pronosa valne energije kroz propust u obliku koeficijenta transmisije, te brzine vode na izlazu iz propusta (laboratorijski podaci predstavljeni u okviru poglavlja 5.1.3 i 5.1.4). Validacija numeričkog modela valovanja će se prezentirati u poglavlju 5.4.1. Potom, koristeći se validiranim numeričkim modelom ispitivat će se različite geometrije grupe propusta s obzirom na transmisiju valne energije i protok koji se ostvaruje kroz grupu propusta, te omogućiti uvid u hidrauličko djelovanje propusta. Rezultati i opažanja korištenjem numeričkog modela grupe propusta pod utjecajem valova prezentirati će se u okviru poglavlja 5.4.2.

### **5.4.1 Validacija numeričkog modela**

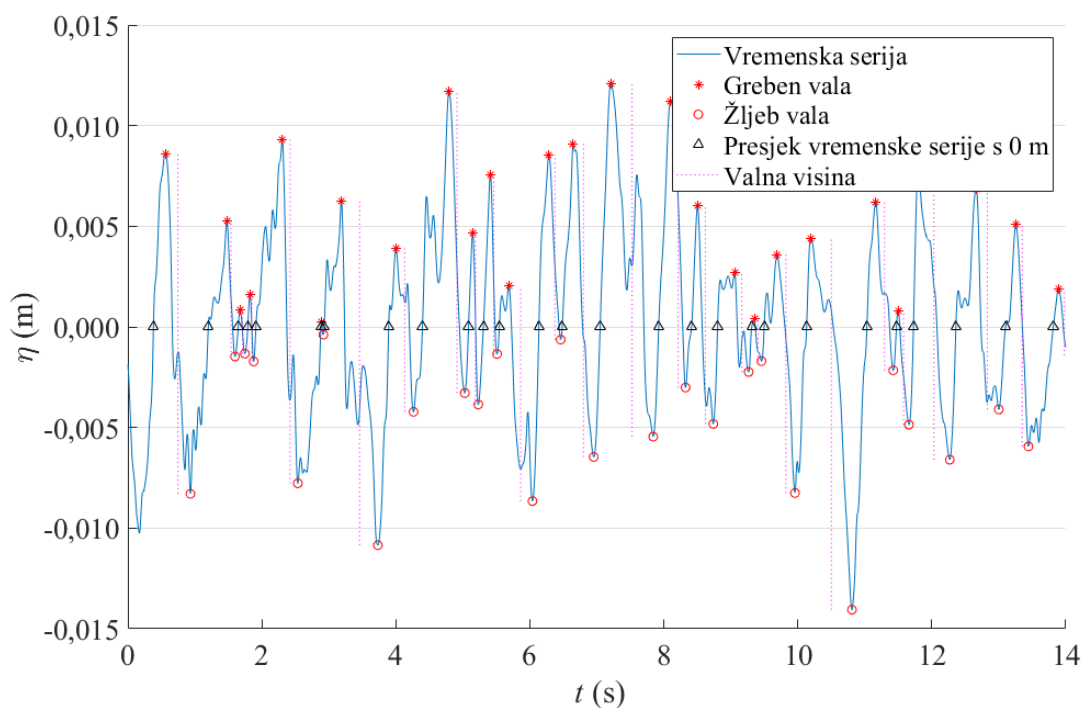
Usporedbom rezultata laboratorijskih ispitivanja utjecaja incidentnih monokromatskih valova prikazanih u obliku koeficijenta transmisije mjerene sondama G5 – G8 (Slika 15) unutar zaštićenog akvatorija (Tablica 13) i brzine vode na izlazu iz propusta (Tablica 14) s rezultatima istih unutar numeričkog modela, može se utvrditi prognozira li numerički model sa zadovoljavajućom točnošću mjerene vrijednosti fizičkih procesa koji su uočeni u okviru laboratorijskih istraživanja.

#### **5.4.1.1 Validacija koeficijenta transmisije uzrokovanog monokromatskim valovima**

Shodno ograničenjima računalnih resursa kako je opisano u okviru poglavlja 4.4.2, valni signal koji je generiran na ulaznom rubnom uvjetu je monokromatskog karaktera (Slika 58). Usprkos tome što je incidentni val monokromatskog karaktera, u slučaju validacije numeričkog modela vremenski zapis razina vode na sondama G5 – G8 (Slika 15) unutar zaštićenog akvatorija nije monokromatskog karaktera, odnosno u obliku sinus funkcije kakav bi se očekivao (Slika 59). Isto djelovanje je opaženo kod mjerene vremenske serije razine vode provedene u okviru laboratorijskih mjerenja. Navedeno je opaženo zbog hidrauličkog djelovanja samog propusta koji ostavlja samo više harmonike valova unutar zaštićenog akvatorija, jednako kao u nekim prethodnim istraživanjima (Tsoukala *i ostali*, 2014).



Slika 58 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) koji se generira na ulaznom rubnom uvjetu prema testu 7 (Tablica 13) (valna visina incidentnog vala iznosi 0,12 m, a period incidentnog vala iznosi 0,88 s) za situaciju djelomično uronjenog propusta (W2)



Slika 59 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) za sondu G7 (Slika 15) prema testu 7 (Tablica 13) (valna visina incidentnog vala iznosi 0,12 m, a period incidentnog vala iznosi 0,88 s) za situaciju djelomično uronjenog propusta (W2)

Nadalje, djelovanje bočnih krutih zidova prisutnih u laboratorijskom modelu zbog ograničenja prostornih resursa hidrotehničkog laboratorija, uklanja periodičnost viših harmonika valova koji izlaze iz propusta. U sirovim podacima vremenske serije razine vode mjerene na sondi G7 u laboratoriju za djelomično potopljeni propust se ne uočava nikakva periodičnost valova viših harmonika (Slika 59), što nije slučaj ako se valna energija koja udara u bočne zidove upija kako je to slučaj u numeričkom modelu (Slika 64).

Numerički model koji je izrađen u svrhu validacije modela jednostavno replicira uvjete koji su prisutni u okviru laboratorijskog modela. Bočni zidovi, valnu energiju koja se difraktirala iza propusta, reflektiraju natrag prema sondama koje se nalaze unutar akvatorija. Navedeno rezultira da sonde unutar zaštićenog akvatorija, osim što mjere promjenu razine vode u vremenu zbog valne energije koja propagira direktno iz propusta, također sadrže utjecaj valne energije koja se reflektirala od bočnih zidova. Utjecaj bočnih stranica koje reflektiraju valove prema sondama može ovisno o koincidenciji valnih perioda umanjiti ili uvećati valnu visinu koja se direktno iz propusta propagira prema sondama. Rezultirajuća vremenska serija promjene vodnog lica daje naizgled nepregledan zapis s gustoćom valne energije raspoređenom kroz veći raspon frekvencija vala, za razliku od incidentnog vala.

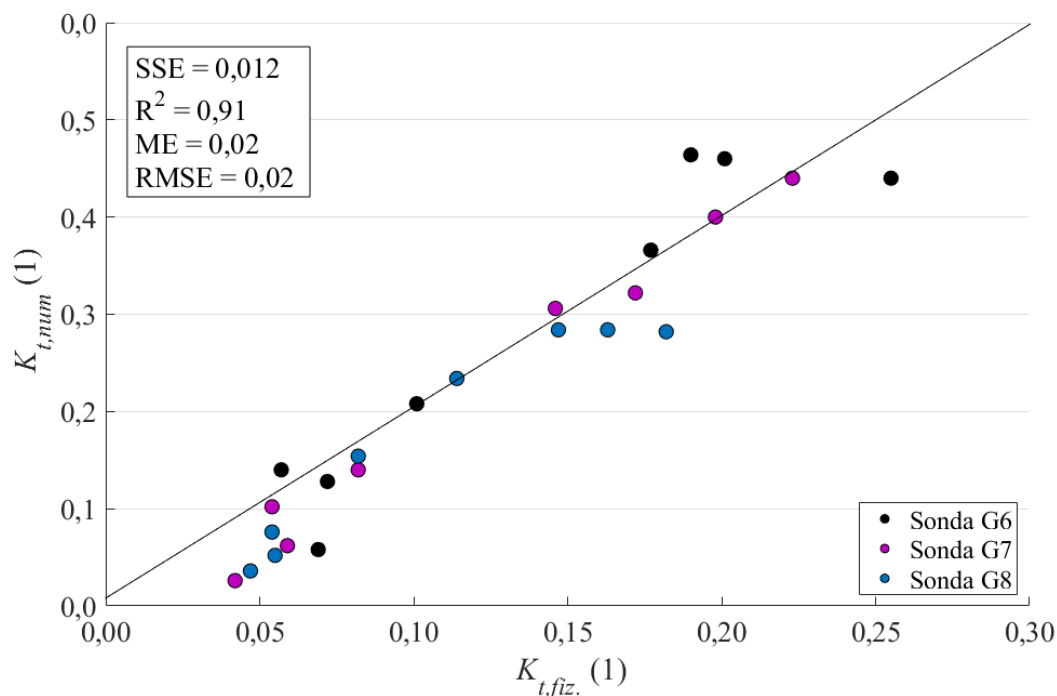
Za definiranje valne visine prema zapisima promjene razine vodnog lica mjerene sondama u zaštićenom akvatoriju koristit će se metoda koja koristi spektralnu snagu valnog zapisa. Informacija je prikazana u okviru varijable  $H_{m0}$  koja se definira u sljedećem obliku (Holthuijsen, 2007):

$$H_{m0} = 4\sqrt{M_0} \quad (54)$$

gdje je  $M_0$  nulti moment spektra snage valnog zapisa (odnosno integral funkcije po frekvencijama vala). Studije su pokazale da se valna visina određena preko spektra energije razlikuje od značajne valne visine unutar 5%.

Definirane valne visine po sondama unutar akvatorija zatim se trebaju dovesti u omjer s valnom visinom incidentnog vala kako bi se definirali koeficijenti transmisije valne energije. Zatim se uspoređuju koeficijenti transmisije po sondama određeni u okviru laboratorijskih mjerenja s pripadajućim koeficijentima transmisije određenim numeričkim modelom (Tablica

13). Promatrajući sondu G5 može se uočiti kako iz propusta često u dvofaznoj mješavini vode i zraka izleti mlaz koji pogodi sondu G5. Stoga se smatra da sonda 5 ne bilježi pouzdane podatke i neće se uzimati u obzir u daljnjim analizama rezultata. Usporedbom koeficijenata transmisije određenim za mjerenja u laboratorijskim uvjetima s onima određenim unutar numeričkog modela, uočava se dobra usklađenost vrijednosti (Slika 60). Usklađenost rezultata koja se može predočiti pomoću matematičkog indikatora RMSE (engl. *root mean square error*) iznosi 0,02, što nam govori o veličini očekivane pogreške numeričkog modela pri procjeni mjerenih vrijednosti koeficijenta transmisije.

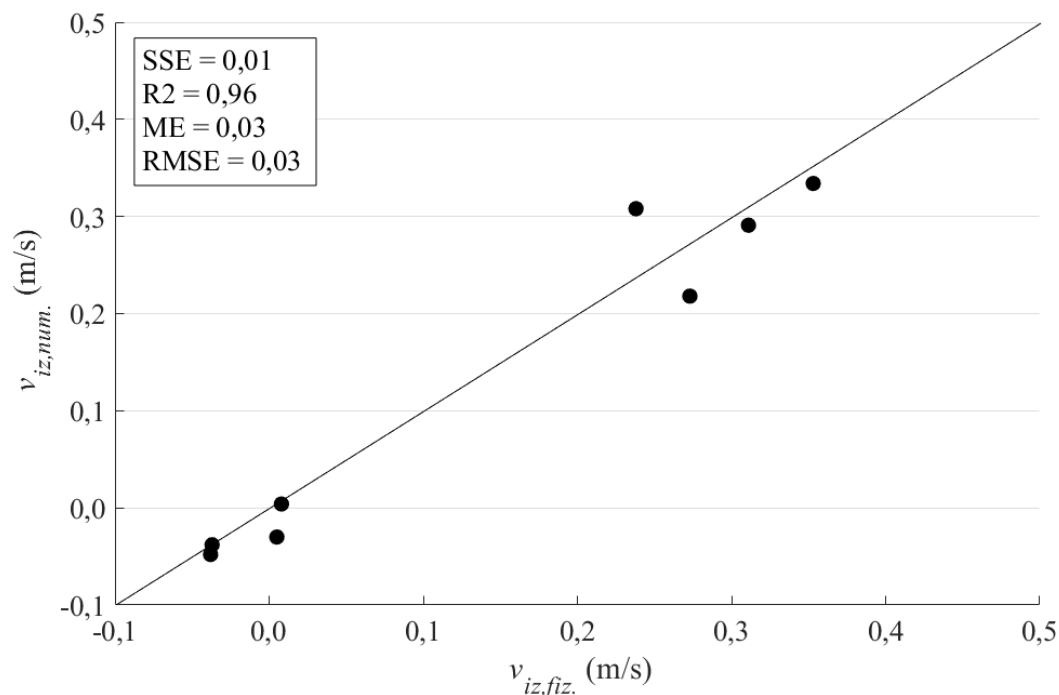


Slika 60 Validacija koeficijenata transmisije dobivenih kroz numerički model ( $K_{t,num}$ ) u odnosu na mjerene vrijednosti u okviru laboratorijskih ispitivanja ( $K_{t,fiz}$ ) za sonde G6, G7 i G8 (Slika 15)

#### 5.4.1.2 Validacija brzine vode uzrokovane monokromatskim valovima

Validacija rezultata brzine vode na izlazu iz propusta dobivenih numeričkim modelom se provodi na temelju mjerenih vrijednosti u okviru laboratorijskih istraživanja koristeći se ADV uređajem (Slika 15). Kako je brzina vode koja se opaža oscilatornog karaktera (Slika 44), usporedit će se vremenski osrednjene brzine vode na izlazu iz propusta (Tablica 14). Analizirajući usklađenost između brzina vode dobivenih laboratorijskim mjerenjima i numeričkim modeliranjem, može se zaključiti zadovoljavajuća točnost numeričkog modela u predviđanju brzine vode. Može se uočiti podudaranje čak u slučaju negativnih vremenski

osrednjenih brzina koje su opažene za potpuno uronjeni propust (W1). Matematički indikator usklađenosti podataka RMSE u slučaju promatranja brzine vode iznosi 0,03 m/s, što ukazuje na veličinu očekivane pogreške numeričkog modela pri procjeni mjerenih vrijednosti brzine vode na izlazu iz propusta.



Slika 61 Validacija brzina vode dobivenih kroz numerički model ( $v_{iz,num}$ ) u odnosu na mjerene vrijednosti u okviru laboratorijskih ispitivanja ( $v_{iz,fiz}$ ) bilježene pomoću ADV uređaja (Slika 15)

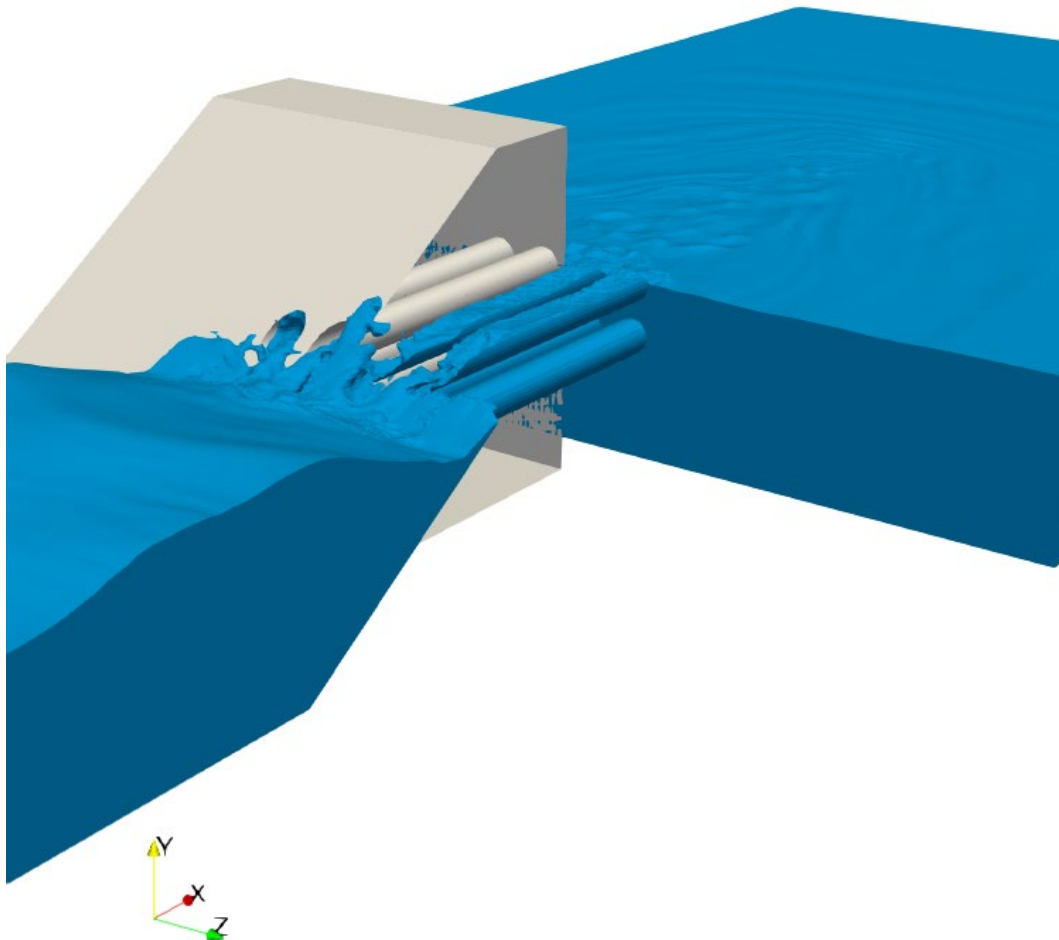
#### 5.4.2 Numerički model grupe propusta ugrađenih u lukobran pod utjecajem valova

U poglavlju 5.4.1 se zaključilo kako numerički model valovanja dobro procjenjuje mjerene vrijednosti koeficijenta transmisije i vremenski osrednjene brzine vode na izlazu iz propusta, stoga je prikladan za prikaz hidrodinamike unutar propusta i ispitivanje ponašanja grupe propusta ugrađenih u lukobran pri incidenciji valova.

Nakon provedene validacije numeričkog modela, slijedi ispitivanje grupe propusta različitih oblikovanja (oblikovanja su prikaza na Slika 31, a parametri valova u Tablica 10). U okviru daljnje analize su korišteni svi podaci neovisno o utjecaju  $H/D_{pr}$ , odnosno  $H/h_{pr}$ . Valja napomenuti kako se numerički model valovanja izradio u jednakom mjerilu kao fizički model (1:10) postavljen u laboratoriju radi jednostavnije validacije i usporedbe podataka, te se kasnije transformirao u prirodno mjerilo.

Oblikovanja grupe propusta koja će se u okviru ovog poglavlja ispitivati su (oblikovanja su prikaza na Slika 31):

- a) grupa od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu,
- b) propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao a) propust,
- c) grupa od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređene u dva reda po 4 propusta,
- d) propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao c) propust
- e) grupa od 2 propusta kružnog poprečnog presjeka čija površina poprečnog presjeka jednog propusta odgovara površini poprečnog presjeka dvaju propusta iz a) propusta

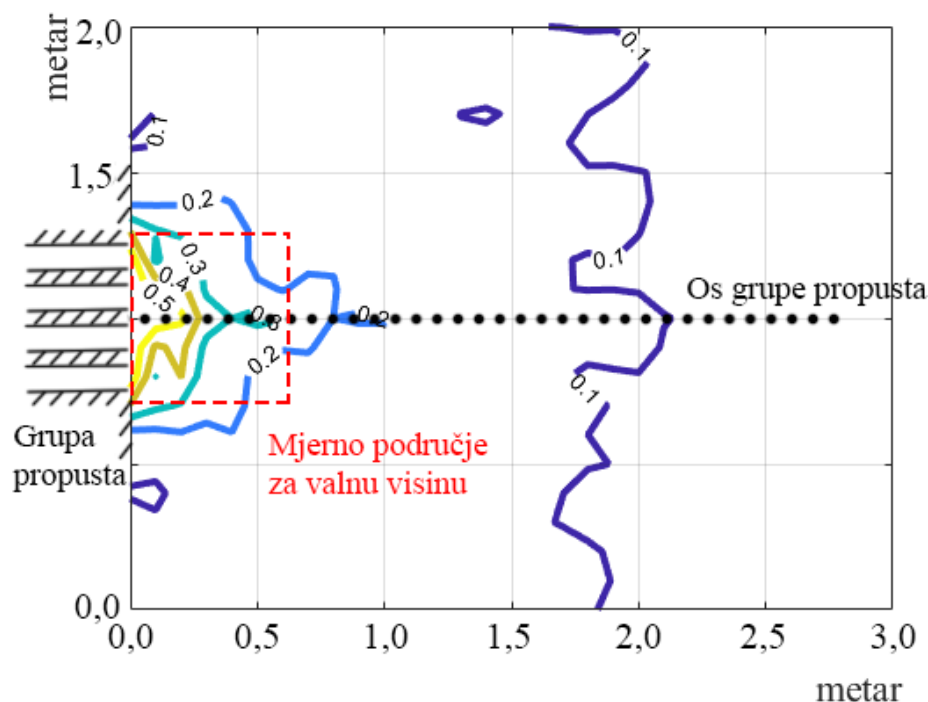


Slika 62 Trodimenzionalni prikaz proračunatog numeričkog modela valovanja za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s



Fizičke vrijednosti koje se promatraju radi buduće usporedbe grupe propusta su transmisija valne energije u zaštićeni dio akvatorija kroz propust i protok kroz propust koji se ostvaruje valnim gibanjem.

Numerički model omogućava niz numeričkih sonde koje bilježe vremensku seriju promjene razine vodnog lica unutar zaštićenog akvatorija koje će skupno reprezentirati informaciju o prostornoj raspodjeli transmisije valne energije. Numeričke sonde bilježe razinu vodnog lica na način koji je opisan u okviru poglavlja 4.4.2, te se potom zabilježena vremenska serija koristi kako bi se odredili koeficijenti transmisije po numeričkim sondama (Slika 63). Prikazi prostorne raspodjele koeficijenta transmisije za sve provedene testove su prikazani u okviru priloga 1.



Slika 63 Polje koeficijenata transmisije unutar zaštićenog područja za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda, promjera koji iznosi 1 m i dužine koja iznosi 10 m (prikazano na Slika 62); tlocrtna os grupe propusta postavljena je na koordinatama (0,10) te je smjer grupe propusta paralelan sa smjerom apscise; crveno crtanom linijom je označeno područje unutar kojeg se računa srednji koeficijent transmisije; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s

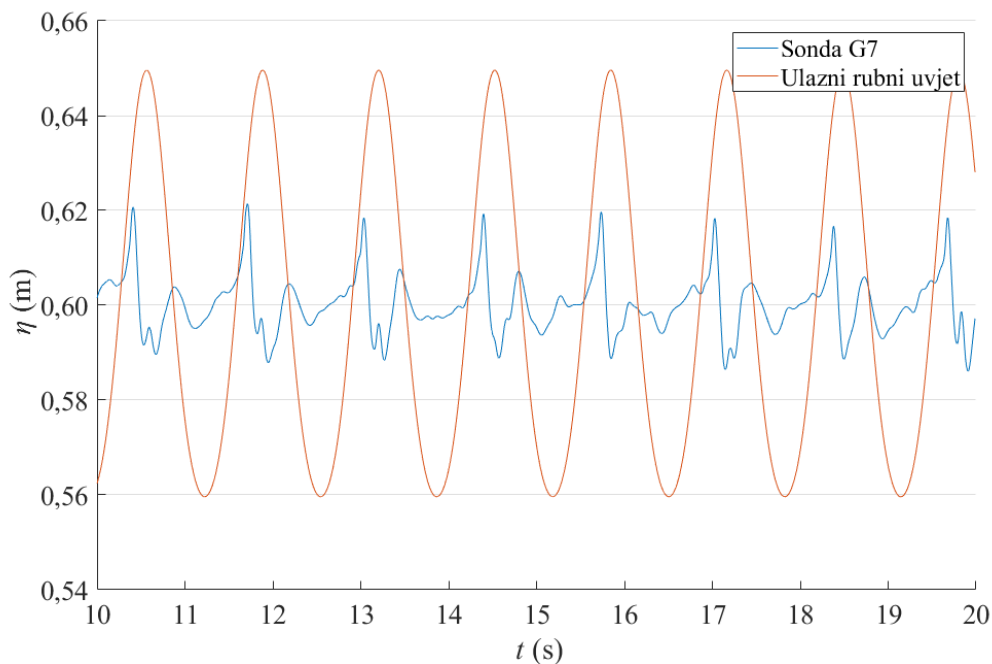
Kako bi se tijekom usporedbe oblikovanja grupe propusta mogla uzeti u obzir prostorna raspodjela koeficijenta transmisije, a ne samo pojedina vrijednost koeficijenta transmisije za određenu mjernu sondu kako je to omogućeno mjerenjima u laboratoriju, određeno je područje dužine i širine od 6 m unutar kojeg će se proračunati srednja vrijednost koeficijenta transmisije (Slika 63). Navedena srednja vrijednost koeficijenta transmisije se nadalje koristi pri narednim analizama u okviru rezultata numeričkog modela.

Za naredne analize se u okviru fluks parametra umjesto prethodno korištenog kvadrata promjera propusta kružnog poprečnog presjeka, koristi ukupna poprečna površina grupe propusta ( $A_{pr}$ ):

$$FP = A \frac{L}{L_{pr}} A_{pr} H_i^2 \quad (55)$$

#### **5.4.2.1 Periodičnost vremenske serije oscilacija razine vode transmitiranog vala**

Vremenska serija razine vodnog lica bilježena na lokaciji sonde G7 (lokacija koja se koristila pri validaciji numeričkog modela valovanja) ukazuje na periodičnost koja odgovara periodičnosti vremenskog signala razina na ulaznom rubnom uvjetu (Slika 64). Navedena periodičnost signala razine vodnog lica nije prisutna promatrajući rezultate koji su provedeni u okviru validacije modela (Slika 59). Može se zaključiti kako bočni zidovi postavljeni paralelno sa smjerom propusta koji su prisutni u validacijskom numeričkom modelu (kako bi se definirali istovjetni uvjeti koji su prisutni u okviru laboratorijskih mjerenja) bitno utječu na vremensku seriju razine vodnog lica koja se bilježi na sondi G7 (Slika 15 i Slika 36). Valna energija koja se u slučaju proširenog akvatorija (numerički model za grupe propusta) širi nakon izlaska iz propusta do upijanja na rubnim uvjetima, u modelu ograničenog akvatorija (numerički model za validaciju) se od zidova reflektira natrag na lokaciju sonde G7. Stoga superpozicija valova na lokaciji sonde G7 koji prilaze iz smjera propusta i reflektiranih od bočnih zidova formira vremenski signal razina vodnog lica koji nema izraženu periodičnost (Slika 59). Transmitirani valovi iza propusta se difraktiraju i šire unutar zaštićenog akvatorija na način da se u točkama koje su u blizini propusta očekuje očitavanje najvećih koeficijenata transmisije, a na većim udaljenostima od propusta manji koeficijenti transmisije (Slika 63).

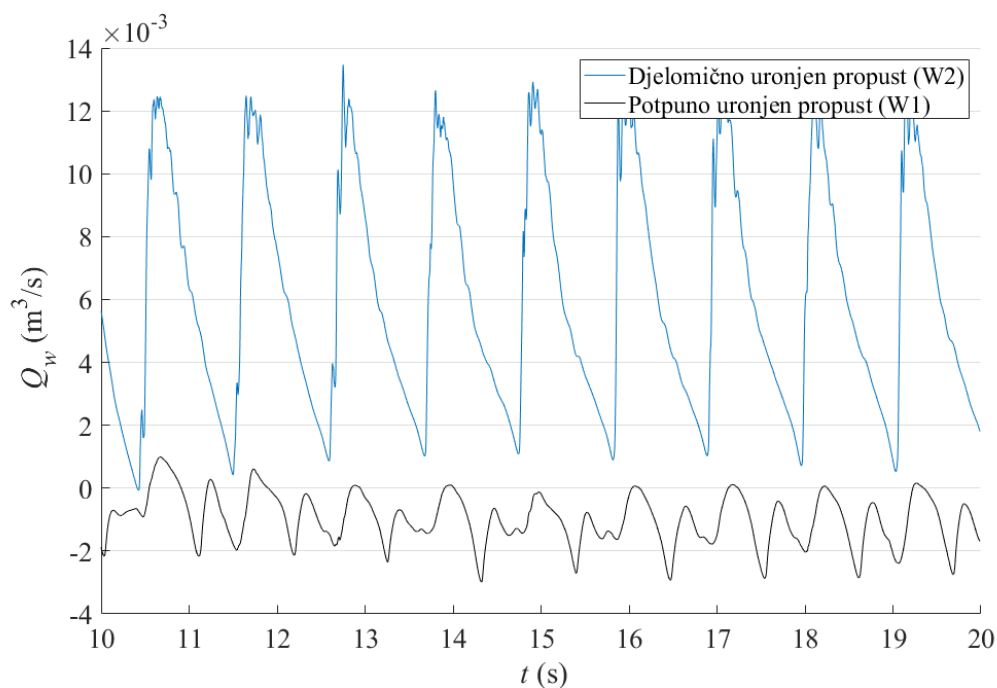


Slika 64 Vremenska serija razine vodnog lica ( $\eta$ ) koji se generira pri ulaznom rubnom uvjetu i razine vodnog lica na lokaciji sonde G7 za grupu propusta (c) koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređenih u 2 reda u slučaju kada je propust djelomično potopljen; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s

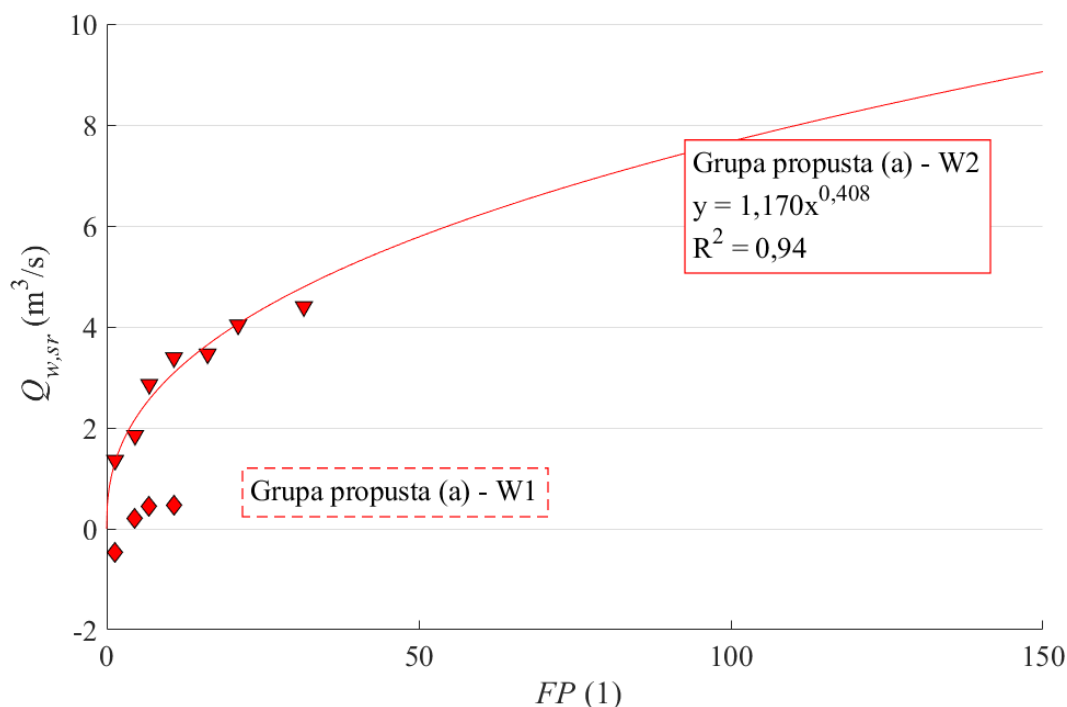
#### 5.4.2.2 Utjecaj uronjenosti propusta na protok pod djelovanjem valova

Kretanje vodne mase kroz grupu propusta je oscilatornog karaktera čiji period ovisi o periodu incidentnog valnog polja (Slika 65). Ako je grupa propusta djelomično uronjena (W2) za pojedini test uočava se neto protok u smjeru ulaska u akvatorij, a ukoliko je grupa propusta potpuno uronjena (W1) prisutan je neto suprotan protok za test parametre koje čine male vrijednosti  $FP$ . Vrijednosti protoka tijekom svih testova potpuno uronjenog propusta (W1) osciliraju u malenom rasponu za razliku od slučaja gdje je propust djelomično uronjen.

Polje vektora brzina ukazuje na kružno oscilatorno gibanje u smjeru paralelnom s propustom čestica vode u okolici propusta što je očekivano s obzirom na prisutnost valova (W1), dok unutar djelomično uronjenog propusta se uočava snažan jednosmjernan tok u trenutku kada brijeg vala pokrene i usmjeri vodnu masu prema zaštićenom akvatoriju (W2) (Slika 67 i Slika 68). Potpuno uronjena grupa propusta (W1) dramatično umanjuje vrijednost neto protoka u usporedbi s protokom uslijed valova koji se ostvaruje u slučaju djelomično uronjene grupe propust (W2) što se vidi, primjerice, u okviru testova koji su provedeni za grupu propusta (a) (Slika 66).



Slika 65 Vremenska serija protoka ( $Q_w$ ) kroz propust uzrokovanog valovima mjereno na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (b) u slučaju kada je propust u potpunosti potopljen i djelomično potopljen; zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,07 s

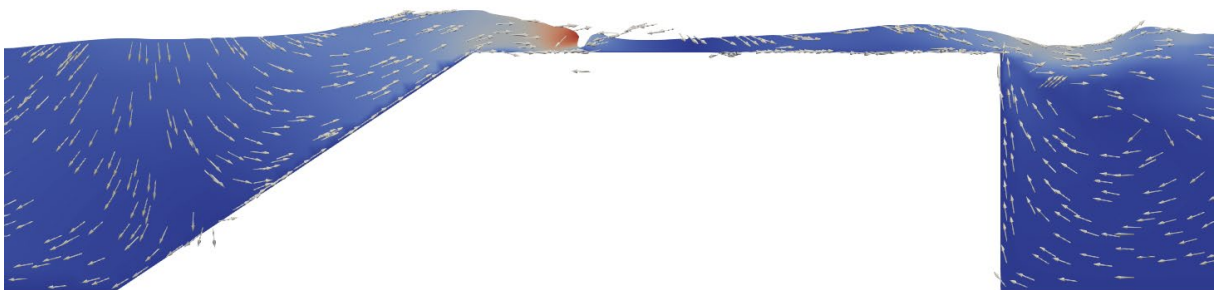


Slika 66 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) prema vremenski osrednjenom protoku kroz propusta pod utjecajem valova ( $Q_{w,sr}$ ) za sve testove provedene na grupi propusta (a);  $FP$  je definiran jednadžbom (55); u prirodnom mjerilu

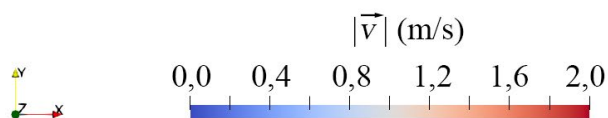
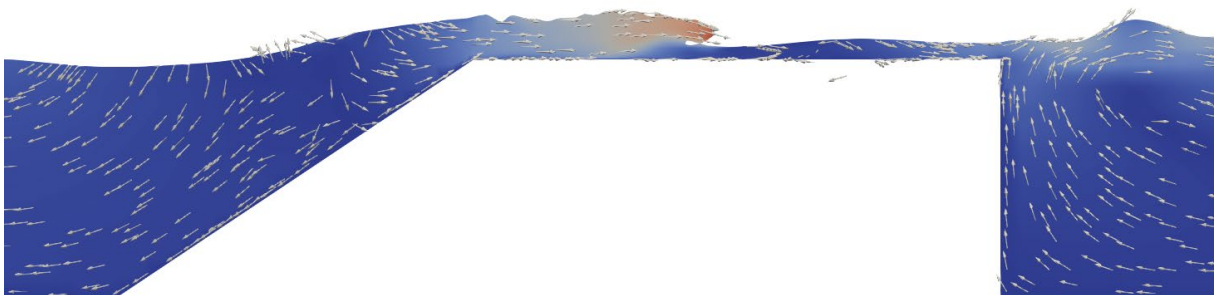
$t = 10,50$  s



$t = 10,70$  s

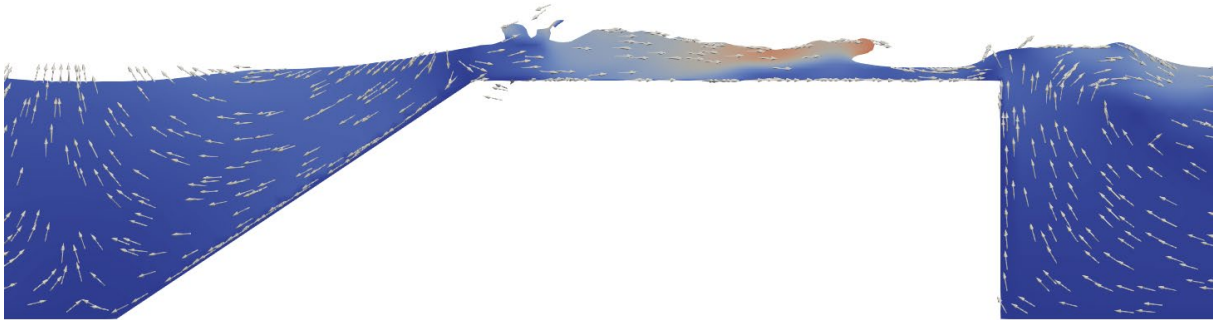


$t = 10,90$  s

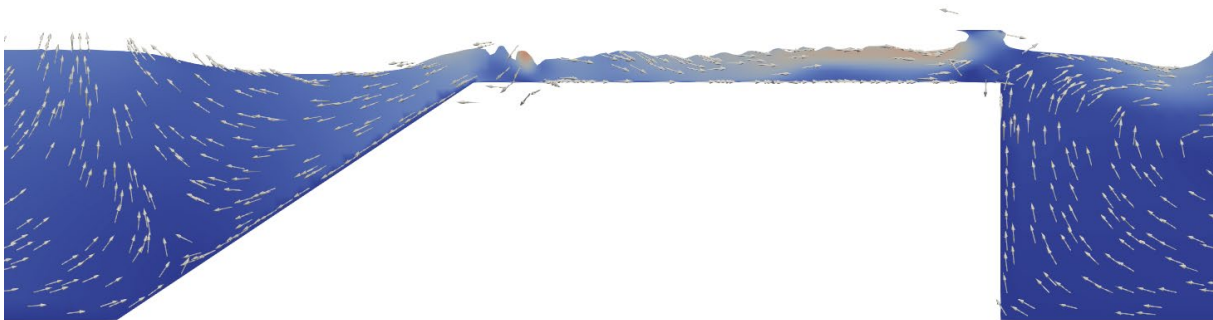


Slika 67 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka tijekom pojave grebena vala (b); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s

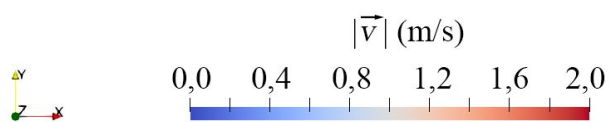
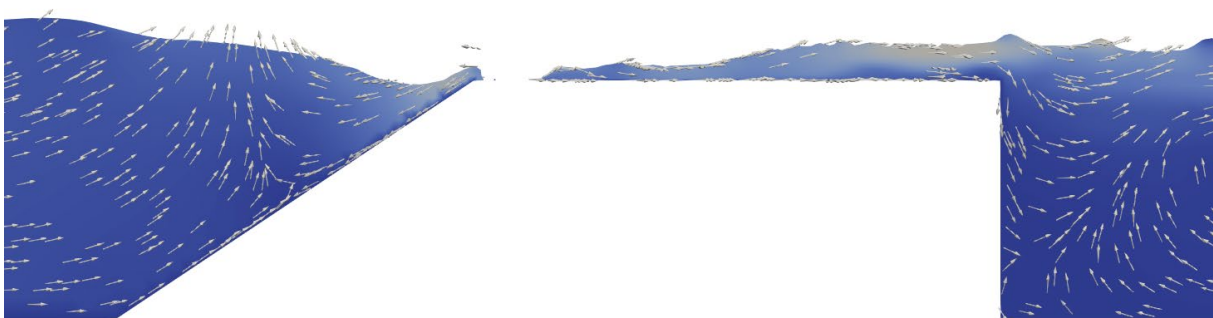
$t = 11,10 \text{ s}$



$t = 11,30 \text{ s}$



$t = 11,50 \text{ s}$

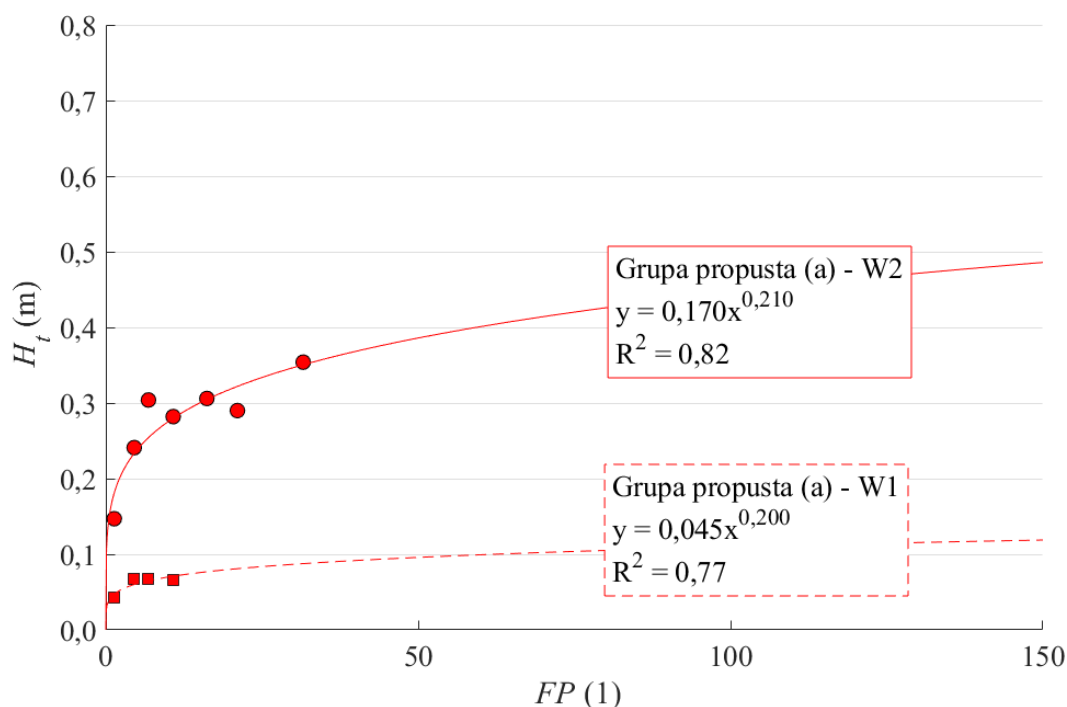


Slika 68 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka tijekom druge polovice perioda vala (b); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s

### 5.4.2.3 Utjecaj uronjenosti propusta na transmisiju valne energije

Potpuno uronjena grupa propusta (W1) dramatično umanjuje količinu transmisije valne energije u usporedbi s djelomično uronjenom grupom propusta (W2), jednako kako je uočeno za utjecaj uronjenosti na protok pod utjecajem valova (opisano u poglavlju 5.4.2.2) (Slika 69). Iako se može vidjeti kako transmisija valne energije raste s rastom fluks parametra (opisanog jednačbom (55), što je očekivano jer se radi onda o rastu valnih parametara, površine poprečnog presjeka grupe propusta i padu duljine grupe propusta) može se uočiti veća transmisija valne energije već pri najmanjim vrijednostima fluks parametra (Slika 69).

Polje vektora brzina ukazuje kako se unutar djelomično uronjenog propusta se uočava snažan jednosmjernan tok u trenutku kada brijeg vala pokrene i usmjeri vodnu masu prema zaštićenom akvatoriju (W2), radi čega mlaz vode formira valove unutar zaštićenog područja akvatorija (Slika 67 i Slika 68), dok kod potpuno uronjene grupe propusta (W1) se ne pojavljuje mlaz vode unutar propusta, već valovi pokreću vodu koja se nalazi unutar propusta.

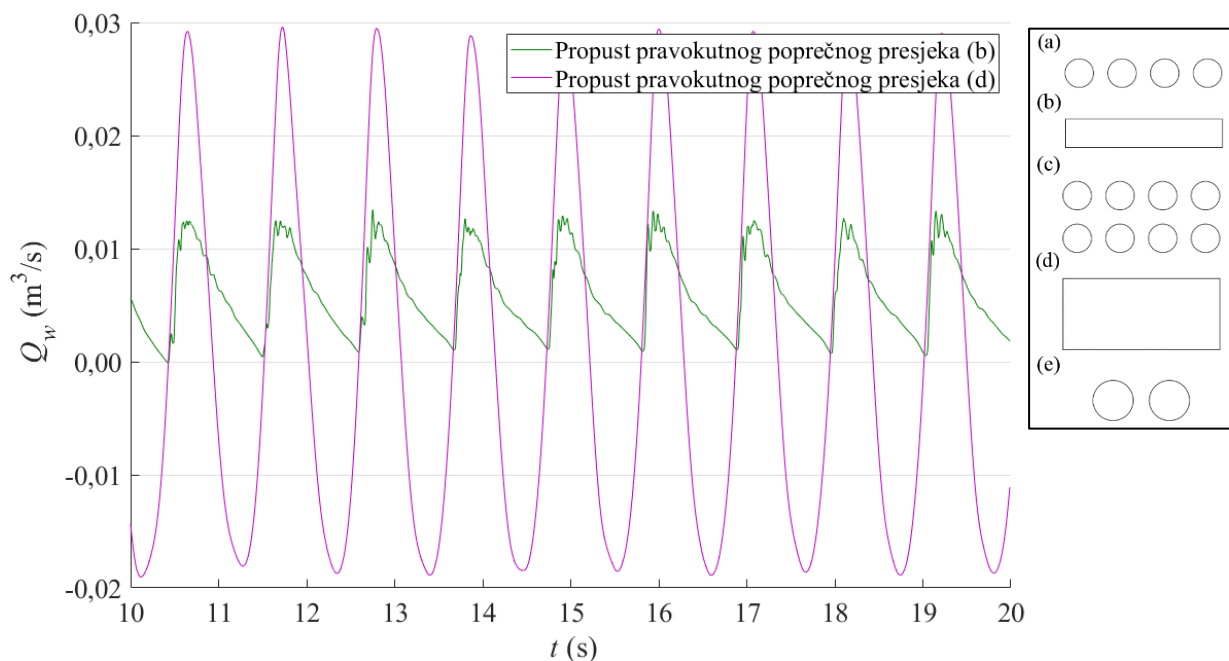


Slika 69 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) prema srednjoj transmitiranoj valnoj visini određenoj unutar mjernog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) kroz propust pod utjecajem valova za sve testove provedene na grupi propusta (a);  $FP$  je definiran jednačbom (55), u prirodnom mjerilu

#### 5.4.2.4 Utjecaj dubine mora unutar propusta na protok pri djelovanju valova

Incidentni valovi jednakih valnih parametara (valne visine i perioda) koji nailaze na djelomično uronjenu grupu propusta (W2) pravokutnog poprečnog presjeka čine bitno različito djelovanje ovisno o dubini mora unutar propusta (uspoređujući grupe propusta (b) i (d)). Ukoliko se promatra pravokutni propust u kojem je manja dubina mora, grupa propusta (b), greben vala formira mlaz vode lomom vala koji u konačnici uzrokuje jednosmjerni protok prema akvatoriju (Slika 71). Vremenska serija protoka koji se bilježi u sredini propusta je oscilatornog karaktera, dok vremenski osrednjena vrijednost ukazuje na neto protok u akvatorij u iznosu od  $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$  (Slika 70).

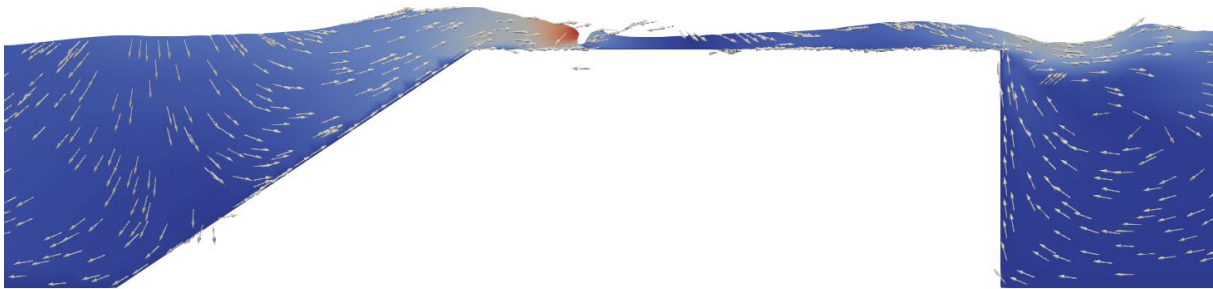
U slučaju propusta veće dubine mora unutar pravokutnog propusta (grupa propusta (d)) val se deformira iznad pličine koja je uzrokovana propustom ali ne dolazi do sloma vala (Slika 71). Valni profil koji se kreće kroz propust čini kružno oscilatorno gibanje vodnih čestica unutar propusta. Shodno oscilatornom gibanju vodnih čestica, uočava se oscilatorni signal protoka bilježen u sredini pravokutnog propusta (Slika 70). Za razliku od situacije gdje unutar propusta manje visine se stvara mlaz vode i time uzrokuje neto protok usmjeren prema akvatoriju, neto protok u slučaju propusta veće visine je bitno manji i iznosi  $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$ .



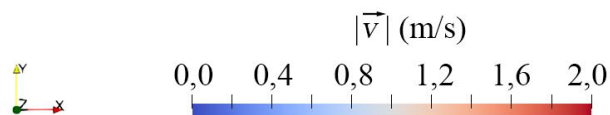
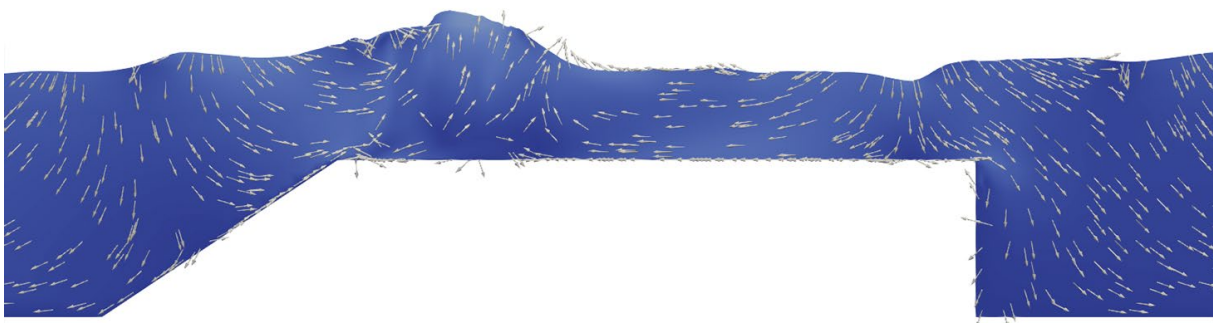
Slika 70 Vremenska serija protoka kroz propust uzrokovanog valovima ( $Q_w$ ) mjereno na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (b) i (d); zadana valna visina iznosi  $0,09 \text{ m}$ , te period  $1,32 \text{ s}$



$t = 10,70$  s



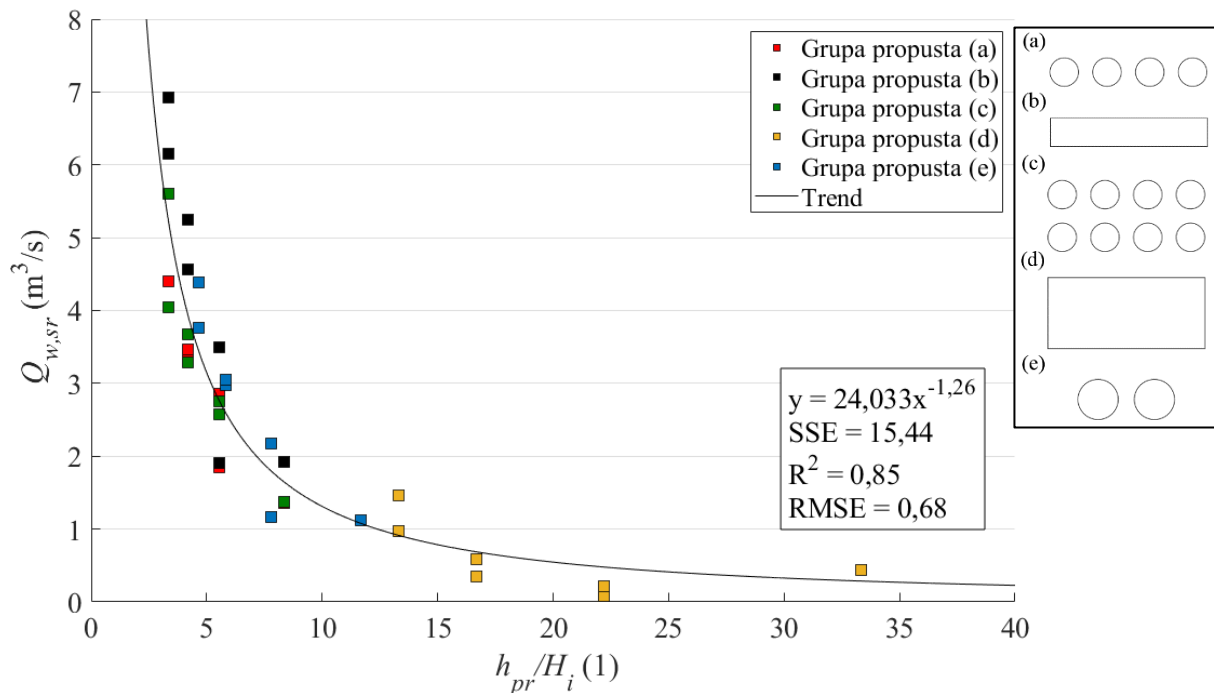
$t = 10,70$  s



Slika 71 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust pravokutnog poprečnog presjeka (b) i propust pravokutnog poprečnog presjeka veće visine (d); zadana valna visina iznosi 0,09 m, te period 1,32 s

Radi se o srednjem protoku koji je 30 puta manji u slučaju većeg propusta za iste parametre incidentnog valnog polja (Slika 70).

Jednak zaključak utjecaja dubine vode unutar propusta na protok koji se ostvaruje kroz propust se može izvući za sve testove provedene na grupama propusta (Tablica 10) pod utjecajem valova (Slika 72). Može se ustanoviti da smanjenjem odnosa dubine vode unutar grupe propusta i valne visine incidentnog vala raste neto protok kroz grupu propusta zbog loma vala na početku propusta, te posljedičnog mlaza vode koji se pojavljuje unutar propusta. U slučaju većih odnosa dubine vode unutar grupe propusta i valne visine incidentnog vala, ne dolazi do loma vala već valni profil u cijelosti prolazi kroz propust.

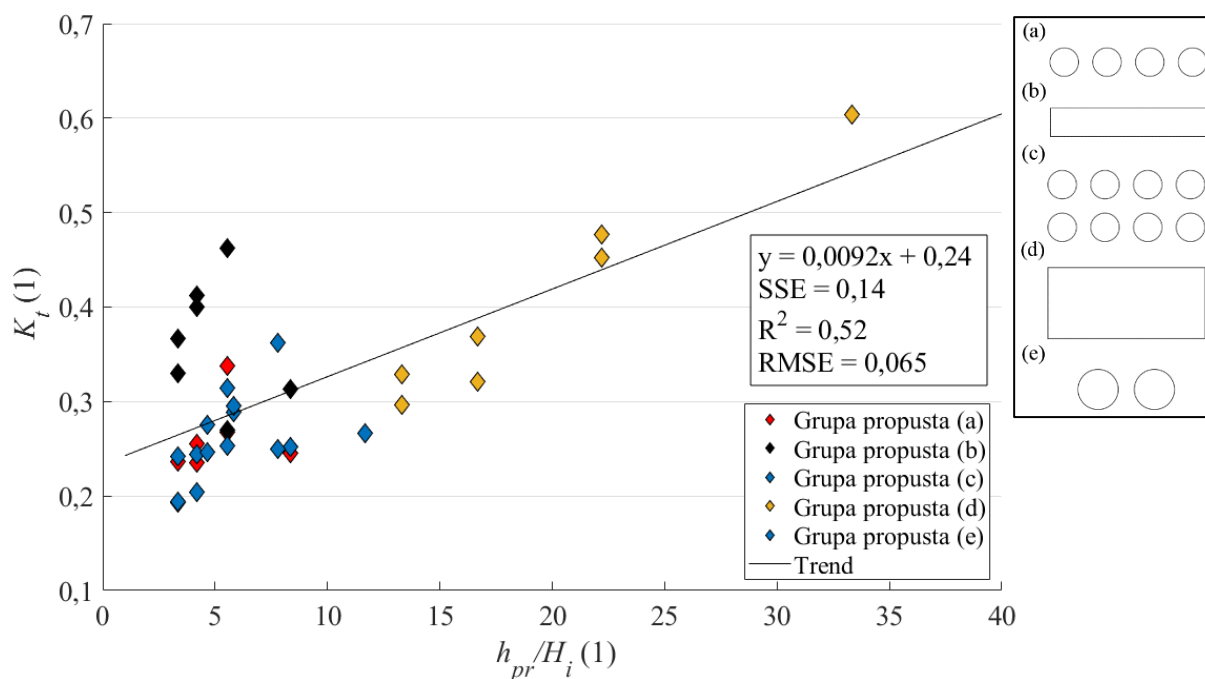


Slika 72 Odnos dubine unutar propusta ( $h_{pr}$ ) i valne visine incidentnog vala ( $H_i$ ) naspram neto protoka kroz propust uzrokovanog valovima ( $Q_{w,sr}$ ) za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja djelomično uronjene grupe propusta (W2) (Tablica 10); u prirodnom mjerilu

#### 5.4.2.5 Utjecaj dubine mora unutar propusta pod djelovanjem valova na koeficijent transmisije

Transmisija valne energije kroz propust u zaštićeni akvatorij uzrokovana je jednakim valnim parametrima za različite dubine vode unutar grupe propusta (Slika 73). Uzrok navedenom se objašnjava jednakim djelovanjem omjera dubine vode unutar grupe propusta i valne visine incidentnog vala kao u analizi neto protoka kroz propust (poglavlje 5.4.2.4). Smanjenjem odnosa dubine vode unutar grupe propusta i valne visine incidentnog vala pada transmisija valne energije kroz propust zbog loma vala na početku propuste, dok u slučaju rasta spomenutog odnosa valni profil se više ne lomi ispred grupe propusta već u cijelosti prolazi kroz grupu propusta (Slika 71).

Navedena opažanja ukazuju na nepovoljne hidrauličke karakteristike pravokutnog propusta veće dubine pod djelovanjem jednakih valova s obzirom na transmisiju valne energije (Slika 73) i neto protoka vodne mase kroz propust (Slika 72) pod djelovanjem valova kao generatora protoka.



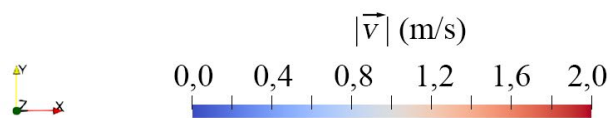
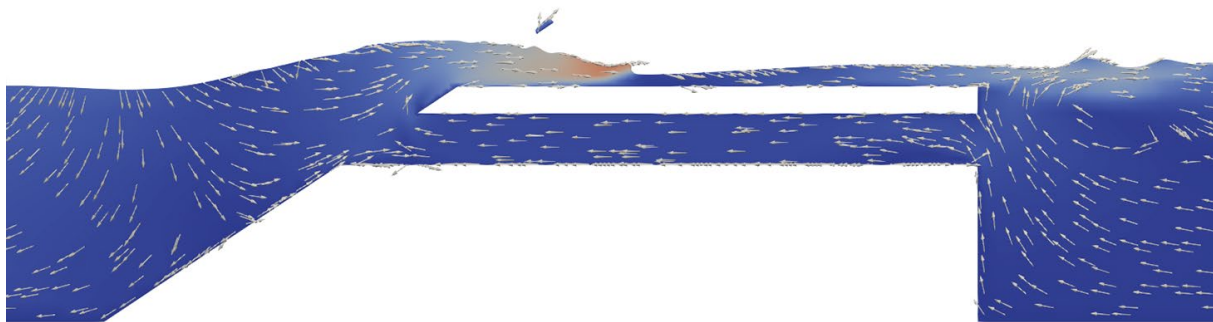
Slika 73 Odnos dubine unutar propust ( $h_{pr}$ ) i valne visine incidentnog vala ( $H_i$ ) naspram srednjeg koeficijentu transmisije unutar mjernog područja ( $K_t$ ) (Slika 63) za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja djelomično uronjene grupe propusta (W2) (Tablica 10); u prirodnom mjerilu

#### 5.4.2.6 Protok kroz grupu propusta postavljenu u dva reda

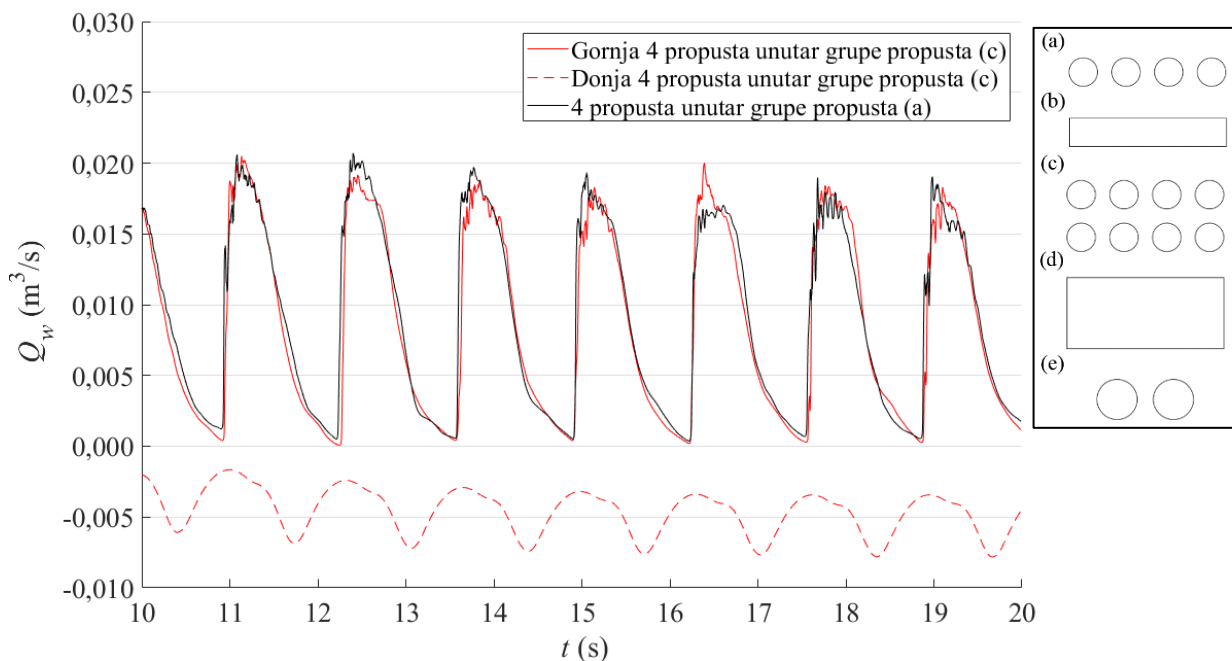
Opažanjem gibanja vodnih masa u slučaju grupe propusta od 8 kružnih propusta postavljenih u 2 reda (grupa propusta (c)), može se uočiti kako se mlaz vode pojavljuje uslijed grebena vala u propustima gornjeg reda slično već prethodno predstavljanim rezultatima propusta pravokutnog poprečnog presjeka (Slika 71). Kroz donji red propusta pojavljuje se tok vodne mase u suprotnom smjeru s obzirom na smjer toka u gornjem redu propusta (Slika 74). Prema polju vektora brzina određenih unutar ravnine uzdužnog presjeka numeričkog modela, uočava se kako dolazi do kružnog gibanja vodne mase unutar akvatorija koje je pokrenuto snažnim mlazom koji izlazi iz gornjeg reda propusta. Vodna masa koja ulazi u akvatorij kroz gornji red propusta inercijom nastavlja u smjeru kretanja kakav je bio definiran unutar propusta s neto protokom u iznosu od  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  (Slika 75). Stoga, vodna masa koja ulazi u akvatorij ne izlazi odmah iz akvatorija kroz donji red propusta već se formiraju kružne cirkulacijske ćelije koje su reda veličine polovice dužine propusta. Jednako oscilatorno ponašanje i količine neto protoka vodne mase kao kod gornjeg reda propusta je uočeno u slučaju grupe propusta gdje je prisutan samo gornji red propusta (grupa propusta (a)), što ukazuje da količina vodne mase koja se pronosi kroz gornji red propusta ima mali utjecaj na količinu vodne mase koja prolazi kroz

donji reda propusta. Vodna masa koja izlazi iz akvatorija kroz donji red propusta povlači vodnu masu iz donjeg sloja unutar akvatorija s neto protokom u iznosu od  $-0,006 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$t = 10,80 \text{ s}$



Slika 74 Uzdužni presjek numeričkog modela kroz djelomično uronjeni propust kružnog poprečnog presjeka u dva reda (c); zadana valna visina iznosi  $0,09 \text{ m}$ , te period  $1,32 \text{ s}$



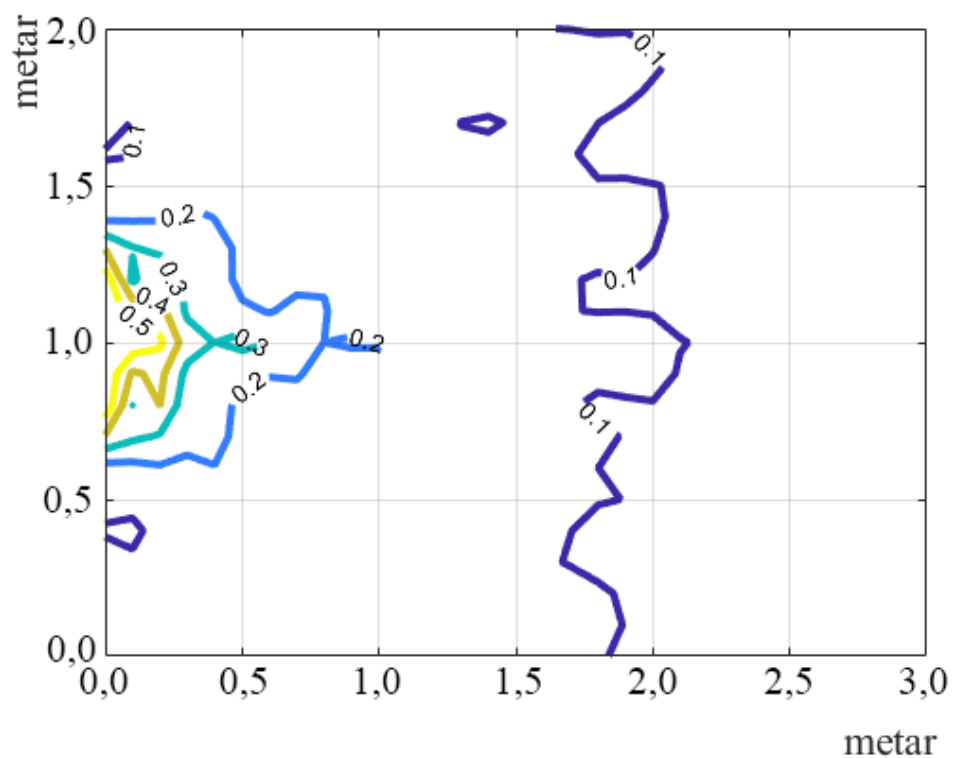
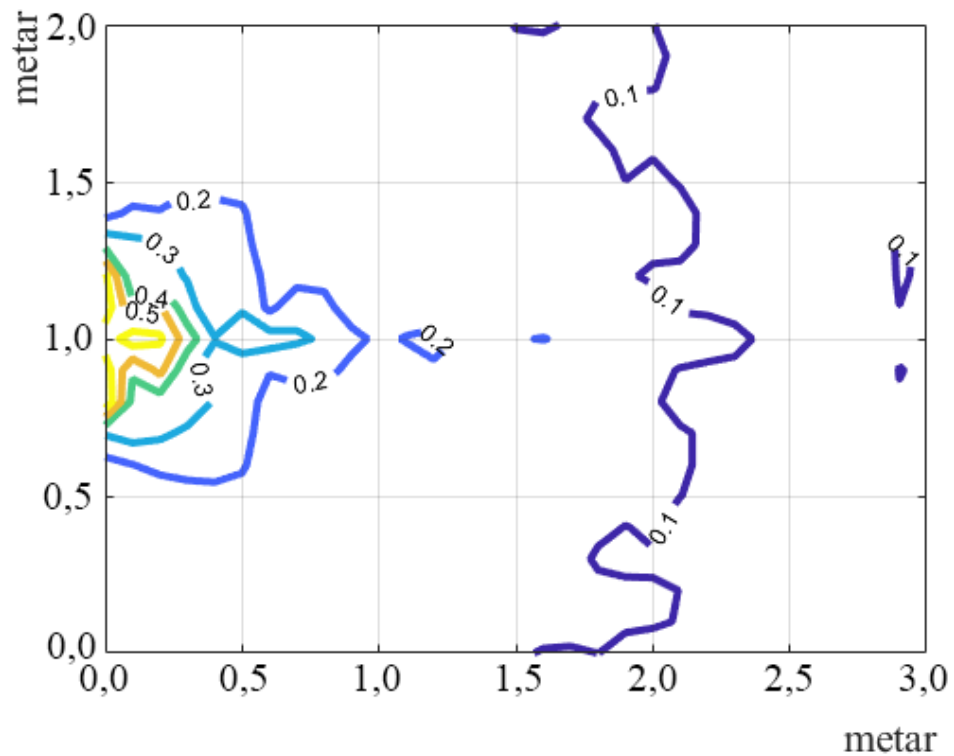
Slika 75 Vremenska serija protoka ( $Q_w$ ) kroz propust uzrokovanog valovima mjereno na polovici propusta pravokutnog poprečnog presjeka (a) i (c) pod utjecajem valova (visina iznosi  $0,09 \text{ m}$ , te period  $1,32 \text{ s}$ )

#### **5.4.2.7 Transmisija valova kroz grupu propusta postavljenu u dva reda**

Uspoređujući polja koeficijenta transmisije koje se pojavljuje unutar zaštićenog akvatorija, može se uočiti kako se radi o relativno sličnoj količini pronosa valne energije u zaštićeni akvatorij kroz propust uzrokovanj valovima jednakih parametara (Slika 76). Srednji koeficijenti transmisije unutar prethodno određenog mjernog područja u neposrednoj blizini propusta za grupu propusta u dva reda iznosi 0,31, dok za grupu propusta u jednom redu iznosi 0,35. Radi se o razlici od oko 10% između dviju grupa propusta, gdje donji red propusta unutar grupe propusta u dva reda stvara određeno reduciranje transmisije valne energije. Jednak efekt manje valne transmisije za grupu propusta u dva reda nego grupe propusta u jednom redu je prepoznat za sve testirane slučajeve incidentnih valnih polja (Slika 78).

Grupa propusta koja se sastoji od 8 kružnih propusta u dva reda (grupa propusta (c)) se pokazala kao efikasnije rješenje u slučaju utjecaja valova za razliku od grupe propusta koja se sastoji od 4 kružna propusta u jednom redu (grupa propusta (a)) jer je transmisije valne energije manja za 10-15%, dok u donjem redu propusta se omogućava izlaz vodne mase u pridnom sloju akvatorija.

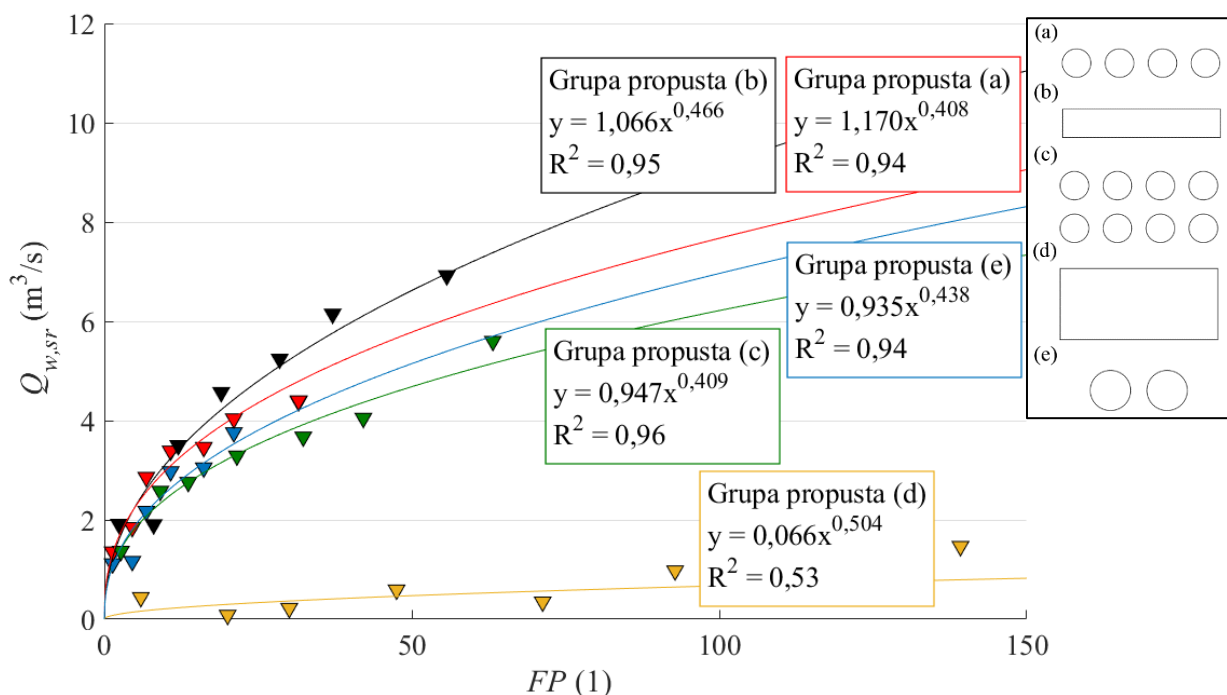
Grupa propusta koja se sastoji od 2 kružna propusta (čiji je polumjer dvostruko veći nego što je u slučaju za grupe propusta (a) i (c)) fenomenološki se ne razlikuje od hidrodinamike prikazane za djelomično uronjene grupe propusta koja se sastoji od jednog reda propusta kružnih poprečnih presjeka.



Slika 76 Polje koeficijenata transmisije unutar zaštićenog područja za grupu propusta (a) i (c); flocrtna os grupe propusta postavljena je na koordinatama (0,10), te je smjer grupe propusta paralelan s smjerom apscise; val valne visine 0,09 m i period 1,32 s

### 5.4.2.8 Matematički obrasci za predviđanje protoka pod utjecajem valova

Fluks parametar se pokazao kao vrijedan parametar za procjenu neto protoka kroz grupu propusta pod utjecajem valova (Slika 77). Dok većina testiranih oblikovanja grupe propusta pokazuju slične trendove, za slučaj propusta pravokutnog poprečnog presjeka veće dubine vode u propust (odnosno grupa propusta (d)) mogu se očekivati zanemarive količine protoka (Slika 77). Uočava se kako bez obzira na parametre incidentnog vala, neto protok kroz grupu propusta (d) je zanemarivo mali u odnosu na zabilježene neto protoke ostalih oblikovanja grupe propusta. S obzirom da trend podataka neto protoka za grupu propusta (d) ne prati ostale trendove opisane eksponencijalnim funkcijama, ne može se izvesti jednadžba za procjenu neto protoka kroz opće oblikovanje grupe propusta. Utjecaj koji se može očitovati usporedbom grupe propusta (a) i (e) je odnos dubine vode unutar propusta i valne visine incidentnog vala (utjecaj opisan u poglavljima 5.4.2.4 i 5.4.2.5). Za grupu propusta (e) za koju je veća dubina mora unutar propusta u odnosu na grupu propusta (a) (0,07 m prema 0,05 m u laboratorijskom mjerilu, odnosno 0,7 m prema 0,5 m u prirodnom mjerilu) pri jednakim incidentnim valovima, ostvaruje se manji neto protok vodne mase (Slika 77). Isti utjecaj odnosa dubine vode u propustu i valne visine incidentnog vala na neto protok kroz propust se može uočiti pri usporedbi grupe propusta (b) i (d).



Slika 77 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i neto protoka ( $Q_{w, sr}$ ) kroz propust uzrokovanog valovima za pojedine testove provedene u okviru numeričkog modeliranja grupe propusta; prirodno mjerilo

Provučene eksponencijalne jednadžbe kroz opažene podatke unutar numeričkog modela fiksirane su na srednji neto protok kroz propust u iznosu od 0 m<sup>3</sup>/s za fluks parametar u iznosu od 0 (Slika 77). Navedeno se smatra fizički logično s obzirom da za incidentni val valne visine od 0 m se očekuje neto protok kroz propust u iznosu od 0 m<sup>3</sup>/s. Za grupu propusta (c) u okviru funkcijske analize (Slika 77) je uzet u obzir samo neto protok kroz gornji red propusta. Pregled svih rezultata vezanih za protok vodne mase pod utjecajem valova, u prirodnom mjerilu, prezentiran je u tabličnom obliku (Tablica 16).

Tablica 16 Rezultati osrednjenog neto protoka kroz grupu propusta koristeći se numeričkim modelom valovanja; rezultati prikazani u prirodnom mjerilu

Grupa propusta	Broj testa	$H_i$ (m)	$L$ (m)	$T$ (s)	$Q_{w,sr}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{w,sr2}$ (m <sup>3</sup> /s)	Razina vode
Grupa propusta (a)	1	0,60	12,00	2,77	-0,468	-	W1
	2	0,90	18,00	3,40	0,214	-	W1
	3	0,90	27,00	4,16	0,438	-	W1
	4	1,20	24,00	3,92	0,468	-	W1
	5	0,60	12,00	2,77	1,357	-	W2
	6	0,90	18,00	3,40	1,850	-	W2
	7	0,90	27,00	4,16	2,860	-	W2
	8	1,20	24,00	3,92	3,389	-	W2
	9	1,20	36,00	4,80	3,462	-	W2
	10	1,50	30,00	4,38	4,038	-	W2
	11	1,50	45,00	5,37	4,400	-	W2
Grupa propusta (b)	12	0,60	12,00	2,77	0,025	-	W1
	13	0,90	18,00	3,40	-0,307	-	W1
	14	0,90	27,00	4,16	-0,120	-	W1
	15	1,20	24,00	3,92	0,631	-	W1
	16	0,60	12,00	2,77	1,915	-	W2
	17	0,90	18,00	3,40	1,905	-	W2
	18	0,90	27,00	4,16	3,500	-	W2
	19	1,20	24,00	3,92	4,569	-	W2
	20	1,20	36,00	4,80	5,241	-	W2
	21	1,50	30,00	4,38	6,148	-	W2
	22	1,50	45,00	5,37	6,922	-	W2
Grupa propusta (c)	23	0,60	12,00	2,77	-0,390	0,110	W1
	24	0,90	18,00	3,40	-0,180	0,210	W1
	25	0,90	27,00	4,16	-0,300	0,130	W1
	26	1,20	24,00	3,92	0,150	-0,600	W1
	27	0,60	12,00	2,77	1,370	-0,630	W2
	28	0,90	18,00	3,40	2,579	-1,050	W2
	29	0,90	27,00	4,16	2,759	-1,530	W2
	30	1,20	24,00	3,92	3,290	-1,750	W2

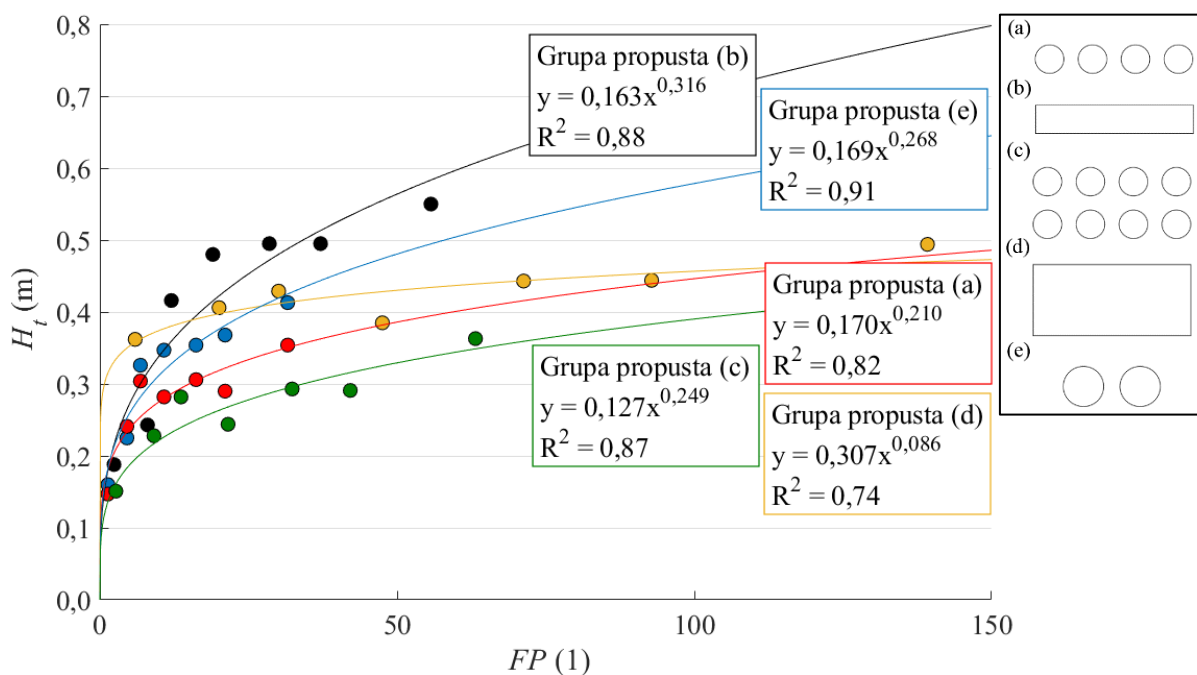


	31	1,20	36,00	4,80	3,672	-2,130	W2
	32	1,50	30,00	4,38	4,050	-2,640	W2
	33	1,50	45,00	5,37	5,600	-3,190	W2
Grupa propusta (d)	34	0,60	12,00	2,77	0,136	-	W1
	35	0,90	18,00	3,40	-0,138	-	W1
	36	0,90	27,00	4,16	-1,120	-	W1
	37	1,20	24,00	3,92	-1,811	-	W1
	38	0,60	12,00	2,77	0,440	-	W2
	39	0,90	18,00	3,40	0,083	-	W2
	40	0,90	27,00	4,16	0,220	-	W2
	41	1,20	24,00	3,92	0,590	-	W2
	42	1,20	36,00	4,80	0,350	-	W2
	43	1,50	30,00	4,38	0,978	-	W2
	44	1,50	45,00	5,37	1,468	-	W2
Grupa propusta (e)	45	0,60	12,00	2,77	-0,424	-	W1
	46	0,90	18,00	3,40	-0,540	-	W1
	47	0,90	27,00	4,16	-0,916	-	W1
	48	1,20	24,00	3,92	-0,926	-	W1
	49	0,60	12,00	2,77	1,118	-	W2
	50	0,90	18,00	3,40	1,166	-	W2
	51	0,90	27,00	4,16	2,176	-	W2
	52	1,20	24,00	3,92	2,974	-	W2
	53	1,20	36,00	4,80	3,050	-	W2
	54	1,50	30,00	4,38	3,760	-	W2
	55	1,50	45,00	5,37	4,383	-	W2

### 5.4.2.9 Matematički obrasci za predviđanje transmitirane valne energije

Ako promatramo odnos fluks parametar definiranog jednadžbom (55) i srednje transmitirane valne visine unutar prethodno definiranog mjernog područja (Slika 63), može se ustanoviti funkcijska veza između njih (Slika 78). Prilagođene eksponencijalne jednadžbe kroz opažene podatke unutar numeričkog modela fiksirane su na srednju transmitiranu valnu visinu u iznosu od 0 m za fluks parametar u iznosu od 0. Navedeno se smatra fizički logično s obzirom da za incidentni val valne visine od 0 m se očekuje transmitirana valna visina također u iznosu od 0 m.

Utjecaj koji se može očitovati usporedbom grupe propusta (a) i (e) je odnos dubine vode unutar propusta i valne visine incidentnog vala (utjecaj opisan u poglavljima 5.4.2.4 i 5.4.2.5). Za grupu propusta (e) za koju je veća dubina mora unutar propusta u odnosu na grupu propusta (a) (0,07 m prema 0,05 m u laboratorijskom mjerilu, odnosno 0,7 m prema 0,5 m u prirodnom mjerilu) pri jednakim incidentnim valovima, ostvaruje se veća transmisija valne energije (Slika 77). Isti utjecaj odnosa dubine vode u propustu i valne visine incidentnog vala na transmisiju valne energije se ne može uočiti pri usporedbi grupe propusta (b) i (d).



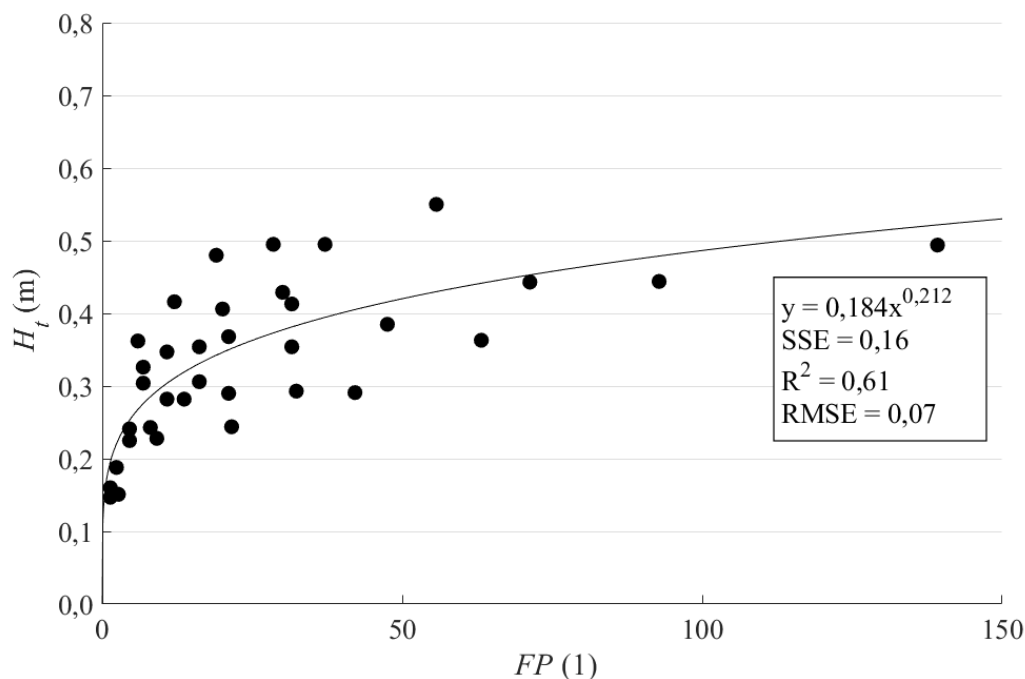
Slika 78 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i srednje transmitirane valne visine unutar prethodno definiranog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) za pojedine testove po pojedinim ispitivanim oblikovanjima grupe propusta provedene u okviru numeričkog modeliranja; u prirodnom mjerilu

Razlog navedenom može biti visinska pozicija grupe propusta (d) s obzirom na srednju razinu vode koja je jednaka kao kod grupe propusta (c) (Slika 31). Za grupu propusta (d) dolazi do interakcije između gornjeg ruba propusta i grebena vala jednako brzo kao kod grupe propusta (b). Navedeno nije slučaj tijekom usporedbe grupe propusta (a) i (e) gdje je za obje grupe propusta razina vode postavljena pri osi propusta i time je omogućena veća visina između srednje razine i gornjeg ruba propusta kod grupe propusta (e) nego što je to slučaj kod grupe propusta (a). Navedeni utjecaj je još potrebno istražiti u budućim istraživanjima.

Prilagođena eksponencijalna funkcija sa zadovoljavajućom preciznošću procjenjuje srednju transmitiranu valnu visinu unutar mjernog područja (Slika 63) u neposrednoj blizini propusta pomoću fluks parametra za opći oblik djelomično uronjene grupe propusta (Slika 79):

$$H_t = 0,184FP^{0,212} \quad (56)$$

dok jednadžbe definirane i prikazane u sklopu prethodnog grafa (Slika 78) preciznije mogu procijeniti srednju vrijednost transmitirane valne visine po pojedinom oblikovanju grupe propusta. Pregled svih rezultata vezanih za protok vodne mase pod utjecajem valova, u prirodnom mjerilu, prezentiran je u tabličnom obliku (Tablica 17).



Slika 79 Odnos fluks parametra ( $FP$ ) i srednje transmitirane valne visine unutar prethodno definiranog područja ( $H_t$ ) (Slika 63) za pojedine provedene testove za grupe propusta

Tablica 17 Rezultati srednje transmisije valne energije unutar mjernog područja (Slika 63) kroz grupu propusta koristeći se numeričkim modelom valovanja; rezultati prikazani u prirodnom mjerilu

Grupa propusta	Broj testa	$H_i$ (m)	$L$ (m)	$T$ (s)	$K_r(1)$	$H_r$ (m)	Razina vode
Grupa propusta (a)	1	0,60	12,00	2,77	0,072	0,004	W1
	2	0,90	18,00	3,40	0,074	0,007	W1
	3	0,90	27,00	4,16	0,075	0,007	W1
	4	1,20	24,00	3,92	0,055	0,007	W1
	5	0,60	12,00	2,77	0,245	0,015	W2
	6	0,90	18,00	3,40	0,268	0,024	W2
	7	0,90	27,00	4,16	0,338	0,030	W2
	8	1,20	24,00	3,92	0,235	0,028	W2
	9	1,20	36,00	4,80	0,255	0,031	W2
	10	1,50	30,00	4,38	0,193	0,029	W2
	11	1,50	45,00	5,37	0,236	0,035	W2
Grupa propusta (b)	12	0,60	12,00	2,77	0,164	0,010	W1
	13	0,90	18,00	3,40	0,129	0,012	W1
	14	0,90	27,00	4,16	0,151	0,014	W1
	15	1,20	24,00	3,92	0,104	0,012	W1
	16	0,60	12,00	2,77	0,313	0,019	W2
	17	0,90	18,00	3,40	0,270	0,024	W2
	18	0,90	27,00	4,16	0,462	0,042	W2
	19	1,20	24,00	3,92	0,400	0,048	W2
	20	1,20	36,00	4,80	0,412	0,049	W2
	21	1,50	30,00	4,38	0,330	0,050	W2
	22	1,50	45,00	5,37	0,367	0,055	W2
Grupa propusta (c)	23	0,60	12,00	2,77	0,065	0,004	W1
	24	0,90	18,00	3,40	0,080	0,007	W1
	25	0,90	27,00	4,16	0,091	0,008	W1
	26	1,20	24,00	3,92	0,067	0,008	W1
	27	0,60	12,00	2,77	0,252	0,015	W2
	28	0,90	18,00	3,40	0,253	0,023	W2
	29	0,90	27,00	4,16	0,314	0,028	W2
	30	1,20	24,00	3,92	0,204	0,024	W2
	31	1,20	36,00	4,80	0,244	0,029	W2
	32	1,50	30,00	4,38	0,194	0,029	W2
	33	1,50	45,00	5,37	0,242	0,036	W2
Grupa propusta (d)	34	0,60	12,00	2,77	0,229	0,014	W1
	35	0,90	18,00	3,40	0,169	0,015	W1
	36	0,90	27,00	4,16	0,224	0,020	W1
	37	1,20	24,00	3,92	0,144	0,017	W1
	38	0,60	12,00	2,77	0,604	0,036	W2
	39	0,90	18,00	3,40	0,452	0,041	W2
	40	0,90	27,00	4,16	0,477	0,043	W2
	41	1,20	24,00	3,92	0,321	0,038	W2

	42	1,20	36,00	4,80	0,369	0,044	W2
	43	1,50	30,00	4,38	0,296	0,044	W2
	44	1,50	45,00	5,37	0,329	0,049	W2
Grupa propusta (e)	45	0,60	12,00	2,77	0,066	0,004	W1
	46	0,90	18,00	3,40	0,069	0,006	W1
	47	0,90	27,00	4,16	0,067	0,006	W1
	48	1,20	24,00	3,92	0,048	0,006	W1
	49	0,60	12,00	2,77	0,266	0,016	W2
	50	0,90	18,00	3,40	0,250	0,023	W2
	51	0,90	27,00	4,16	0,362	0,033	W2
	52	1,20	24,00	3,92	0,289	0,035	W2
	53	1,20	36,00	4,80	0,295	0,035	W2
	54	1,50	30,00	4,38	0,246	0,037	W2
	55	1,50	45,00	5,37	0,275	0,041	W2

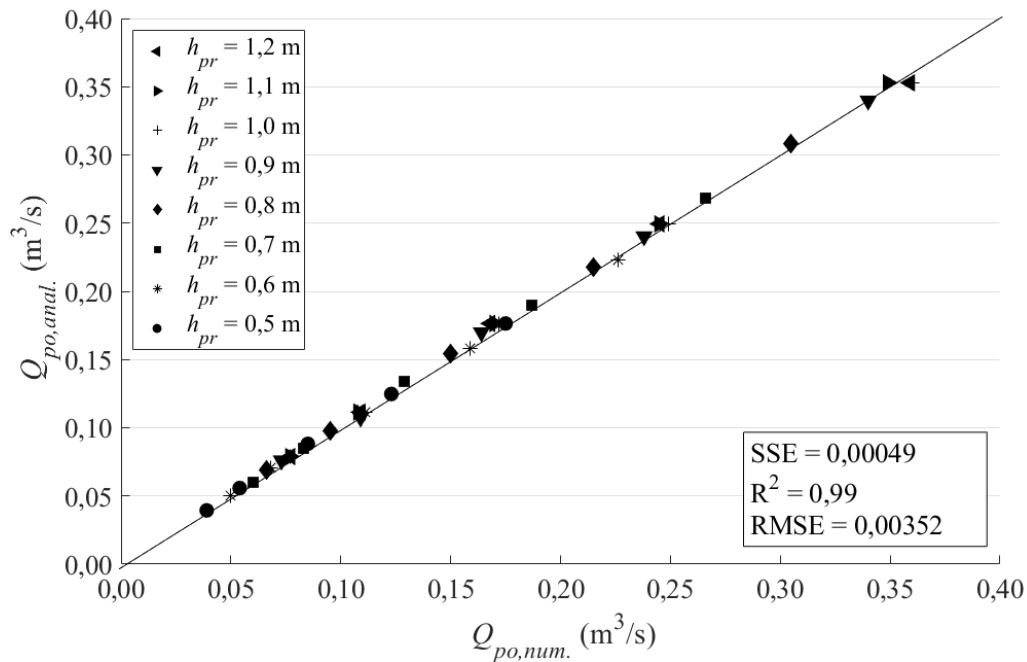
## **5.5 Numeričko modeliranje protjecanja kroz propust uzrokovanog plimnim oscilacijama**

Numerički model temeljen na predstavljenoj matematičkoj formulaciji i kriterijima modela (početni i rubni uvjeti, domena modela, Courantov broj, itd.) unutar poglavlja 4.4.3, potrebno najprije validirati usporedbom vrijednosti protoka u stacionarnom stanju numeričkog modela i vrijednosti protoka određenog pomoću analitičke jednadžbe (9) (Tablica 11). Zatim će se koristeći validiranim numeričkim modelom ispitivati volumen vodne mase koji prolazi kroz propust tijekom referentnog vremena različitih geometrijskih oblikovanja grupe propusta s obzirom na zadanu visinsku razliku vodnog lica između dviju strana grupe propusta.

### **5.5.1 Validacija numeričkog modela pomoću analitičkog modela**

U svrhu validacije modela testirati će se niz slučajeva s jednim propustom kružnog poprečnog presjeka s dubinom variranom od 0,5 m do 1,2 m s diskretizacijom po 0,1 m (mjereno od dna propusta promjera 1 m) u kombinaciji s 5 različitih  $\Delta H$  koji iznose 0,001 m, 0,002 m, 0,005 m, 0,01 m, 0,02 m (sveukupan broj testova za validaciju iznosi 40) kako je opisano u okviru poglavlja 4.4.3.3 (Tablica 11). Testovi su se provodili za propust duljine 10 m. Nadalje će se usporediti vrijednosti protoka unutar propusta za stacionarno stanje između numeričkog modela i analitičkog modela (Slika 80).

Unutar numeričkog modela zadala se apsolutna hrapavost jednaka za sve testove u iznosu 0,005 m što odgovara grubom betonu, a pomoću jednadžbe (44) se može odrediti ekvivalent u obliku Manningovog koeficijenta hrapavosti koji se koristi unutar analitičkog modela u iznosu od  $0,016 \text{ s/m}^{1/3}$ . Dinamička viskoznost tekućine unutar numeričkog modela odgovara slatkoj vodi pri 20 °C, koja iznosi  $1,002 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ . 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, a za koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu je razumno definirani vrijednost 0,6 (Tullis i Robinson, 2008). Vrijednosti koje opisuju geometriju propusta unutar analitičke formule poput hidrauličkog radijusa, površine poprečnog presjeka propusta i dužine propusta usklađene su s geometrijom propusta unutar numeričkog modela i prisutnom razinom vodnog lica.



Slika 80 Usporedba protoka određenog pomoću numeričkog modela ( $Q_{po,num}$ ) opisanog u poglavlju 4.4.3 i analitičke jednadžbe ( $Q_{po,anal}$ ) (9)

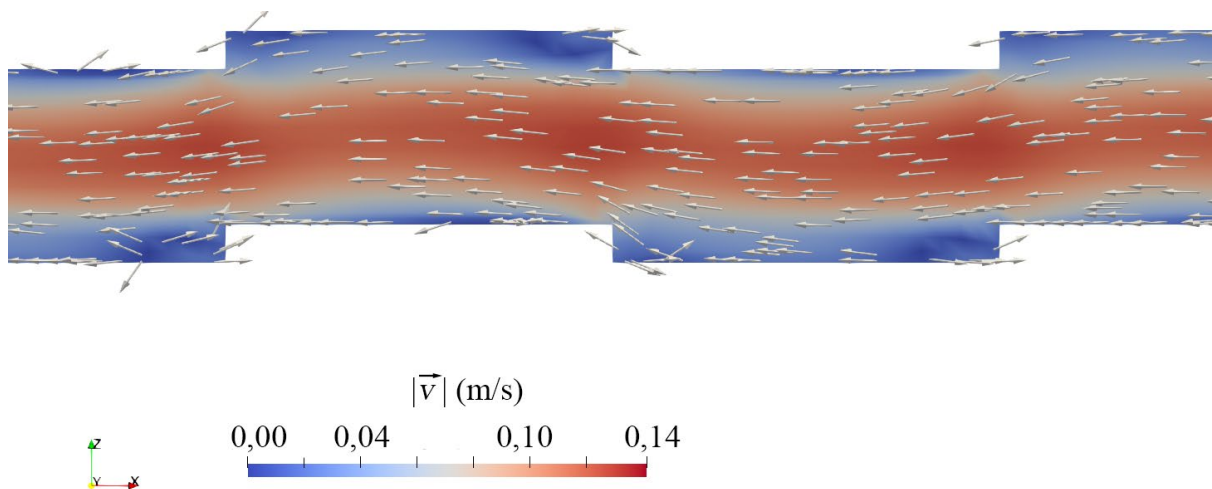
Uzimajući u obzir minimalnu grešku između analitičkog i numeričkog modela (statistički indikator RMSE iznosi 0,00352), može se zaključiti, iz provedenih testova, da numerički model precizno procjenjuje protok vodne mase kroz propust, unutar okvira i uvjeta za koje se smatra da je i sam analitički model iskazan jednadžbom (9) točan i precizan (U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2012).

### 5.5.2 Usporedba numeričkog modela i terenskih mjerenja

Ronilačkim pregledom propusta u ACI marini Opatija, uočena brojna slijeganja cijevnih sekcija propusta unutar lukobrana su često do 0,2 m (Slika 81). Stoga će uspostaviti numerički model propusta cijevnog profila promjera 1 m i dužine 18 m (dimenzije koje odgovaraju propustu u ACI marini Opatija) u kojem su 4 sekcije propusta dužine po 2 metra izmahnute za 0,2 m u vertikalnom smjeru. Modelom će se pokušati odrediti utjecaj oštećenja na protočnost propusta (Slika 82).



Slika 81 Fotografija slijeganja cijevnih sekcija propusta u ACI marini Opatija što može utjecati na protočnost kroz propust uslijed plime i oseke



Slika 82 Uzdužni presjek numeričkog modela propusta s izmaknutim sekcijama po uzoru na propust u ACI marini Opatija pod utjecajem plimnih oscilacija

Vrijednost protoka određena koristeći se numeričkim modelom će se usporediti s izmjerenim vrijednostima protoka koje su ostvarene kroz propust na terenu i predstavljene u okviru poglavlja 5.2.1.1 i 5.2.2. U svrhu definiranja statistički mjerodavne vrijednosti protoka uzrokovane samo plimnim oscilacijama u ACI marini Opatija provest će se slijedeća metoda. Visinska razlika između razine vodnih lica s dviju različitih strana propusta ( $\Delta H$ ) u ACI marina Opatija je određena statističkom metodom koja je prethodno opisana unutar poglavlja 5.2.1.

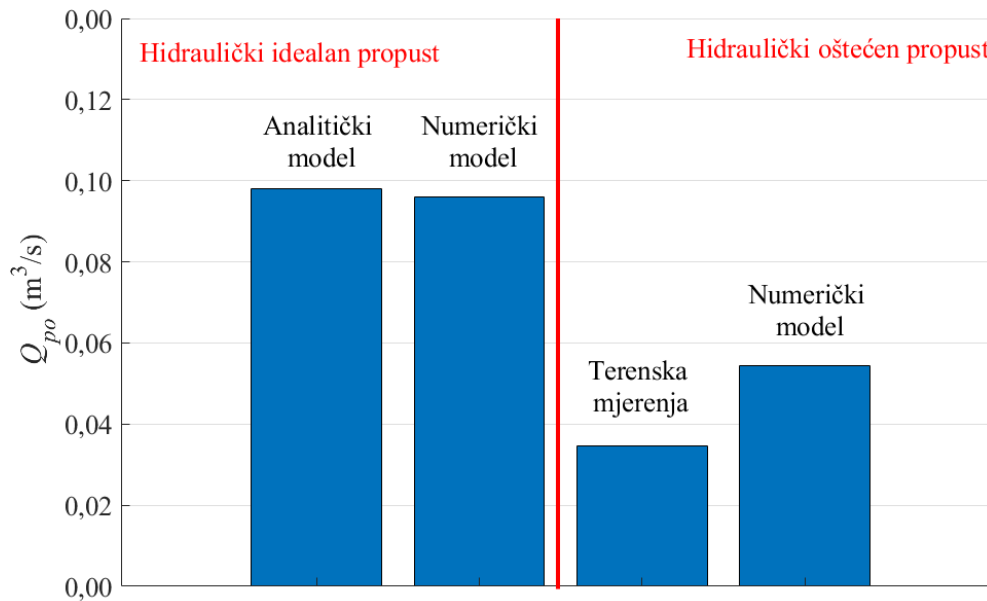


Zatim su za sate unutar vremenske serije mjerene na terenu kada je visinska razlika potopljenog propusta u rasponu od  $0,026 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m}$  (medijan svih opaženih nagiba u ACI marini Opatija proračunat u okviru poglavlja 5.2.1.1) uzeti pripadajući satni mjereni protoci kako bi se formirao novi skup. Iz novog skupa su isključene vrijednosti protoka u vrijeme kojih je izmjerena brzina vjetra bila veća od  $1 \text{ m/s}$  i značajna valna visina iznad  $0,1 \text{ m}$  (kako bi se isključili mjereni protoci kroz propust koji su pod utjecajem drugih generatora). Od preostalog skupa vrijednosti protoka se izračunala srednja vrijednost protoka unutar propusta mjerena pomoću PCM uređaja koji će poslužiti u validaciji numeričkog modela s mjerenjima na terenu. Odlučilo se na uprosječenu vrijednost protoka kroz propust za nagib  $0,026 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m}$  kako bi se umanjili ostali utjecaji na protjecanje kroz propust poput slatkovodnih izvora, atmosferske prilike, prolaz plovila i dr. za koje nisu dostupni mjereni podaci.

Viskoznost tekućine unutar numeričkog modela će se uzeti u vrijednost koja odgovara morskoj vodi slanosti 35 PSU i temperaturi od  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  te koja iznosi  $1,307 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , a apsolutna hrapavost će se uzeti u vrijednosti od  $2 \text{ cm}$  jer se takva smatra bliskom stvarnom stanju propusta.

S lijeve strane je prikazan protok, koji se ostvaruje kroz hidraulički neoštećenu uronjenu grupu propusta od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu, proračunat analitičkom jednadžbom (9) i proračunat koristeći se numeričkim modelom (Slika 83). S desne strane je prikazan protok koji se ostvaruje na terenu za hidraulički oštećenu grupu propusta (prikazanih na Slika 81 i Slika 82) i za replicirano stanje oštećenja unutar numeričkog modela (Slika 83). Prema rezultatima numeričkog modela, uočava se značajno smanjenje protoka pod utjecajem konstantne visinske razlike vodnog lica uslijed oštećenja propusta u iznosu od 45% u odnosu na hidraulički idealan propust (Slika 83). Terenska mjerenja protoka vodne mase kroz propust ukazuju na još manji protok u ACI marini Opatija u odnosu na vrijednost koja je određena numeričkim modelom u iznosu od 36% u odnosu od numeričke vrijednosti protoka kroz oštećenu grupu propusta. Razlika između numeričkog modela i terenskih mjerenja govori kako postoje utjecaji na protjecanje koji ovim numeričkim modelom nisu uzeti u obzir i djeluju kao dodatni linijski ili lokalni gubitak energije.

Numerički model za protjecanje morske vode kroz propust pod utjecajem plimnih oscilacija je uspoređen i uspješno validiran prema analitičkom modelu i terenskim mjerenjima, te se smatra prikladnim za ispitivanje utjecaja plimnih oscilacija na grupu propusta ugrađenih u lukobran.



Slika 83 Usporedba protoka kroz potpuno uronjenu grupu propusta uslijed plimnih oscilacija kod hidraulički idealnog i oštećenog propusta (ACI marina Opatija),  $\Delta H = 0,0026$  m, dužina propusta iznosi 18 m, apsolutna hrapavost 2 cm

### 5.5.3 Numeričko modeliranje grupe propusta pod utjecajem plimnih oscilacija

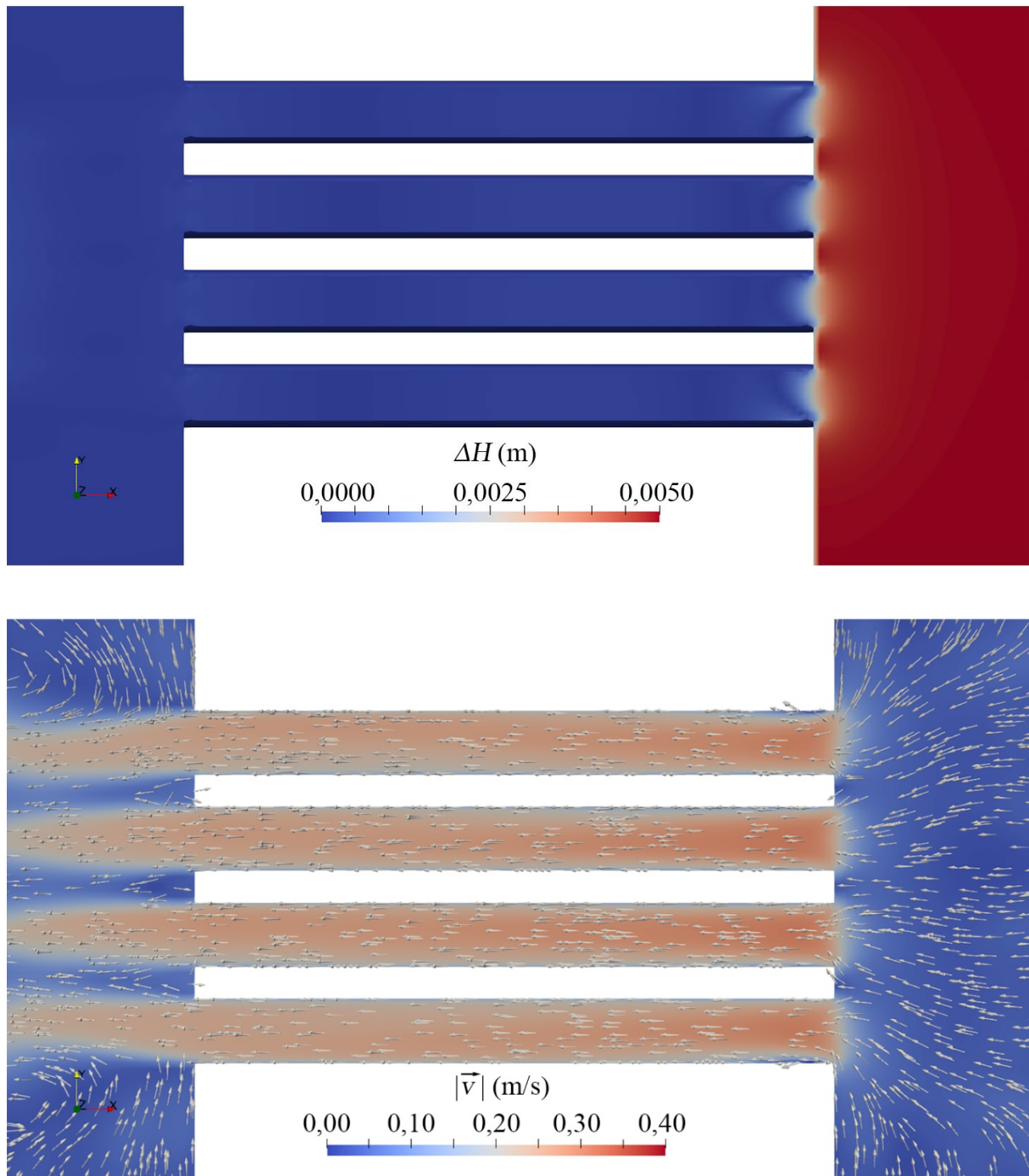
Nakon provedene verifikacije numeričkog modela pomoću analitičkog modela i terenskih mjerenja, numeričkim modelom različitih grupa propusta planira se odrediti i usporediti protočnost pojedinih oblikovanja grupe propusta ugrađenih u tijelo lukobrana pod utjecajem plimnih oscilacija. Kako se verifikacija provodila u prirodnom mjerilu propusta ugrađenog u lukobran, u okviru ovog poglavlja će se nastaviti u istom mjerilu. Oblikovanja grupe propusta koja će se u okviru ovog poglavlja ispitivati su (Slika 31):

- grupa od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu,
- propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao a) propust,
- grupa od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka raspoređene u dva reda po 4 propusta,
- propust pravokutnog poprečnog presjeka jednakih dimenzija kao c) propust,
- grupa od 2 propusta kružnog poprečnog presjeka čija površina poprečnog presjeka jednog propusta odgovara površini poprečnog presjeka dvaju propusta iz a) propusta.

Za numeričko modeliranje protjecanja vode kroz grupu propusta pod utjecajem plimnih oscilacija, provodilo se ispitivanje za visinske razlike ( $\Delta H$ ) u iznosu od 0,001 m, 0,002 m i 0,005 m (Tablica 12). Provela su se ispitivanja za dvije razine uronjenosti, potpuno uronjena grupa propusta (W1) i djelomično uronjena grupa propusta (W2). Dužina propusta je konstantna pri 10 m i apsolutna hrapavost pri 0,005 m.

### **5.5.3.1 Prostorno polje brzina unutar i u okolini grupe propusta**

Za svaki ispitivani slučaj, neovisno o oblikovanju grupe propusta i visini vodnog lica u odnosu na visinsku poziciju grupe propusta, može se uočiti kako je relativna visina vodnog lica uglavnom konstantne vrijednosti sa svake strane grupe propusta, što je definirano i fiksirano rubnim uvjetom (slično kao na primjeru za  $\Delta H = 0,005$  m što je prikazano na Slika 84). Na poziciji gdje vodna masa ulazi u propust pokrenuta razlikom u visini vodnog lica, dolazi do lokalnog pada u relativnoj visini vodnog lica do visine koja je prisutna u nizvodnom djelu akvatorija. Istovremeno, pad u relativnoj visini vodnog lica prati i ubrzanje vodne mase. Vodna masa zadržava brzinu unutar propusta i tek nakon izlaska iz propusta, u akvatorij vodne mase u mirovanju, brzina opada. Navedeno ponašanje vodne mase uzrokovano razlikama u visini vodnog lica nije iznenađujuće jer takvo djelovanje predviđa energetska jednadžba, gdje se potencijalna energija vodne mase definirane u okviru visine vodnog stupca pretvara u kinetičku energiju definiranu u okviru brzine vodne mase, uz lokalne i linijske gubitnike koji se pojavljuju zbog prisutnosti propusta.

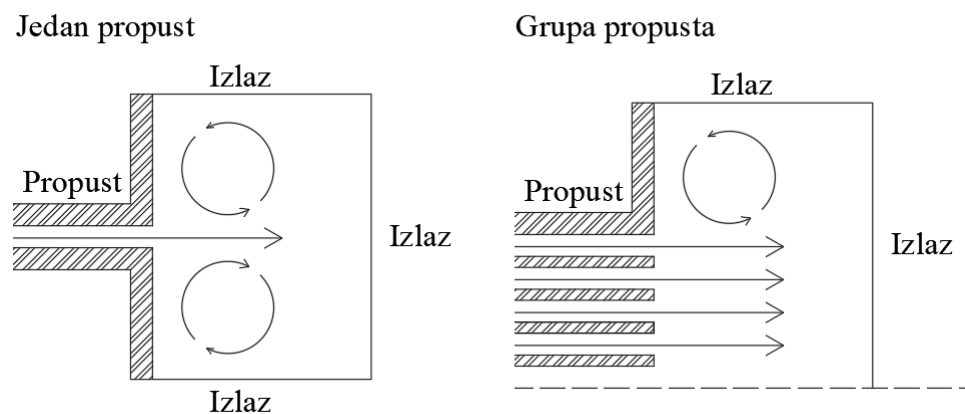


Slika 84 Prostorna raspodjela relativne visine vodnog lica i vektora brzine za grupu propusta koja se sastoji od 4 propusta kružnog poprečnog presjeka u jednom redu, odnosno grupa propusta (a) za zadanu konstantnu visinsku razliku vodnog lica u iznosu od 0,005 m

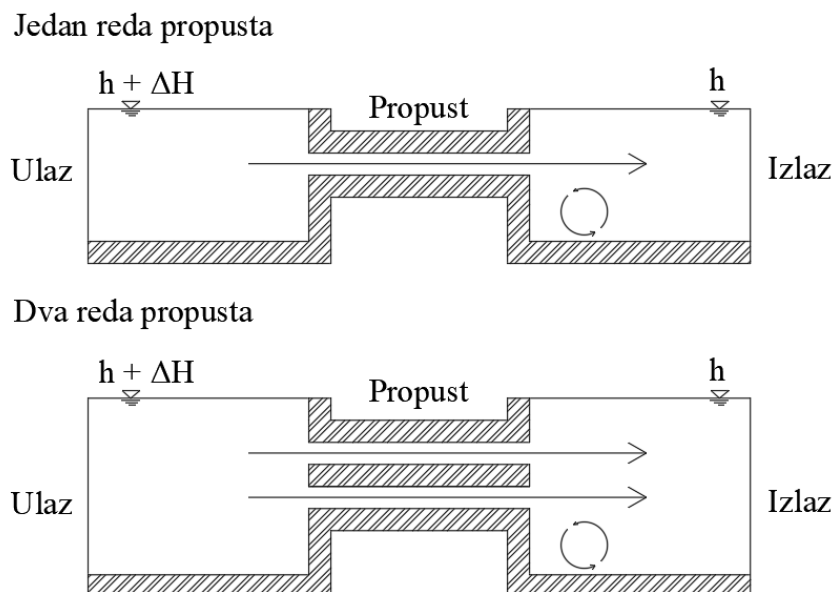
### **5.5.3.2 Utjecaj većeg broja međusobno kratko udaljenih propusta unutar grupe propusta na protok kroz propust**

Izlaskom vode iz propusta formiraju se vrtlozi (čija je os vrtnje u smjeru koordinatne osi z) s obje strane izlazećeg mlaza koji umiruju brzinu izlaznog toka (Slika 84 i Slika 85). Zbog specifične strujne slike na izlazu iz grupe propusta, mlazovi vode rubnih cijevnih propusta su sporiji nego mlazovi omeđeni drugim mlazovima. Veća brzina mlazova koji su međusobno omeđeni vodnom masom jednake brzine koja izlazi iz susjednih propusta u konačnici daje ukupan protok kroz sve propuste veći nego umnožak broja propusta u grupi i protoka koji bi se ostvario kroz jedan samostalni propust ugrađen u tijelu lukobrana.

Vrtloženje vodne mase u akvatoriju pokrenuto izlaznim mlazom se ne pojavljuje samo u okviru horizontalne ravnine, nego se pojavljuje također i u vertikalnoj ravnini (Slika 86). Vrtloženje se pojavljuje u području između izlaznog mlaza i dna akvatorija, te je stoga njegova karakteristična veličina ograničena udaljenošću između izlaznog mlaza i dna. Mlazovi vodne mase koji izlaze iz propusta, a ispod njih djeluje mlaz vodne mase približno jednake brzine, ostvaraju veće brzine u jednakoj mjeri kako je to prethodno prezentirano za propuste međusobno postavljene na jednakoj visinskoj poziciji (Tablica 18).



Slika 85 Shematski prikaz strujne slike na izlazu iz jednog samostalnog propusta i grupe propusta gdje su propusti položeni u jednom redu



Slika 86 Shematski prikaz strujne slike na izlazu iz grupe propusta gdje su propusti položeni u jednom redu i grupe propusta gdje su propusti položeni u dva reda

Ako se ukupni protok grupe propusta od više propusta kružnog poprečnog presjeka položenih u jednom redu normalizira s protokom jednog samostalnog propusta jednakih karakteristika (nije grupa propusta), može se uočiti uvećanje protoka u iznosu od 5% za niz od 8 propusta u slučaju potpuno uronjenog propusta (W1) i uvećanje od 3% ukoliko je propust djelomično uronjen (W2) (Tablica 18). Polaganjem grupe propusta moguće je ostvariti uvećanje efikasnosti u odnosu na niz pojedinačnih propusta koji su međusobno udaljeni dovoljno mnogo kako ne bi djelovali kao grupa propusta.

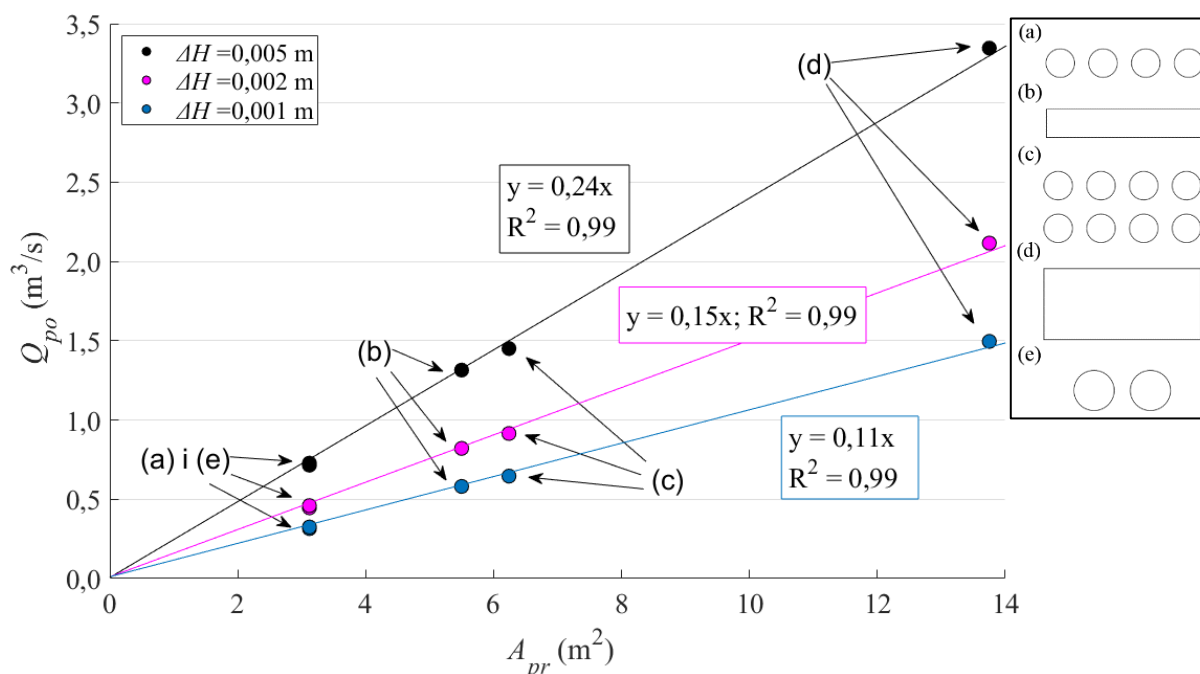
Tablica 18 Normalizirani ukupni protoci kroz grupe propusta koristeći protok kroz jedan samostalni propust ugrađen u tijelo lukobrana; promjer pojedinog propusta kružnog poprečnog presjeka iznosi 1 m, dužina 10 m i međusobni razmak 0,5 m

Dubina mjerena od donjeg ruba propusta (m)	W2		W1	
$\Delta H$ (m)	0,005	0,01	0,005	0,01
Broj cijevi				
1	1,00	1,00	1,00	1,00
4	4,07	4,09	4,15	4,17
8	8,23	8,22	8,37	8,39

### 5.5.3.3 Matematički obrasci za predviđanje protoka kroz grupu propusta uslijed plimnih oscilacija

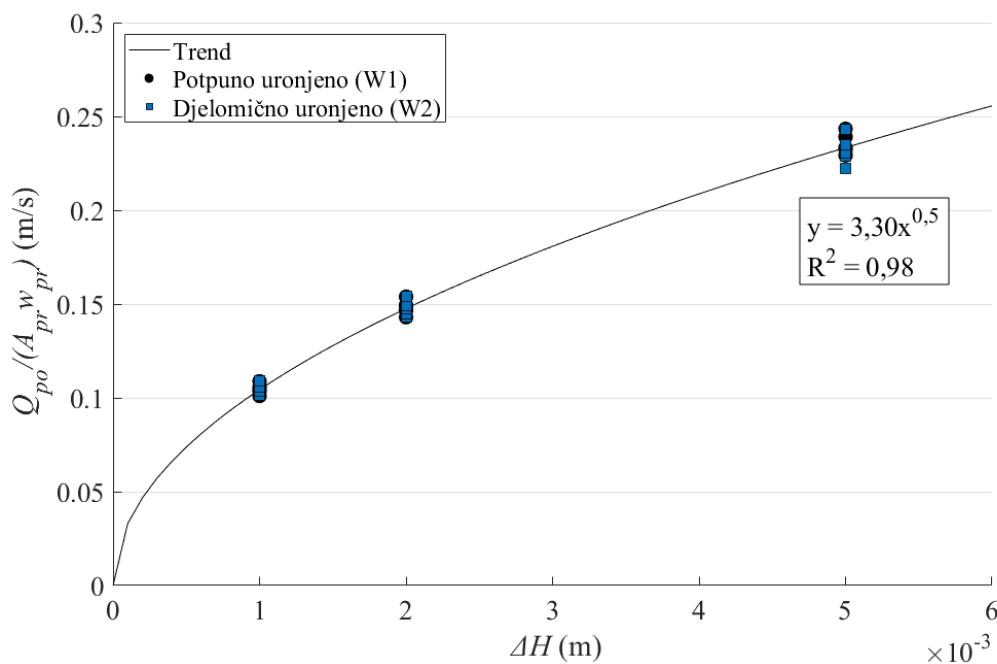
Na protjecajnu površinu grupe propusta osim uronjenosti propusta utječe i sama površina propusta (Slika 87). Rastom površine poprečnog presjeka grupe propusta raste protok koji se ostvaruje kroz grupu propusta. Rast protoka kroz grupu propusta za konstantnu visinsku razliku vodnog lica između dvije strane grupe propusta, dužinu propusta i apsolutnu hrapavost je linearan s obzirom na rast površine propusta.

Nagib pravca koji služi procjeni protoka temeljenu na veličini površine poprečnog presjeka, ovisi o visinskoj razlici vodnog lica. Prirast pravca za najmanju ispitanu visinsku razliku vodnog lica od 0,001 m ( $y = 0,11x$ ) ukazuje na pad u iznosu od 55% u odnosu na najveću ispitanu visinsku razliku vodnog lica ( $y = 0,24x$ ). Protoci kroz grupe propusta (a) i (e) su vrlo bliski jer se radi o grupama propusta jednakih ukupnih površina poprečnih presjeka, gdje je u varijanti oblikovanja grupe propusta (a) ta površina raspodijeljena na 4 propusta, a u varijanti oblikovanja grupe propusta (e) u 2 propusta. Mala razlika u protoku kroz grupu propusta između navedena dva oblikovanja grupe propusta, posljedica je različitih hidrauličkih radijusa.



Slika 87 Odnos protoka kroz grupu propusta ( $Q_{po}$ ) (Slika 31) prema površini poprečnog presjeka ( $A_{pr}$ ) za konstantnu uronjenost propusta (ovdje potpuno uronjeni propust – W1), duljinu propusta od 10 m i apsolutnu hrapavost od 0,005 m (što je istovjetno Manningovom koeficijentu u iznosu od 0,016 definiranom pomoću jednadžbe (44))

Grupa propusta (e) ima veći hidraulički radijus, stoga je protok kroz grupu propusta (e) malo veći. Ako je protok koji prolazi kroz grupu propusta normaliziran pomoću površine poprečnog presjeka i uronjenosti grupe propusta uočava se eksponencijalna veza s obzirom na visinsku razliku vodnog lica (Slika 88). Navedenom vezom je moguće povezati sve rezultirajuće protoke kroz grupe propusta (a-e) za provedena numerička ispitivanja. Navedeno ukazuje kako neovisno o oblikovanju grupe propusta, lokalni energetske gubici na ulazu u propust i izlazu iz propusta su približno jednaki za sva ispitana oblikovanja grupe propusta. Drugim riječima, utjecaj oblikovanja grupe propusta na protok koji se ostvaruje kroz njih je minimalan. Linijski energetske gubici (koji su definirani kroz apsolutnu hrapavost unutarnjih stijenki propusta i dužinu propusta) su kroz pregled literature definirani kao vrlo mali u odnosu na lokalne energetske gubitke za relativno kratke propuste koji se ispituju u okviru ovog rada. Stoga se u okviru ovog rada nisu provodila ispitivanja vezana za utjecaj dužine propusta i apsolutne hrapavosti na protok kroz grupu propusta.



Slika 88 Odnos protoka ( $Q_{po}$ ) kroz sve grupe propusta (Slika 31) normaliziranog pomoću varijabli površine poprečnog presjeka propusta ( $A_{pr}$ ) i udjela uronjenog djela poprečnog presjeka propusta ( $w_{pr}$ ) naspram visinskoj razlici vodnog lica ( $\Delta H$ ) za konstantnu duljinu propusta od 10 m i apsolutnu hrapavost od 0,005 m (što je istovjetno Manningovom koeficijentu u iznosu od 0,016 definiranom pomoću jednadžbe (44))



Jednadžba matematičkog modela koji opisuje rezultirajuće protoke za sva provedena ispitivanja (Tablica 19) se može izraziti na sljedeći način:

$$\frac{Q_{po}}{A_{pr} w_{pr}} = v_{pr,po} = 3,30\sqrt{\Delta H} \quad (57)$$

gdje je  $v_{pr,po}$  srednja brzina vode unutar propusta uslijed plimnih oscilacija. Jednadžba (57) poprima oblik Torricellijeve brzine uz drukčiju prvu konstantu, gdje u Torricellijevom zakonu ona iznosi  $\sqrt{2g} = 4,28$ . Smanjenje konstante se može objasniti kao posljedica svih lokalnih i linijskih gubitaka za protjecanje vode kroz propust općeg oblika grupe propusta, te povećanja protoka uslijed međusobno kratko udaljenih propusta (opisano u okviru poglavlja 5.5.3.2) koja se pojavljuju tijekom djelovanja plimnih oscilacija na grupu propusta.

Tablica 19 Rezultirajući protoci za sve provedene testove na grupe propusta (Slika 31) pod utjecajem plimnih oscilacija

Grupa propusta	Broj testa	$\Delta H$ (m)	$Q_{po}$ (m)	$A_{pr}$ (m)	Razina vode
Grupa propusta (a)	1	0,005	0,32	3,14	W1
	2	0,002	0,45	3,14	W1
	3	0,001	0,72	3,14	W1
	4	0,005	0,16	3,14	W2
	5	0,002	0,23	3,14	W2
	6	0,001	0,36	3,14	W2
Grupa propusta (b)	7	0,005	0,58	6,28	W1
	8	0,002	0,82	6,28	W1
	9	0,001	1,30	6,28	W1
	10	0,005	0,29	6,28	W2
	11	0,002	0,41	6,28	W2
	12	0,001	0,65	6,28	W2
Grupa propusta (c)	13	0,005	0,64	5,50	W1
	14	0,002	0,91	5,50	W1
	15	0,001	1,45	5,50	W1
	16	0,005	0,47	5,50	W2
	17	0,002	0,68	5,50	W2
	18	0,001	1,07	5,50	W2
Grupa propusta (d)	19	0,005	1,49	13,75	W1
	20	0,002	2,11	13,75	W1
	21	0,001	3,35	13,75	W1
	22	0,005	1,20	13,75	W2
	23	0,002	1,69	13,75	W2
	24	0,001	2,68	13,75	W2

Grupa propusta (e)	25	0,005	0,33	3,14	W1
	26	0,002	0,46	3,14	W1
	27	0,001	0,73	3,14	W1
	28	0,005	0,16	3,14	W2
	29	0,002	0,23	3,14	W2
	30	0,001	0,36	3,14	W2

## 6 RASPRAVA

U okviru rasprave, rezultati i spoznaje izvedene koristeći se numeričkim modelima grupe propusta pod utjecajem valova u okviru poglavlja 5.4 i numeričkim modelima grupe propusta pod utjecajem plimnih oscilacija u okviru poglavlja 5.5, s potporom laboratorijski i terenski dobivenih podataka prikazanih u okviru poglavlja 5.1, 5.2 i 5.3, objedinjuju se u svrhu definiranja potrebnog kompromisa između transmitirane valne energije i omogućene protočnosti propusta. Objedinjeni rezultati i konstruktivne smjernice koje proizlaze iz ovog rada odnositi će se na grupe propusta relativno male površine poprečnog presjeka ( $A_{pr}/A_{ul} = 0,02$  do  $0,04$ ) za koje se u publiciranim radovima istaknulo lokalno djelovanje propusta (Lončar *i ostali*, 2017; Carević *i ostali*, 2019) te u okviru terenskih mjerenja (u poglavlju 5.2.1.1) i terenskog obilaska (u poglavlju 5.3.1) potvrdilo. Nadalje se analizira odnos između ostvarene transmisije valne energije i osrednjenog protoka uzrokovanog valovima kroz propust koji se u dosadašnjim istraživanjima često navodi kao pretpostavka (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014).

## 6.1 Definiranje kriterija za povoljno oblikovanje grupe propusta

Pregledom dosadašnjih istraživanja nije se do sada definirao kriterij koji govori o uspješnosti grupe propusta za zadovoljenjem potreba što učinkovitije izmjene mora za propuste relativno malih poprečnih presjeka (odnos površine poprečnog presjeka propusta i površine poprečnog presjeka ulaza,  $A_{pr}/A_{ul} = 0,02$  do  $0,04$ ). Grupe propusta relativno malih poprečnih presjeka djeluju samo lokalno u neposrednoj blizini na što ukazuju terenska mjerena provedena u ACI marini Opatija u okviru poglavlja 5.2.1.1, terenski obilazak u okviru poglavlja 5.3.1 i prethodna istraživanja (Lončar *i ostali*, 2016, 2017). Stoga se za grupe propuste malih ukupnih površina poprečnog presjeka smatra razumnim definirati parametar koji lokalno promatra parametre oprečnih djelovanja protjecanja volumena mora tijekom referentnog vremena grupe propusta ugrađene u lukobran i transmisije valne energije kroz grupu propusta.

Kako bi se valjanosti konstruktivnog oblikovanja pojedine grupe propusta mogle međusobno uspoređivati s obzirom na transmisiju valne energije i protjecanje volumena mora tijekom referentnog vremena uzrokovanu dominantnim generatorom cirkulacije (koji ovisi o oceanografskim uvjetima pojedine lokacije), potrebno je definirati parametar koji će objedinit oprečne varijable. Shodno navedenom se definira bezdimenzijska varijabla prema sljedećem odnosu:

$$U = \frac{Q_{pr,t} / A_{pr}}{H_{t-PP5}} = \frac{V_{spec,dn}}{H_{t-PP5}} \quad (58)$$

gdje  $U$  označava učinkovitost grupe propusta,  $Q_{pr}$  srednji dnevni protok uzrokovan dominantnim generatorom,  $t$  proteklo vrijeme tijekom jednog dana,  $A_{pr}$  ukupnu površinu poprečnog presjeka grupe propusta,  $H_t$  valnu visinu transmitiranog vala i  $V_{spec,dn}$  specifični volumen koji se očekuje proteći kroz propust tijekom jednog dana. Kriterijem učinkovitosti grupe propusta očekuje se dati ocjena pojedinog konstruktivnog oblikovanja grupe propusta pri zadovoljenju oprečnih djelovanja protočnosti uslijed dominantnog generatora cirkulacije za pojedinu lokaciju i transmisije valne energije. Rastom parametra učinkovitosti, smatra se da grupa propusta uspješnije djeluje i bolje stvara kompromis između oprečnih djelovanja.

Nadalje je potrebno odrediti u kakvim uvjetima se smatra da učinkovitost propusta zadovoljava oprečne uvjete protočnosti kroz propust i transmisije valne energije u zaštićeni akvatorij. U tu svrhu, razmatrat će se situacija gdje je kvalitativno uočeno kako propust uspješno izvršava svoju ulogu u okviru izmjene mora u području mrtve zone. Navedena situacija već je opisana u okviru poglavlja 5.3.1 i 5.3.2, gdje se prezentira terenski obilazak ACI marine Split i komunalne lučice Zenta. Navedene dvije lokacije su međusobno udaljene 2,5 km zračne udaljenosti, što govori o gotovo jednakim oceanografskim uvjetima na obje lokacije poput valne klime, vjetra i plimnih oscilacija. U mrtvoj zoni područja komunalne lučice Zenta vizualno je uočena stagnacija morske vode, nakupljanje onečišćenja i smanjena prozirnost. Nasuprot tome, u ACI marini Split, u mrtvoj zoni na isti dan terenskog pregleda nije uočena stagnacija vode u čijoj okolini se nalazi propust. Navedeno ukazuje na uspješno funkcioniranje propusta u cilju izmjene morske vode (Slika 89).

Pretpostavka 1: shodno navedenom se uvodi pretpostavka da medijan visinskih razlika vodnog lica može biti reprezentativan za dugoročnu (višegodišnju) procjenu specifičnog dnevnog volumena koji protječe kroz grupu propusta tijekom jednog dana.



Slika 89 Propust pravokutnog poprečnog presjeka u ACI marini Split

Na lokaciji ACI marina Opatija gdje su provedena terenska mjerenja, analizom je određen medijan visinskih razlika vodnog lica tijekom cijelog mjernog razdoblja u iznosu od 0,0026 m (predstavljeno u poglavlju 5.2.1). U ACI marini Opatija su zabilježene uobičajene amplitude plimnih oscilacija u iznosu od 0,4 m, dok u području Splita su uobičajene gotovo dvostruko manje amplitude plimnih oscilacija u iznosu od 0,25 m. Osim amplitude plimnih oscilacija, na visinsku razliku vodnog lica između dviju strana propusta utječe tlocrtno oblikovanje cijele marine ili luke i udaljenost propusta od ulaza u akvatorij.

Pretpostavka 2: shodno navedenim informacijama, pretpostavlja se medijan visinskih razlika vodnog lica u iznosu od 0,002 m kroz propust na lokaciji ACI marina Split (Slika 89) koji uzrokuje cirkulaciju kroz propust. Navedena relativno visoka vrijednost procjene visinske razlike se smatra razumna s obzirom da se njime u konačnici formira strog kriterij minimalne očekivane učinkovitosti propusta što je na strani sigurnosti.

Koristeći se ostalim poznatim podacima ugrađenog propusta u ACI marini Split (Slika 89) poput ukupne površine poprečnog presjeka u iznosu od 4,18 m<sup>2</sup>, uobičajene uronjenosti u iznosu od 60 % površine poprečnog presjeka propusta i dužine propusta od 10 m, može se odrediti očekivani pripadni srednji dnevni protok uzrokovan plimnim oscilacijama u iznosu od 0,372 m<sup>3</sup>/s (koristeći jednadžbu (57)).

Za graničnu valnu visinu transmitiranog vala, uzima se vrijednosti u iznosu od 0,3 m koja odgovara maksimalnoj valnoj visini unutar zaštićenog akvatorija koju uzrokuje na lokaciji val petogodišnjeg povratnog perioda prema preporukama Hrvatskog registara brodova („Tehnički uvjeti i svjedodžba o sigurnosti plutajućeg objekta za pontonske gatove u marinama“, Hrvatski registar brodova, QC-T-191 iz 2004. godine).

Prema navedenim određenim varijablama, može se izvesti minimalna zadovoljavajuća vrijednost kriterija učinkovitosti propusta slijedeći jednadžbu (58):

$$U = \frac{0,372 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24}{0,3 \cdot 4,18} \approx 25600 \quad (59)$$

Vrijednost učinkovitosti propusta u iznosu od 25600 će se za daljnju analizu pretpostaviti kao minimalna vrijednost za koju se smatra da je kompromis između protočnosti kroz propust i transmisije valne energije zadovoljena. Ovaj zaključak se donosi s obzirom da su na odabranoj lokaciji, prema anketiranju i obilasku terena opisanom u okviru poglavlja 5.3, uočeni zadovoljavajuću uvjeti funkcionanosti kvalitete morske vode.

## **6.2 Određivanje kompromisnog geometrijskog oblikovanja grupe propusta s obzirom na oceanografske karakteristike proizvoljne lokacije**

U okviru poglavlja 6.2 će se prezentirati rezultati za oblikovanje grupe propusta koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka postavljenih u dva reda (odnosno grupa propusta (c)), dok rezultati ostalih grupa propusta će biti prikazani u prilogu 2.

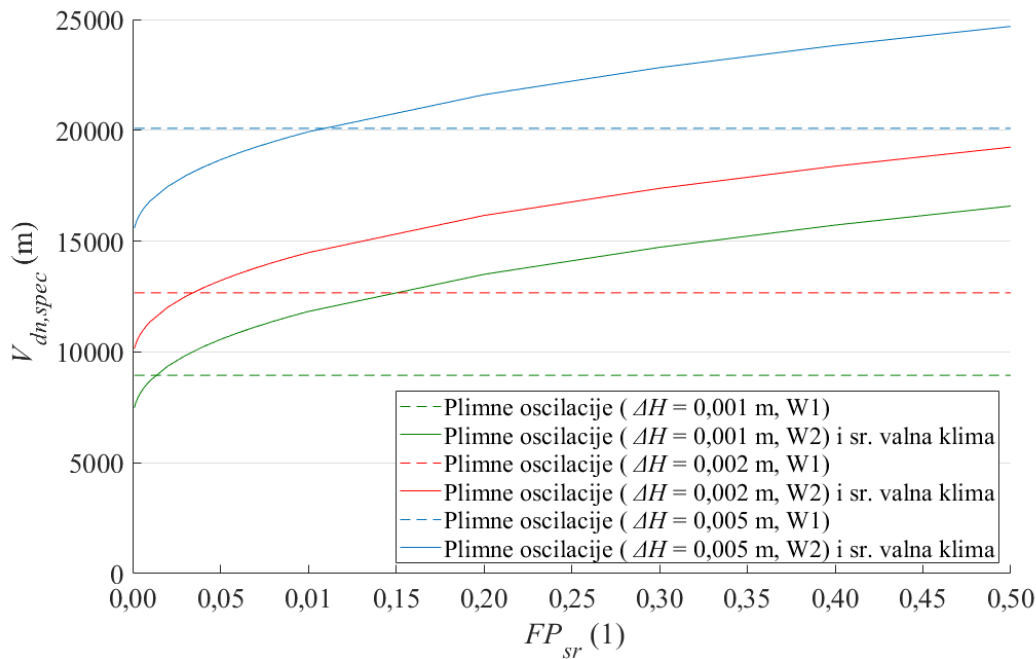
### **6.2.1 Određivanje dominantnog generatora cirkulacije za pojedine oceanografske uvjete na lokaciji**

Za proizvoljnu interesnu lokaciju gdje se razmatra ugradnja grupe propusta u lukobran, potrebno je promotriti oceanografske uvjete vezane za lokaciju poput valne klime, plimnih oscilacija i vjetrovne klime. Primjerice, na nekim lokacijama gdje su amplitude plimnih oscilacija relativno velike i lokacija biva zaštićena od valova zbog topografije okolnog područja (npr. okolni otoci mogu na pojedinim lokacijama stvoriti prirodno zaštićeni akvatorij zbog smanjenog privjetrišta gdje se generiraju valovi), plimne oscilacije mogu biti dominantni uzročnik cirkulacije kroz propust. Takav slučaj je uočen u ACI marini Opatija prezentiran u okviru poglavlja 5.2. Tada plimne oscilacije uzrokuju 76% ukupne cirkulacije kroz grupu propusta (Slika 55). Na drugim lokacijama, valna klima može biti većeg intenziteta što posljedično čini valove dominantnim uzročnikom cirkulacije vodne mase kroz grupu propusta umjesto plimnih oscilacija, što se često navodi kao slučaj u okviru pregledane literature na lokacijama unutar Grčke i Turske na Mediteranskom moru, te u Koreji i Japanu na Japanskom moru (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Belibassakis *i ostali*, 2014). Valovi osim što mogu uzrokovati protok kroz grupu propusta, uzrokuju nepoželjnu transmisiju valne energije u zaštićeni akvatorij koji lukobran štiti.

Pretpostavka 3: srednja višegodišnja vrijednost valnih parametara za određenu lokaciju se smatra mjerodavnom za dugoročnu procjenu volumena mora koji protječe kroz grupu propusta pod utjecajem valova svaki dan.

Najprije valja odrediti koji od dva generatora cirkulacije kroz propust, valovi ili plimne oscilacije, je dominantan za proizvoljnu lokaciju. Koristeći se odnosima koji su definirani u prethodnim poglavljima 5.4 i 5.5 o rezultatima numeričkih modela valovanja i plimnih oscilacija, mogu se odrediti protoci za pojedino oblikovanje propusta (Slika 90).





Slika 90 Odnos između specifičnog dnevnog volumena prema generatoru ( $V_{dn,spec}$ ) koji je uzrokovan plimnim oscilacijama pri potpuno uronjenoj grupi propusta (W1) i valovima u kombinaciji s plimnim oscilacijama pri djelomično uronjenoj grupi propusta (W2) naspram srednjeg fluks parametra ( $FP_{sr}$ ) za grupu propusta (c)

Protoci koji se odnose na plimne oscilacije kao generator cirkulacije, obuhvaćeni su unutar situacije gdje je grupa propusta u potpunosti uronjena (W1) jer tada će cirkulacija uzrokovana plimnim oscilacijama biti maksimalna (Slika 90). S druge strane, djelomično uronjeni propust (W2) osim što je pod utjecajem plimnih oscilacija, također je pod značajnim utjecajem valova. Stoga protoci koji se odnose na valove kao generatora cirkulacije obuhvaćaju protoke uzrokovane valovima i plimnim oscilacijama zajedno za djelomično uronjeni propust (W2) (Slika 90). Jednako kao i za određivanje protoka uslijed plimnih oscilacija gdje se definira mjerodavni medijan visinskih razlika vodnog lica, za određivanje protoka uslijed valova se definiraju mjerodavni srednji valni parametri koji se pojavljuju na lokaciji od interesa kao srednja vrijednost svih zabilježenih satnih vrijednosti. Pomoću valnih parametara mjerodavnog srednjeg vala koji djeluje tijekom cijelog dana i parametara geometrijskog oblikovanja propusta definira se fluks parametar, te potom mjerodavni protok uslijed valova. Konačno se iz proračunatog protoka odredi specifični dnevni protok uslijed valova (brojnik prema jednadžbi (58)) koji daje informaciju o količini transportirane vodne mase tijekom jednog dana po kvadratu površine poprečnog presjeka propusta uslijed prosječne valne klime. Za prikazanu situaciju grupe propusta (c), gdje je srednja mjerodavna visinska razlika vodnog lica u iznosu od 0,002 m, potrebna je srednja valna klima fluks parametra u iznosu od 0,05 ili veće kako bi

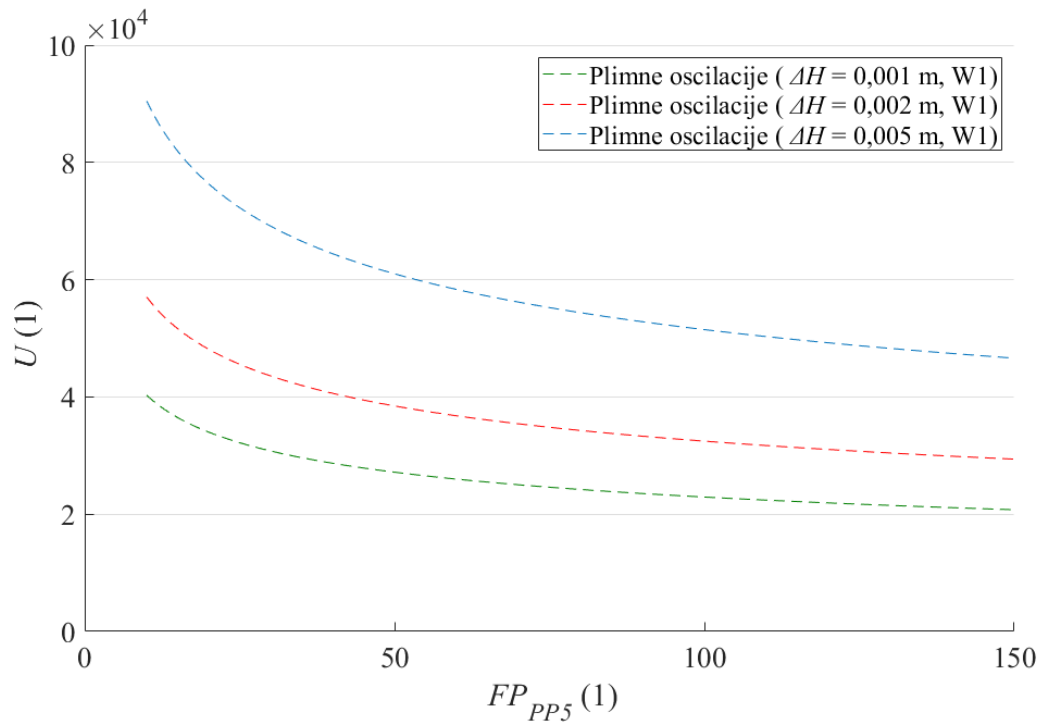
valovi bili dominantni generator cirkulacije kroz propust (Slika 90). Uz pretpostavku nagiba valnog polja u iznosu  $1/30$ , može se izračunati koristeći se jednadžbom (55) kako se radi o valnoj visini 0,15 m ili većoj.

Konačno će određivanje dominantnog generatora služiti kao indikator o visinskom postavljanju grupe propusta. Ukoliko su se plimne oscilacije pokazale kao dominantni generator cirkulacije za proizvoljnu lokaciju, tada valja u potpunosti uroniti grupu propusta. Ako s druge strane, valovi stvaraju dominantnu cirkulaciju kroz propust, tada valja djelomično uroniti grupu propusta da bi se iskoristilo djelovanje valova.

### **6.2.1.1 Plimne oscilacije kao dominantni generator cirkulacije kroz propust za proizvoljnu lokaciju**

Ako su određene plimne oscilacije kao dominantni generator cirkulacije vodne mase kroz grupu propusta, tada se na osnovu odnosa između specifičnog dnevnog volumena vodne mase koja se ostvaruje plimnim oscilacijama tijekom jednog dana i transmisije valne energije kroz grupu propusta ostvarenu djelovanjem valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja može odrediti vrijednost učinkovitosti grupe propusta. Učinkovitost grupe propusta se izvodi prema jednadžbi (58). Ako su plimne oscilacije određene kao dominantni generator cirkulacije (prema poglavlju 6.2.1) propust će biti visinski postavljen tako da srednja razina mora odgovara gornjem rubu propusta, odnosno grupa propusta će biti u potpunosti uronjena (W1) jer se tada volumen mora koji protječe kroz propust maksimizira. Stoga se specifični dnevni volumen vodne mase koji se ostvaruje plimnim oscilacijama određuje za potpuno uronjenu grupu propusta (W1).

Na osnovu prethodno određenih karakterističnih valnih parametara petogodišnjeg povratnog razdoblja za određenu lokaciju, valna visina transmitiranog vala u akvatorij kroz grupu propusta se određuje koristeći matematičke obrasce izvedene u okviru poglavlja 5.4.2, koji koriste fluks parametar kao posrednu varijablu. Iako je definirano da grupa propusta bude visinski postavljena kako bi bila u potpunosti uronjena (W1) u slučaju gdje su plimne oscilacije dominantni generator cirkulacije, zbog relativno velikih amplituda plimnih oscilacija (zbog čega i jesu plimne oscilacije odabrane kao dominantni generator cirkulacije na određenoj lokaciji) u mogućoj koincidenciji s drugim oceanografskim prilikama poput seša i polja niskog atmosferskog tlaka, moguće je da tijekom nailaska valova na lukobran, grupa propusta bude djelomično uronjena (W2).



Slika 91 Odnos učinkovitosti ( $U$ ) grupe propusta (c) određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovanim plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ) za proizvoljnu lokaciju

Stoga se valna visina transmitiranog vala određuje koristeći matematičke obrasce za djelomično uronjenu grupu propusta (W2), čije vrijednosti su znatno veće nego za potpuno uronjenu grupu propusta. Navedenim pristupom kombiniranja volumena mora koji protječe kroz potpuno uronjenu grupu propusta uzrokovanu plimnim oscilacijama i transmisije valne energije kroz propust za djelomično uronjenu grupu propusta, se smatra kako je proračun na strani sigurnosti.

Učinkovitost propusta opada s rastom vrijednosti fluks parametra, odnosno s rastom vrijednosti valnih parametra (valne visine i valne dužine) ukoliko se pretpostave konstantne vrijednosti parametara geometrijskog oblikovanja grupe propusta (Slika 91). Rast valnih parametara uzrokuje rast transmisije valne energije kroz propust, što konačno upućuje na očekivani pad učinkovitosti propusta za navedene oceanografske uvjete. Rastom srednje referentne visinske razlike vodnog lica raste očekivani protok kroz grupu propusta uzrokovanu plimnim oscilacijama, što konačno uzrokuje rast učinkovitosti grupe propusta.

### **6.2.1.2 Valovi kao dominantni generator cirkulacije kroz propust za proizvoljnu lokaciju**

Ako su određeni valovi kao dominantni generator cirkulacije vodne mase kroz grupu propusta, tada se, na osnovu odnosa između specifičnog dnevnog volumena vodne mase koja se ostvaruje uobičajenim valovima tijekom jednog dana i transmisije valne energije kroz grupu propusta ostvarenu djelovanjem valova petogodišnjeg povratnog razdoblja, može odrediti vrijednost učinkovitosti grupe propusta. Učinkovitost grupe propusta se izvodi prema jednadžbi (58). Ako su valovi određeni kao dominantni generator cirkulacije (prema poglavlju 6.2.1) propust će biti visinski postavljen tako da srednja razina mora odgovara osi grupe propusta, odnosno tako da bude djelomično uronjen ( $W_2$ ) jer se tada volumen mora koji protječe kroz grupu propusta maksimizira. Stoga se specifični dnevni volumen mora koji se ostvaruje valovima određuje za djelomično uronjenu grupu propusta ( $W_2$ ) i objedinjuje volumen mora koji se ostvaruje uslijed valova i plimnih oscilacija zajedno.

Na osnovu prethodno određenog karakterističnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za određenu lokaciju, valna visina transmitiranog vala u akvatorij kroz grupu propusta se određuje koristeći matematičke obrasce izvedene u okviru poglavlja 5.4.2, koje koristi fluks parametar kao posrednu varijablu. Valna visina transmitiranog vala će se odrediti za situaciju gdje je grupa propusta djelomično uronjena ( $W_2$ ).

Pretpostavka radi prikaza rezultata: u budućim analizama uvest će se pretpostavka o odnosu između valne visine petogodišnjeg povratnog perioda i srednje uobičajene valne visine koja je referentna za određivanja volumena mora koji protječe kroz grupu propusta pod utjecajem valova. U tu svrhu će se uzeti u obzir monitoring proveden koristeći se valografskom plutačom od strane Hrvatskog Hidrografskog Instituta ispred grada Rijeke koji je trajao 2 godine (01.06.2009.-30.06.2011.) (Hydrographic Institute of the Republic of Croatia, 2011). Statističkom analizom su definirani valni parametri petogodišnjeg povratnog razdoblja, za koji valna visina iznosi 2,4 m. Srednja valna visina koja se pojavila uzimajući u obzir cijelo mjerno razdoblje iznosi 0,18 m. Omjer između srednje valne visine naspram valne visine petogodišnjeg povratnog razdoblja iznosi 8%. Navedeni omjer će se iskoristiti kako bi se odredio i fiksirao omjer fluksa energije između srednje valne klime i vala petogodišnjeg povratnog razdoblja zbog jednostavnijeg prikaza rezultata:

$$\frac{FP_{PP5}}{FP_{sr}} = \frac{\frac{L_{PP5}}{L_{pr}} A_{pr} H_{PP5}^2}{\frac{L_{sr}}{L_{pr}} A_{pr} H_{sr}^2} = \frac{L_{PP5} H_{PP5}^2}{L_{sr} H_{sr}^2} \quad (60)$$

Ukoliko se pretpostavi jednaka strmost za valove petogodišnjeg povratnog razdoblja i srednje valove tijekom mjernog razdoblja može se odnos u jednadžbi (60) pojednostaviti:

$$\frac{L_{PP5} H_{PP5}^2}{L_{sr} H_{sr}^2} = \frac{\frac{H_{PP5}}{S} H_{PP5}^2}{\frac{H_{sr}}{S} H_{sr}^2} = \frac{H_{PP5}^3}{H_{sr}^3} \quad (61)$$

Nadalje se uvede odnos dobiven iz mjerenja o omjeru srednje valne visine i valne visine petogodišnjeg povratnog razdoblja u iznosu od 8% u jednadžbu (61):

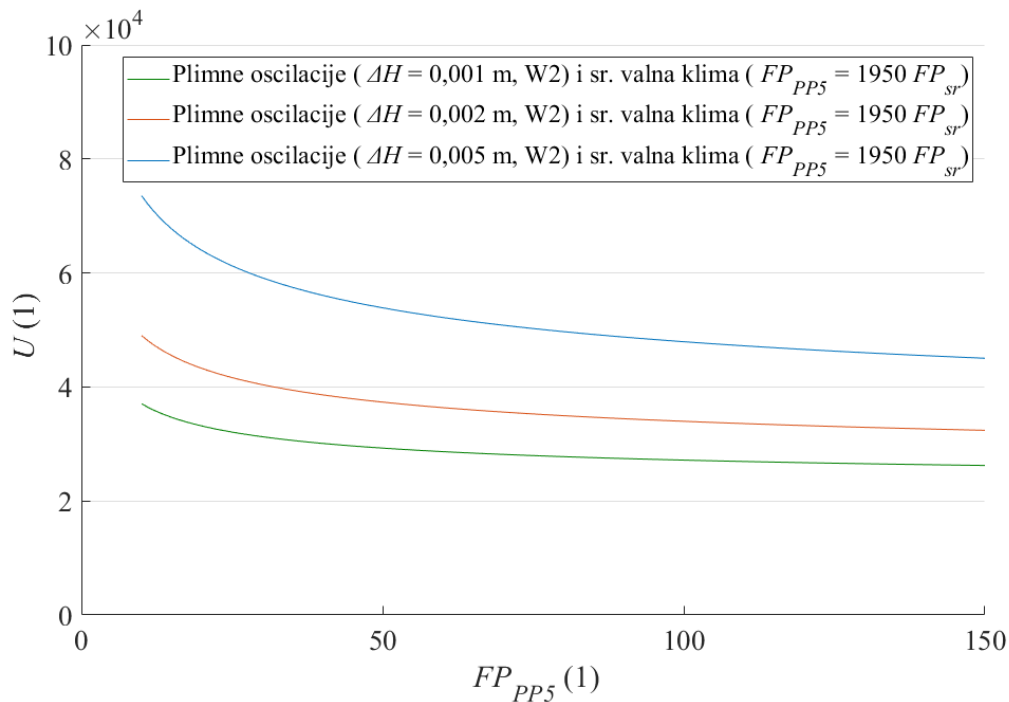
$$\frac{H_{PP5}^3}{H_{sr}^3} = \left( \frac{1}{0,08} \right)^3 \approx 1950 = \frac{FP_{PP5}}{FP_{sr}} \quad (62)$$

Koristeći se navedenim odnosom između flukseva energije za srednju valnu klimu i valnu klimu petogodišnjeg povratnog razdoblja, prezentirat će se grafovi gdje se za određeni fluks parametar vala petogodišnjeg povratnog razreda na apscisi fiksira vrijednost protoka koja se ostvaruje uslijed srednje očekivane valne klime.

Grafovi s odvojenim proračunom za specifičan dnevni volumen mora koji prolazi kroz grupu propusta uslijed srednjih valnih klima i plimnih oscilacija zajedno, te za valnu visinu transmitiranog vala petogodišnjeg povratnog perioda su pripremljeni i prezentirani u prilogu 2. Pomoću njih je omogućen proračun bez fiksiranja odnosa fluks parametara prikazanog jednadžbom (62) kroz nekoliko koraka.

Nastavljajući s analizom valova kao dominantnog generatora, učinkovitost propusta opada s rastom vrijednosti fluks parametra, odnosno s rastom vrijednosti valnih parametra (valne visine i valne dužine) vala petogodišnjeg povratnog razdoblja koji služi za određivanje transmisije valne energije ukoliko se pretpostave konstante vrijednosti parametara geometrijskog oblikovanja grupe propusta (Slika 92). Navedeno ukazuje da brže raste nepovoljni utjecaj transmisije valne energije uslijed valova velikih valnih visina i dužina, nego

rast povoljnog utjecaja volumena mora koji protječe kroz grupu propusta uslijed srednje valne klime (gdje su valne visine srednje i ekstremne valne klime u ovom prikazu fiksirane prema jednadžbi (62)). Rastom srednje referentne visinske razlike vodnog lica raste očekivani protok kroz grupu propusta uzrokovan plimnim oscilacijama u kombinaciji s valovima srednje valne klime, što konačno uzrokuje rast učinkovitosti grupe propusta (Slika 92).

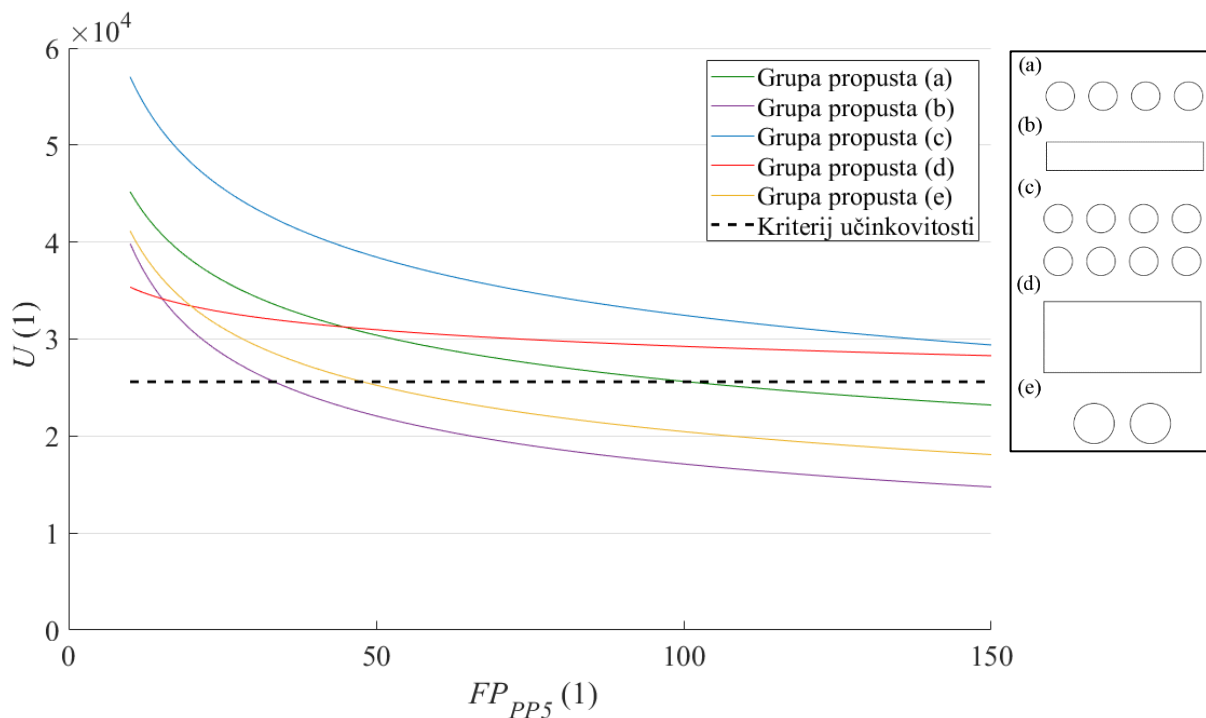


Slika 92 Odnos učinkovitosti ( $U$ ) grupe propusta (c) određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovanim valovima srednje valne klime i plimnim oscilacijama zajedno i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ ) za proizvoljnu lokaciju

## 6.2.2 Usporedba učinkovitosti propusta između različitih oblikovanja propusta

### 6.2.2.1 Usporedba učinkovitosti propusta ako su plimne oscilacije dominantni generator

Usporedbom učinkovitosti potpuno uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja, može se uočiti kako grupa propusta (c) najbolje omogućuje kompromis između oprečnih djelovanja u cijeloj promatranoj domeni fluks parametra. Za grupu propusta (c), odnosno grupu propusta koja se sastoji od 8 propusta kružnog poprečnog presjeka u dva reda, uočene su najmanje valne visine transmitiranog vala za istovjetno incidentno valno polje u usporedbi s drugim testiranim grupama propusta (prikazano u okviru poglavlja 5.4.2). Uspoređujući s grupom propusta (a), koja se sastoji od jednog reda propusta kružnog poprečnog presjeka, donji red djeluje poput prigušivača, pa se prenosi manje valne energije u zaštićeni akvatorij. Nadalje, kružni poprečni presjek propusta omogućuje veći hidraulički radijus i time veći protok po kvadratu površine poprečnog presjeka propusta, nego što je to slučaj za propust pravokutnog poprečnog presjeka.



Slika 93 Usporedba učinkovitosti ( $U$ ) potpuno uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ )

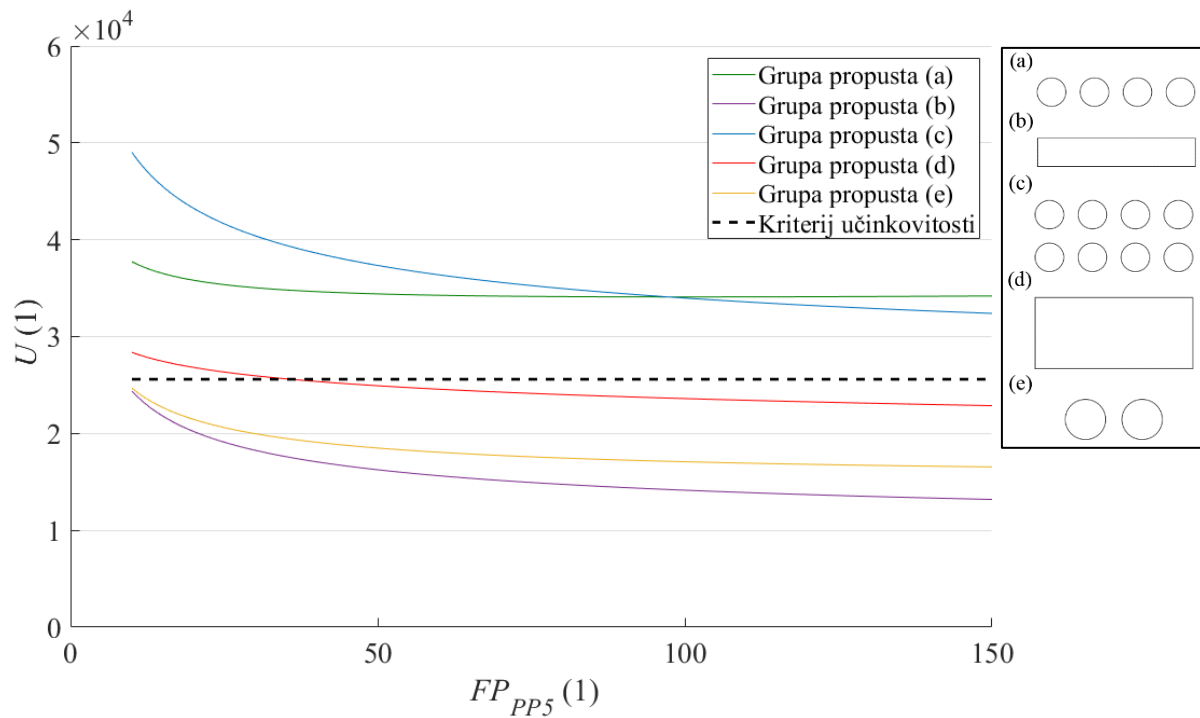
Shodno navedenim reakcijama na djelovanje valova i plimnim oscilacijama, konačno se može zaključiti kako u slučaju dominantnog generatora protoka u obliku plimnih oscilacija, najpovoljnije konstruktivno rješenje oblikovanja grupe propusta nudi grupa propusta (c) za sve slučajeve valne klime petogodišnjeg povratnog razdoblja.

### **6.2.2.2 Usporedba učinkovitosti propusta ako su valovi dominantni generator**

Usporedba učinkovitosti djelomično uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) (Slika 94) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m i srednje valne klime s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja, može se uočiti kako grupa propusta (c) omogućava najveću učinkovitost za vrijednosti fluks parametra manjeg od 100 i grupa propusta (a) za vrijednosti fluks parametra većeg od 100 (Slika 94). U domeni fluks parametra kada je vrijednost manja od 100, plimne oscilacije kroz djelomično uronjenu grupu propusta (W2) dalje čine značajan udio u volumenu mora koji protječe, stoga donji red propusta unutar grupe propusta (c) dolazi do izražaja za omogućavanje protjecanja mora uslijed plimnih oscilacija. U domeni fluks parametra kada je vrijednost veća od 100, udio u volumenu mora koji protječe kroz grupu propusta uslijed plimnih oscilacija slabi. Stoga je učinkovitije svu poprečnu površinu grupe propusta postaviti u jedan red visinski tako da srednja razina mora odgovara osi propusta (grupa propusta (a)) kako bi se koristilo djelovanje valova za volumen mora koji protječe kroz grupu propusta. Doprinos velikog specifičnog dnevnog volumena mora koji protječe kroz grupu propusta uslijed djelovanja srednje valne klime, nadoknađuje za lošiju učinkovitost grupe propusta (a) naspram grupi propusta (c) u pogledu transmisije valne energije u zaštićeni akvatorij. Uspoređujući s grupom propusta (a), koja se sastoji od jednog reda propusta kružnog poprečnog presjeka, donji red djeluje poput prigušivača te time se prenosi manje valne energije u zaštićeni akvatorij.

Konačno se može reći kako grupa propusta (a) nudi hidraulički učinkovitije rješenje između oprečnih djelovanja volumena mora koje protječe kroz grupu propusta i transmisije valne energije, u slučaju kada su valovi određeni kao dominantni generator cirkulacije za određenu lokaciju. Za lokacije gdje su prisutni vrlo mali valni parametari vala petogodišnjeg povratnog perioda, grupa propusta (c) dolazi do izražaja kao učinkovitija jer utjecaj valova za navedenu lokaciju slabi, te plimne oscilacije preuzimaju dominantnu ulogu koja bolje koristi drugi red kružnih propusta u okviru grupe propusta (c).



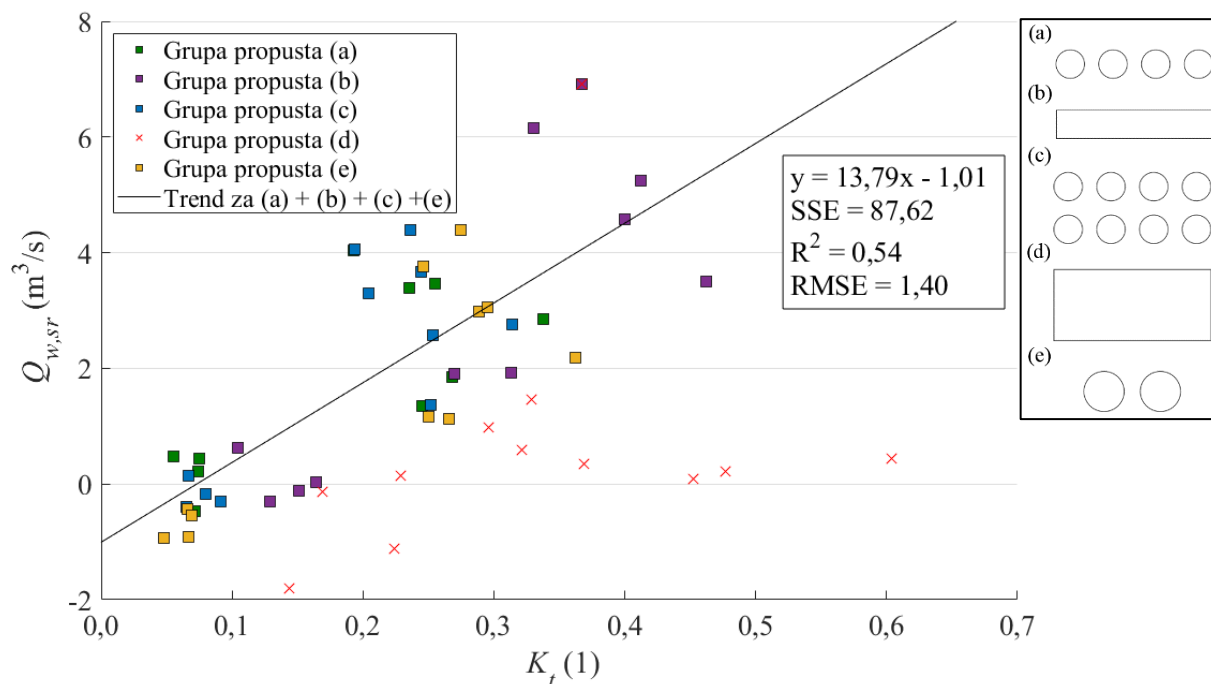


Slika 94 Usporedba učinkovitosti ( $U$ ) djelomično uronjene grupe propusta (a), (b), (c), (d) i (e) pod utjecajem plimnih oscilacija u iznosu od 0,002 m i srednje valne klime s obzirom na fluks parametar određen koristeći valne parametre vala petogodišnjeg povratnog razdoblja ( $FP_{PP5}$ )

### 6.3 Odnos transmisije valne energije kroz propust i protok koji je uzrokovan istim valnim poljem

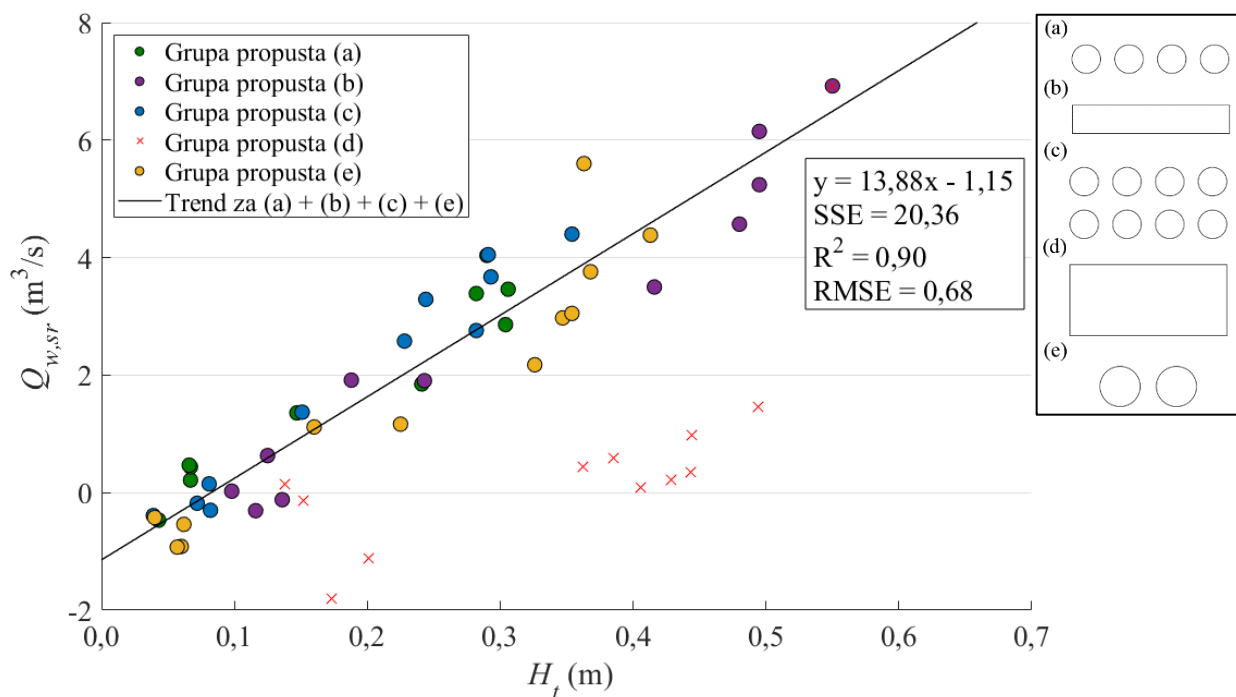
Neka dosadašnja istraživanja navode i pretpostavljaju kako rast transmisije valne energije kroz propust prati rast protoka kroz propust koji se ostvaruje valovima (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014), dok drugi ističu potrebu za dodatnim istraživanjem njihovog odnosa (Stagonas *i ostali*, 2009).

Prema provedenim analizama u okviru numeričkog modeliranja valovanja za grupu propusta (metodologija opisana u poglavlju 4.4.2 i rezultati prezentirani u poglavlju 5.4.2), dobio se uvid u koeficijente transmisije i neto protoke kroz pojedine grupe propusta pod utjecajem incidentnog vala (Slika 95). Promatrajući odnos između koeficijenta transmisije i neto protoka za pojedine incidentne valove, neovisno o promatranoj grupi propusta, korelacija između dvije navedene varijable je niska. Grupa propusta (d) je u potpunosti odvojena od uočenih podataka transmisije valne energije i neto protoka ostalih grupa propusta, te stoga nije uključena u formiranje trenda. S obzirom na navedeno može se zaključiti kako rast koeficijenta transmisije ne prati nužno rast protoka kroz grupu propusta uslijed valova kako je često pretpostavljeno u nekim dosadašnjim istraživanjima (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Tsoukala *i ostali*, 2014).



Slika 95 Odnos između koeficijenta transmisije ( $K_t$ ) i srednjeg neto protoka ( $Q_{w, sr}$ ) koji se ostvaruje kroz grupu propusta za pojedine valne parametre incidentnog valnog polja

Ako se valne visine transmitiranog vala i srednjeg protoka kroz grupu propusta promatraju (Slika 96), može se uočiti korelacija za sve grupe propusta osim za grupu propusta (e) između navedenih fizičkih parametara. Za slučaj grupe propusta (e), cijeli valni profil prolazi kroz propust u kojem je dubina mora velika u odnosu na visinu vala uz kružno gibanje vodnih čestica, kako je već prezentirano u okviru poglavlja 5.4.2. Za ostale oblike grupe propusta se pojavljuje snažni mlaz vodne mase koji se ističe jednosmjernim protokom kroz grupu propusta. Konačno se može zaključiti kako ustvari rast valne visine transmitiranog vala preciznije prati rast protoka kroz grupu propusta.



Slika 96 Odnos između valne visine transmitiranog vala ( $H_t$ ) i srednjeg protoka ( $Q_{w,sr}$ ) koji se ostvaruje kroz grupu propusta za pojedine valne parametre incidentnog valnog polja

# 7 ZAKLJUČAK

Unutar područja gdje su amplitude plimnih oscilacija relativno male poput mikroplimnih područja (amplituda manja od 2 m) ne generira se dovoljna izmjena morske vode unutar zaštićenog akvatorija kroz ulaz uslijed plimnih oscilacija. Stagnacijom mora raste koncentracija nitrata ( $\text{NO}_3$ ) u moru što je esencijalni oblik dušikovih nutrijenata za razmnožavanje i život morskih algi. Za svježe dospjele nutrijente iz antropogenih izvora prisutne su povišene koncentracije amonijaka koji šteti razvoju fitoplanktona. Kako bi se stoga spriječila neželjena stagnacija morske vode unutar zaštićenog akvatorija, propusti se ugrađuju u tijelo lukobrana koji služe uvećanju izmjene mora unutar zaštićenog akvatorija. Prethodna istraživanja izmjene mora bave se poglavito područjima gdje amplitude plimnih oscilacija nisu male (veće od 2 m), dok će ovaj rada pokušati ispuniti slabije istraženo područje gdje vladaju mikroplimne mijene (manje od 2 m). Propusti ugrađeni u lukobran su već identificirani kao ekonomski povoljna metoda uvećanja izmjene mora unutar akvatorija, ali ne postoje smjernice za njihovo prikladno oblikovanje i korištenje. U okviru ovog rada težište se stavlja na grupe

propusta relativno male ukupne površine poprečnog presjeka u odnosu na površinu poprečnog presjeka ulaza u akvatorij ( $A_{pr}/A_{ul} = 0,02$  do  $0,04$ ). Za grupe propusta male ukupne površine poprečnog presjeka publicirani radovi su istaknuli lokalno djelovanje propusta (Lončar *i ostali*, 2017; Carević *i ostali*, 2019), te se navedeno u okviru terenskih mjerenja (u poglavlju 5.2.1.1) i terenskog obilaska (u poglavlju 5.3.1) potvrdilo. Stoga je preporučljivo unutar marine ili luke, grupu propusta postaviti u neposrednoj blizini mrtvih zona kako bi se utjecalo na morsku vodu koja se kroz ulaz u akvatorij najmanje izmjenjuje s okolnim morem.

Kako bi se grupa propusta što efikasnije oblikovala potrebno je zadovoljiti oprečna djelovanja koji se pojavljuju pri korištenju propusta. Povoljno djelovanje ostvaruje se izmjenom mora kroz grupu propusta uslijed dominantnog generatora, dok se nepovoljno djelovanje ostvaruje transmisijom valne energije kroz grupu propusta.

U okviru rada se kvantificirao volumen mora koji protječe kroz grupu propusta uslijed dva generatora cirkulacije, plimnih oscilacija i valova. Plimne oscilacije su se pokazale kao dominantne prema analizi mjerenih podataka u ACI marini Opatija (Slika 55). Valovi su također često istaknuti kao dominantni generator cirkulacije kroz grupu propusta u područjima vrlo malih amplituda plimnih oscilacija u dosadašnjoj literaturi (Tsoukala i Moutzouris, 2009b; Belibassakis *i ostali*, 2014). Kvantifikacija volumena mora koja protječe kroz grupu propusta uslijed valova i transmisije valne energije kroz grupu propusta se provela uspostavom i bilježenjem rezultata unutar numeričkog modela (poglavlja 5.4) koji je validiran na uspostavljenom laboratorijskom modelu (poglavlje 5.1). Kvantifikacija volumena mora koja protječe kroz grupu propusta uslijed plimnih oscilacija provela koristeći uspostavljen numerički model (poglavlje 5.5) koji je temeljen na analitičkom modelu i uspoređen s terenskim mjerenjima (poglavlje 5.2).

Prema ciljevima i hipotezi predstavljenim u okviru poglavlja 3, prezentiraju se sljedeći zaključci i obrazloženja:

- 1) detektirati parametre valova koji dominantno utječu na transmisiju valne energije i volumen vode koji proteče kroz propust

Funkcionalnom analizom utjecaja valnih parametara na transmisiju valne energije i volumena morske vode koja protječe kroz grupu propusta uslijed valova opisanu

u poglavlju 5.4.2.8 i 5.4.2.9, uočilo se kako je fluks parametar (prikazan jednadžbom (55)) adekvatan za procjenu navedenih oprečnih djelovanja grupe propusta. Parametri uključeni u okviru fluks parametra su valna visina i dužina, ukupna površina poprečnog presjeka grupe propusta i dužina grupe propusta. Shodno navedenom se može zaključiti kako su valna visina i dužina dominantni valni parametri koji utječu na transmisiju valne energije i količinu volumena mora koja protječe kroz grupu propusta uslijed valova.

- 2) odrediti optimalan visinski položaj propusta s obzirom na srednju razinu mora

Optimalan visinski položaj grupe propusta s obzirom na srednju razinu mora ovisi o dominantnom generatoru cirkulacije, odnosno volumenu mora koji protječe kroz grupu propusta tijekom referentnog vremena za pojedinu lokaciju (kako je opisano u okviru poglavlja 6.2.1). Ako plimne oscilacije čine dominantni udio u volumenu mora koji protječe kroz grupu propusta za pojedinu lokaciju, tada je poželjno u potpunosti uroniti grupu propusta (W1) (Slika 90). Ako valovi čine dominantni udio u volumenu mora koji protječe kroz grupu propusta za pojedinu lokaciju, tada je poželjno djelomično uroniti grupu propusta (W2) (Slika 90).

- 3) definirati prihvatljiva geometrijska oblikovanja samostalnog propusta i grupe propusta s obzirom na funkcionalne zahtjeve

Uzimajući u obzir definirani parametar učinkovitosti grupe propusta (prikazan jednadžbom (58)) u ostvarenju kompromisa između dva prethodno navedena oprečna djelovanja (transmisije valne energije i protjecanja volumena mora tijekom referentnog vremena), mogu se odrediti najpovoljniji oblici grupe propusta ovisno o oceanografskim prilikama na lokaciji. U slučaju da valovi čine dominantni udio u volumenu mora koji protječe kroz grupu propusta, grupa propusta (a) se pokazala najučinkovitija ( $FP_{PP5} > 100$ ). Grupa propusta (c) dolazi do izražaja u slučajevima kada srednja valna klima je relativno mala ( $FP_{PP5} < 100$ ) i time plimne oscilacije čine dominantni udio u volumenu koji protječe kroz grupu propusta. Parametar učinkovitosti grupe propusta u svakom slučaju opada s rastom fluks parametra koji je određen s obzirom na valne parametre vala

petogodišnjeg povratnog perioda i geometrijskog oblikovanja grupe propusta (Slika 93 i Slika 94).

- 4) uspostaviti jednostavne matematičke obrasce za predviđanje valne transmisije i volumena vode koji proteče kroz propuste.

Matematički obrasci za predviđanje transmisije valne energije (poglavlje 5.4.2.9 - Slika 78) i volumena morske vode koja protječe kroz grupu propusta (poglavlje 5.4.2.8 - Slika 77) su uspostavljeni u okviru numeričkog modela valovanja monokromatskih valova koji je temeljen na rezultatima laboratorijskih ispitivanja (prikazanim u poglavlju 5.1.3 i 5.1.4) za svaku testiranu grupu propusta (Slika 31).

Hipoteza: Oblikovanjem propusta moguće je uspostaviti kompromis između transmisije valne energije i volumena koji proteče kroz propust tokom referentnog vremenskog perioda.

Nastavno zaključcima prezentiranim u okviru cilja 3, povoljan oblik grupe propusta (Slika 31) koji zadovoljava kriterij učinkovitosti i time kompromis između oprečnih djelovanja (opisan u poglavlju 6.1) moguće je definirati bez obzira o dominantnom generatoru cirkulacije kroz grupu propusta za pojedinu lokaciju (Slika 93 i Slika 94).

## **7.1 Buduća istraživanja**

Za ciljeve budućih istraživanja se preporučuje sljedeće:

- definirati matematičke obrasce kako bi se jednostavno odredio medijan visinskih razlika između površina mora koja bi se mogla ostvariti između dviju strana grupe propusta ovisno o oceanografskim prilikama na lokaciji, obliku luke ili marine, tlocrtnom položaju grupe propusta unutar akvatorija, udaljenosti od ulaza u akvatorij i dr.
- istraživanje u ovom radu se odnosilo na grupu propusta relativno malih površina poprečnog presjeka ( $A_{pr}/A_{ul} \sim 0,02-0,05$ ) za koje se potvrdilo lokalno djelovanje u neposrednoj okolini grupe propusta u okviru poglavlja 5.2.1.1 i 5.3.3, što

ukazuje da je potrebno točrtno pozicionirati grupu propusta u neposrednoj okolici mrtve zone unutar akvatorija. Za grupe propusta većih površina poprečnog presjeka se može pojaviti šire djelovanje, zbog čega za tu skupinu valja dati specifične preporuke što se tiče točrtne pozicije grupe propusta unutar akvatorija.

- Prošiti istraživanja grupe propusta s valnim parametrima i geometrijskim karakteristikama grupe propusta koje će rezultirati većim fluks parametrom ( $FP > 150$ ). Navedeno je potrebno kako bi se pouzdano mogli ekstrapolirati trendovi transmisije valne energije i protoka za pojedinu grupu propusta na lokacijama gdje su prisutni veliki valovi.



## POPIS LITERATURE

Abascal, A. J. *i ostali* (2007) „Teseo, an operational system for simulating oil spills trajectories and fate processes“, *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, str. 1751–1758. Dostupno na: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-36448951218&partnerID=tZOtx3y1>.

Airoldi, L. i Beck, M. W. (2007) „Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe“, *Oceanography and Marine Biology*, 45, str. 345–405. doi: Book\_Doi 10.1201/9781420050943.

Anthony, A. *i ostali* (2009) „Coastal Lagoons and Climate Change : Ecological and Social Ramifications in U . S . Atlantic and Gulf Coast Ecosystems“, *Ecology and Society*, 14(1), str. 8. doi: 10.1890/0012-9658(2007)88[2947:ETACHH]2.0.CO;2.

Barakat, A. O. *i ostali* (2013) „Distribution and ecological risk of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediments from the Mediterranean coastal environment of Egypt“, *Chemosphere*, 93(3), str. 545–554. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.050.

Barber, R. W. i Wearing, M. J. (2004) „A simplified model for predicting the pollution exchange coefficient of small tidal embayments“, *Water, Air, and Soil Pollution*, str. 87–100.

Battelle (2007) „Sediment Toxicity of Petroleum Hydrocarbon Fractions“, (September), str. 1–89. Dostupno na: <http://www.mass.gov/eea/docs/dep/cleanup/laws/tphbat.pdf>.

Bauer, M. *i ostali* (2010) „The importance of human dimensions research in managing harmful algal blooms“, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(2), str. 75–83. doi: 10.1890/070181.

Bedri, Z. *i ostali* (2016) „Evaluating a microbial water quality prediction model for beach management under the revised EU Bathing Water Directive“, *Journal of Environmental Management*. Academic Press, 167, str. 49–58. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.10.046.

Belibassakis, K. A., Tsoukala, V. K. i Katsardi, V. (2014) „Three-dimensional wave diffraction in the vicinity of openings in coastal structures“, *Applied Ocean Research*. Elsevier Ltd., 45, str. 40–54. doi: 10.1016/j.apor.2013.12.005.

Berberović, E. *i ostali* (2009) „Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution“, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. doi: 10.1103/PhysRevE.79.036306.

Beyer, J. *i ostali* (2010) „Analytical methods for determining metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollutants in fish bile: A review“, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, str. 224–244. doi: 10.1016/j.etap.2010.08.004.

Board, T. R. i National Academies of Sciences and Medicine, E. (2012) *Hydraulic Loss Coefficients for Culverts*. Uredio B. P. Tullis. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/22673.

Brown, S. A. *i ostali* (2016) „Evaluation of turbulence closure models under spilling and plunging breakers in the surf zone“, *Coastal Engineering*. doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.04.002.

Bujak, D., Carević, D. i Gilja, G. (2018) „The influence of the natural generators on discharge through the flushing culverts“, u Losada, I. J. i Lara, J. L. (ur.) *Proceedings of the 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18)*. Santander, Spain, str. 1–10.

Bujak, D., Carević, D. i Mostečak, H. (2017) „Velocities inside flushing culverts induced by waves“, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 170(3–4), str. 112–121. doi: <http://dx.doi.org/10.1680/jmaen.2017.15>.

Bulleri, F. i Chapman, M. G. (2010) „The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments“, *Journal of Applied Ecology*, 47(1), str. 26–35. doi: 10.1111/j.1365-2664.2009.01751.x.

Canu, D. M. i ostali (2012) „Assessing confinement in coastal lagoons“, *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), str. 2391–2398. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.08.007.

Carević, D. i ostali (2018) „Influence of water-level variations on wave transmission through flushing culverts positioned in a breakwater body“, *Journal of waterway port coastal and ocean engineering-asce*, 144(5). doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000464.

Carević, D. i ostali (2019) „Primjena propusta za poboljšanje izmjene mora u lukama“, *GRAĐEVINAR*, 71, str. 197–207.

Carr, N. (2008) „Water Quality for Ecosystem and Human Health“, *Annals of surgery*, 142(6), str. 130. doi: 10.1007/s007690000247.

Cleaveland, S., Laurenson, M. K. i Taylor, L. H. (2001) „Diseases of humans and their domestic mammals: pathogen characteristics, host range and the risk of emergence“, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 356(1411), str. 991–999. doi: 10.1098/rstb.2001.0889.

Cucco, A. i ostali (2012) „A high-resolution real-time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea)“, *Marine Pollution Bulletin*, 64(6), str. 1186–1200. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.03.019.

Cucco, Andrea i ostali (2012) „A metabolic scope based model of fish response to environmental changes“, *Ecological Modelling*, 237–238, str. 132–141. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.04.019.

Cucco, A. i Umgiesser, G. (2006) „Modeling the Venice Lagoon residence time“, *Ecological Modelling*, 193(1-2 SPEC. ISS.), str. 34–51. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.043.

Darbra, R. M. i Casal, J. (2004) „Historical analysis of accidents in seaports“, *Safety Science*, 42(2), str. 85–98. doi: 10.1016/S0925-7535(03)00002-X.

Davis, J. L. D., Levin, L. A. i Walther, S. M. (2002) „Artificial armored shorelines: Sites for open-coast species in a southern California bay“, *Marine Biology*, 140(6), str. 1249–1262. doi: 10.1007/s00227-002-0779-8.

Devolder, B., Rauwoens, P. i Troch, P. (2017) „Application of a buoyancy-modified  $k-\omega$  SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to regular waves using OpenFOAM®“, *Coastal Engineering*. Elsevier, 125(January), str. 81–94. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.04.004.

Devolder, B., Troch, P. i Rauwoens, P. (2018) „Performance of a buoyancy-modified k- $\omega$  and k- $\omega$  SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®“, *Coastal Engineering*, 138(March), str. 49–65. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.04.011.

DiLorenzo, J. L. *i ostali* (1994) „Pollution susceptibility of well-mixed tidal basins“, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 120(4), str. 404–422.

Dronkers, J. i Zimmerman, J. T. F. (1982) „Some principles of mixing in tidal lagoons“, u *Proceedings of the International Symposium on Coastal Lagoons*. Bordeaux, France, str. 107–117.

Duguay, J. M., Lacey, R. W. J. i Gaucher, J. (2017) „A case study of a pool and weir fishway modeled with OpenFOAM and FLOW-3D“, *Ecological Engineering*, 103. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.042.

Ebenhöh, W., Baretta-Bekker, J. G. i Baretta, J. W. (1997) „The primary production module in the marine ecosystem model ERSEM II, with emphasis on the light forcing“, *Journal of Sea Research*, 38(3–4), str. 173–193. doi: 10.1016/S1385-1101(97)00043-9.

Eddy, F. B. (2005) „Ammonia in estuaries and effects on fish“, *Journal of Fish Biology*, str. 1495–1513. doi: 10.1111/j.1095-8649.2005.00930.x.

Eltard, B., Fuhrman, D. R. i Roenby, J. (2017) „Performance of interFoam on progressive waves“, *Preprint submitted to Applied Ocean Research*.

Environmental Protection Agency (1985) *Coastal marina assessment handbook*. Atlanta.

Essl, F. *i ostali* (2013) „Native, alien, endemic, threatened, and extinct species diversity in European countries“, *Biological Conservation*, 164, str. 90–97. doi: 10.1016/j.biocon.2013.04.005.

European Environment Agency (2006) „The changing faces of Europe’s coastal areas“, *Publications of the European Communities*, 6, str. 1–112. Dostupno na: c:%5CUsers%5CJose%5CDocuments%5CReadCube Media%5CUntitled Article (2015-07-14T20-27-02Z).pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?q=The changing faces of Europe’s coastal areas&btnG=&hl=en&num=20&as\_sdt=0,22 VN - readcube.com.

Falconer, R. A. i Guoping Yu. (1991) „Effects of depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory model harbour“, *Proc. Institution Civil Engineers. Part 2*, 91, str. 561–576.

Farmer, A. (2010) *Managing Environmental Pollution, Managing Environmental Pollution*. doi: 10.4324/9780203440117.

Fischer, H. B. *i ostali* (1979) „Mixing in inland and coastal waters“, *Journal of Fluid Mechanics*, 114, str. 315–316. doi: 10.1017/S002211208223028X.

Fleming, L. E. *i ostali* (2011) „Review of Florida red tide and human health effects“, *Harmful Algae*, str. 224–233. doi: 10.1016/j.hal.2010.08.006.

Fountoulis, G. i Memos, C. (2005) „Optimization of openings for water renewal in a harbour basin“, *Journal of Marine Environmental Engineering*, 7(4).

Gaitanis, C. K. *i ostali* (2009) „Dissolved Oxygen Transmission in Harbor Basins Through Flushing Culverts“, u *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology*. Chania, Crete, Greece, str. 285–292.

Geyer, W. R. *i ostali* (2000) *Interaction between physical processes and ecosystem structure: A comparative approach*. Island Press.

Gómez, A. G. *i ostali* (2017) „Atlas of susceptibility to pollution in marinas. Application to the Spanish coast“, *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), str. 239–246. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.009.

Goring, D. G. i Nikora, V. I. (2002) „Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data“, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), str. 117–126.

Håkanson, L. i Blenckner, T. (2008) „A review on operational bioindicators for sustainable coastal management-Criteria, motives and relationships“, *Ocean and Coastal Management*, str. 43–72. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2007.04.005.

HHI (2018) *Tide Tables - Adriatic Sea - East Coast*.

Higuera, P., Lara, J. L. i Losada, I. J. (2013) „Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models. Application to OpenFOAM®.“, *Coastal Engineering*. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.07.002.

Hinrichsen, D. (1998) „The Coastal Population Explosion“, *The Next 25 Years: Global Issues*, str. 27–29. Dostupno na: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwikj4yL\\_4DSAhXrylQKHQ47BKoQFggwMAM&url=https%3A%2F%2Fpdfs.semanticscholar.org%2F1775%2F6d46a6a9ede105538d385566f9e853b9caba.pdf&usg=AFQjCNE75aVqANcr8zs5y5U4B7PWaPOoFQ&sig2=Bf6bH0\\_DJ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwikj4yL_4DSAhXrylQKHQ47BKoQFggwMAM&url=https%3A%2F%2Fpdfs.semanticscholar.org%2F1775%2F6d46a6a9ede105538d385566f9e853b9caba.pdf&usg=AFQjCNE75aVqANcr8zs5y5U4B7PWaPOoFQ&sig2=Bf6bH0_DJ).

Holthuijsen, L. H. (2007) *Waves in oceanic and coastal waters, Waves in Oceanic and Coastal Waters*. doi: 10.1017/CBO9780511618536.

Huang, G., Falconer, R. A. i Lin, B. (2017) „Integrated hydro-bacterial modelling for predicting bathing water quality“, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 188. doi: 10.1016/j.ecss.2017.01.018.

Hydrographic Institute of the Republic of Croatia (2011) *Wave Condition Monitoring within Port of Rijeka – Zagreb Pier*.

Ignatiades, L. i Gotsis-Skretas, O. (2010) „A review on toxic and harmful algae in Greek coastal waters (E. Mediterranean Sea)“, *Toxins*, 2(5), str. 1019–1037. doi: 10.3390/toxins2051019.

International Maritime Organization (2010) *Manual on oil spill risk evaluation and assessment of response preparedness*. London.

Jacobsen, N. G. i ostali (2018) „Numerical prediction of integrated wave loads on crest walls on top of rubble mound structures“, *Coastal Engineering*. Elsevier B.V., 142, str. 110–124. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.10.004.

Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. i Fredsøe, J. (2012) „A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®“, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. doi: 10.1002/flid.2726.

Johnson, J. W. (1952) „Generalized wave diffraction diagrams“, u *2nd international conference on coastal engineering*. Houston, USA, str. 6–23.

Journee, J. M. J. i Massie, W. W. (2001) *Offshore hydromechanics*. First. Delft.

von Kármán, T. (1930) „Mechanical Similitude and Turbulence“, *NACA Technical Memorandum*.

Keils, J. (2008) „Hydraulic performance of damaged-end corrugated steel pipe culverts“, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(9), str. 918–924. doi: 10.1139/L08-055.

Kim, K.-H., Seo, H. i Kobayashi, N. (2011) „Field assessment of seawater exchange breakwater“, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 137(3). doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000058.

Kostelac, M. (2009) „Povijest vodovoda i vodoopskrbe liburnije 1884.-2009.“, *Hrvatske Vode*, 17(69/70), str. 269–280.

Van de Kreeke, J. (1983) „Residence Time: Application to Small Boat Basins“, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 109(4), str. 416–428. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:4(416).

Larsen, B. E. i Fuhrman, D. R. (2018) „On the over-production of turbulence beneath surface waves in Reynolds-averaged Navier–Stokes models“, *Journal of Fluid Mechanics*. doi: 10.1017/jfm.2018.577.

Lončar, G. i ostali (2016) „The impact of culverts on the seawater exchange and wave action in marina waters“, *Hrvatske Vode*, 24(98).

Lončar, G. *i ostali* (2017) „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“, *Hrvatske Vode*, 25(101).

Loreau, M. (2010) *From Populations to Ecosystems. Theoretical foundations for a new ecological synthesis, Monographs in population biology*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Luketina, D. (1998) „Simple Tidal Prism Models Revisited“, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46(January 1996), str. 77–84. doi: 10.1006/ecss.1997.0235.

MacDonald, D. D. *i ostali* (2004) „Development, evaluation, and application of sediment quality targets for assessing and managing contaminated sediments in Tampa Bay, Florida.“, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 46(2), str. 147–161. doi: 10.1007/s00244-003-2270-z.

Manizza, M. *i ostali* (2008) „Ocean biogeochemical response to phytoplankton-light feedback in a global model“, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(10). doi: 10.1029/2007JC004478.

Mayer, S., Garapon, A. i Sørensen, L. S. (1998) „A fractional step method for unsteady free-surface flow with applications to non-linear wave dynamics“, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. doi: 10.1002/(SICI)1097-0363(19980815)28:2<293::AID-FLD719>3.0.CO;2-1.

Menter, F. R. (1994) „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications“, *AIAA Journal*, 32(8), str. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149.

Michael J. Kennish (1997) *Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution*, CRC Press.

Michener, W. K. *i ostali* (1997) „Climate change, hurricanes and tropical storms, and rising sea level in coastal wetlands“, *Ecological Applications*, 7(3), str. 770–801. doi: 10.1890/1051-0761(1997)007[0770:CCHATS]2.0.CO;2.

Moestrup, Ø. *i ostali* (2009) *IOC-UNESCO Taxonomic Reference List of Harmful Micro Algae*, Accessed at <http://www.marinespecies.org/hab> on 2016-05-24.

Monsen, N. E. *i ostali* (2002) „A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales“, *Limnology and Oceanography*, 47(5), str. 1545–1553. doi: 10.4319/lo.2002.47.5.1545.

Moore, S. K. *i ostali* (2008) „Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health“, *Environ Health*, 7 Suppl 2, str. S4. doi: 1476-069X-7-S2-S4 [pii]r10.1186/1476-069X-7-S2-S4.

Mudryk, Z. *i ostali* (2014) „Occurrence of potentially human pathogenic bacteria in the seawater and in the sand of the recreational coastal beach in the southern Baltic Sea“, *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 43(4). doi: 10.2478/s13545-014-0154-7.

Naeem, S., Duffy, J. E. i Zavaleta, E. (2012) „The Functions of Biological Diversity in an Age of Extinction“, *Science*, 336(6087), str. 1401–1406. doi: 10.1126/science.1215855.

Nahla, M. (2009) *Study of ecological risk assessment of PAHs and phenols in produced water after partitioning in the water phase*. Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland.

Nece, B. R. E. i Asce, F. (1984) „Planform effects on tidal flushing of marinas“, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110(2), str. 251–269. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:2(251).

Nece, R. E. i Asce, F. (1984) „Planform Effects on Tidal Flushing“, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110(2), str. 251–269. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:2(251).

Neff, J. M. (2002) „Bioaccumulation in Marine Organisms“, *Bioaccumulation in Marine Organisms*, str. 1–35. doi: 10.1016/B978-008043716-3/50002-6.

Ohmura, Y. (2007) „Wave set-up induced flow in seawater exchange structures with blockwork mounds“, u *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*. San Diego, str. 4374–4385.

Ohmura, Y. (2009) „Mass transport induced flow in seawater exchange structures with perforated wall“, u *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, str. 3509–3521.

Pan, K. i Wang, W.-X. (2012) „Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China“, *Science of The Total Environment*, 421–422, str. 3–16. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.03.013.

Pereira, E. *i ostali* (2013) „Microbiological and mycological beach sand quality in a volcanic environment: Madeira archipelago, Portugal“, *Science of the Total Environment*, 461–462, str. 469–479. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.025.

Peris-Mora, E. *i ostali* (2005) „Development of a system of indicators for sustainable port management“, *Marine Pollution Bulletin*, 50(12), str. 1649–1660. doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.06.048.

PIANC (1995) *Criteria for movements of moored ships in harbours-A practical guide*.

Pies, C. *i ostali* (2008) „Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils“, *Chemosphere*, 72(10), str. 1594–1601. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.04.021.



Pinto, M. I. *i ostali* (2013) „Effects of ultrasonic irradiation and direct heating on extraction of priority pesticides from marine sediments“, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93(15), str. 1638–1659. doi: 10.1080/03067319.2013.831409.

Pinto, M. I. *i ostali* (2016) „Priority pesticides in sediments of European coastal lagoons: A review“, *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier B.V., 112(1–2), str. 6–16. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.101.

Piroddi, C. *i ostali* (2015) „Using ecological models to assess ecosystem status in support of the European Marine Strategy Framework Directive“, *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 58, str. 175–191. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.05.037.

Recreational navigation Commission (2008) *Protecting water quality in marinas*.

Rezayi, M. *i ostali* (2013) „A thermodynamic study on the complex formation between tris(2-pyridyl)methylamine (tpm) with  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Cr^{3+}$  cations in water-acetonitrile binary solutions using the conductometric method“, *International Journal of Electrochemical Science*, 8(5).

Ritson, J. P. *i ostali* (2014) „The impact of climate change on the treatability of dissolved organic matter (DOM) in upland water supplies: a UK perspective.“, *The Science of the total environment*, 473–474, str. 714–30. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.095.

Roberts, J. i Roberts, T. D. (1978) „Use of the Butterworth Low-Pass Filter for Oceanographic Data“, *Journal of Geophysical Research*, 83(1).

Sanford, L. P., Boicourt, W. C. i Rives, S. R. (1992) „Model For Estimating Tidal Flushing of Small Embayments“, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 118, str. 635–654.

Schippmann, B. *i ostali* (2013) „A model tool for bathing water quality management: A case study on Salmonella occurrence at the southern Baltic coast“, *Ocean & Coastal Management*, 82, str. 71–84. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2013.05.006.

Schmidt, L. D. (2005) „Engineering of Chemical Reactions“, *Engineering of Chemical Reactions*, str. 601–605. doi: 10.1115/1.2709976.

Schmidt, L. E. i Hansen, P. J. (2001) „Allelopathy in the prymnesiophyte *Chrysochromulina polylepis*: Effect of cell concentration, growth phase and pH“, *Marine Ecology Progress Series*, 216, str. 67–81. doi: 10.3354/meps216067.

Schwartz, R. A. (1989) *The flushing characteristics of Hillarys boat harbor*. University of Western Australia.

Schwartz, R. A. i Imberger, J. (1988) „Flushing Behaviour of a Coastal Marina“, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(21), str. 2626–2640.

Scott, D., Gössling, S. i Hall, C. M. (2012) „International tourism and climate change“, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(3), str. 213–232. doi: 10.1002/wcc.165.

Shumway, S. E. (1990) „A Review of the Effects of Algal Blooms on Shellfish and Aquaculture“, *Journal of the World Aquaculture Society*, 21(2), str. 65–104. doi: 10.1111/j.1749-7345.1990.tb00529.x.

Sindermann, C. J. (2006) *Coastal Pollution Effects on Living Resources and Humans*, *Taylor & Francis Marine Science Series*. doi: 10.1080/00207230903028318.

Singh, N. i Turner, A. (2009) „Trace metals in antifouling paint particles and their heterogeneous contamination of coastal sediments“, *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier Ltd, 58(4), str. 559–564. doi: 10.1016/j.marpolbul.2008.11.014.

Slobodna Dalmacija (2014) *Naglo razmnožavanje algi u splitskoj luci*. Dostupno na: <http://slobodnadalmacija.hr/dalmacija/split/clanak/id/238417/naglo-razmnozavanje-algi-u-splitskoj-luci> (Pristupljeno: 01. siječanj 2017.).

Small, C. i Nicholls, R. J. (2003) „A global analysis of human settlement in coastal zones“, *Journal of Coastal Research*, 19(3), str. 584–599. doi: 10.2307/4299200.

Smart, A. i Smart, J. (2003) „Urbanization and the Global Perspective“, *Annual Review of Anthropology*, 32(1), str. 263–285. doi: 10.1146/annurev.anthro.32.061002.093445.

Smayda, T. J. (1997) „Harmful algal blooms: Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea“, *Limnology and Oceanography*, 42(5part2), str. 1137–1153. doi: 10.4319/lo.1997.42.5\_part\_2.1137.

Smith, C. D. i Oak, A. G. (1995) „Culvert inlet efficiency“, *Canadian journal of civil engineering*, 22(3).

Smith, H., Carter, R. i Jones, D. (2002) *Achieving and maintaining water quality in small boat harbors*.

Solé, J., Estrada, M. i Garcia-Ladona, E. (2006) „Biological control of harmful algal blooms: A modelling study“, *Journal of Marine Systems*, 61(3-4 SPEC. ISS.), str. 165–179. doi: 10.1016/j.jmarsys.2005.06.004.

Stagonas, D. i *ostali* (2009) „Fundamental investigation of water flow in harbors through a flushing culvert“, u Singletary, S. (ur.) *Water Engineering for a Sustainable Environment ranging*. Vancouver, British Columbia, Canada: International Association of Hydraulic Engineering and Research, str. 7288–7295.

Stamou, I. i ostali (2004) „Improvement of marina design technology using hydrodynamic models“, *Global Nest Journal*, 6(1), str. 63–72.

Suthers, I. i Rissik, D. (2009) *Plankton: A Guide to Their Ecology and Monitoring for Water Quality*.

Sylvan, J. B. i Ammerman, J. W. (2013) „Seasonal distributions of organic nutrients on the Louisiana continental shelf and their implications for nutrient limitation and hypoxia formation“, *Marine Chemistry*, 154, str. 113–123. doi: 10.1016/j.marchem.2013.05.008.

Tavakoly Sany, S. B. i ostali (2014) „A review of strategies to monitor water and sediment quality for a sustainability assessment of marine environment“, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(2), str. 813–833. doi: 10.1007/s11356-013-2217-5.

The OpenFOAM Foundation (2018) *OpenFOAM v6 User Guide*.

Thompson, R. C., Crowe, T. P. i Hawkins, S. J. (2002) „Rocky intertidal communities: past environmental changes, present status and predictions for the next 25 years“, *Environmental Conservation*, 29(02). doi: 10.1017/S0376892902000115.

Tilman, D., Reich, P. B. i Knops, J. M. H. (2006) „Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment“, *Nature*, 441(7093), str. 629–632. doi: 10.1038/nature04742.

Timmerman, P. i White, R. (1997) „Megahydropolis: Coastal cities in the context of global environmental change“, *Global Environmental Change*, 7(3), str. 205–234. doi: 10.1016/S0959-3780(97)00009-5.

Tsoukala i Moutzouris (2009a) „A 3-D experimental study on the beneficial role of flushing culverts in sea water quality“, u *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*.

Tsoukala i Moutzouris (2009b) „Wave transmission in harbors through flushing culverts“, *Ocean Engineering*, 36(6–7), str. 434–445. doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.01.005.

Tsoukala, V. K. i ostali (2010) „Wave and dissolved oxygen transmission analysis in harbors using flushing culverts: An experimental approach“, *Global Nest Journal*, 12(2), str. 152–160.

Tsoukala, V. K., Katsardi, V. i Belibassakis, K. A. (2014) „Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures“, *Ocean Engineering*. Elsevier, 89(1), str. 211–229. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.08.009.

Tullis, B. P., Anderson, D. S. i Robinson, S. C. (2008) „Entrance loss coefficients and inlet control head-discharge relationships for buried-invert culverts“, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:6(831).

Tullis, B. P. i Robinson, S. C. (2008) „Quantifying culvert exit loss“, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(263).

U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration (2012) *Hydraulic design of highway culverts*. Third Edit.

Umgiesser, G. i ostali (2014) „Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling“, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, (1), str. 9026–9032. doi: 10.1002/2014JC010066. Received.

UNCTAD (2013) *Review of Maritime Transport 2014, Review of Maritime Transport - Annual Report*. New York and Genoa. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2017) „World Population Prospects The 2017 Revision Key Findings and Advance Tables“, *World Population Prospects The 2017*, str. 1–46. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

US Army Corps of Engineers (2002) *Coastal Engineering Manual*.

US Environmental Protection Agency Staff (1993) *Environmental Engineering for Small Boat Basins*.

US Environmental Protection Agency (1986) *Ambient Water Quality Criteria for Bacteria*.

Valdor, P. F., Gómez, A. G. i Puente, A. (2015) „Environmental risk analysis of oil handling facilities in port areas. Application to Tarragona harbor (NE Spain)“, *Marine Pollution Bulletin*, 90(1–2), str. 78–87. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.11.018.

Vallina, S. M. i ostali (2017) „Phytoplankton functional diversity increases ecosystem productivity and stability“, *Ecological Modelling*. Elsevier B.V., 361, str. 184–196. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.06.020.

Vila, M. i ostali (2001) „High resolution spatio-temporal detection of potentially harmful dinoflagellates in confined waters of the NW Mediterranean“, *Journal of Plankton Research*, 23(5), str. 497–514. doi: 10.1093/plankt/23.5.497.

Vlada Republike Hrvatske (2018) *Uredba o standardu kakvoće vode*. Zagreb.

Weber, N. B. (1971) *Fluid Mechanics for Civil Engineers*.

White, F. M. (2002) „Fluid Mechanics-5th“, *McGraw-Hill, New York*. doi: 10.1111/j.1549-8719.2009.00016.x. Mechanobiology.

Xie, Y., Qiu, N. i Wang, G. (2017) „Toward a better guard of coastal water safety—Microbial distribution in coastal water and their facile detection“, *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier Ltd, 118(1–2), str. 5–16. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.02.029.

Yin, J. i ostali (1998) „Flow Characteristics and Flushing Processes in Marinas and Coastal Embayments“, u Brebbia, C. A. i Sciutto, G. (ur.) *Proceedings of the 1st Int Conf on Maritime Engineering and Ports*. Genoa, Italy: Southampton : Computational Mechanics, 1998., str. 88–98. doi: 10.2495/MAR980101.

Yilmaz, a i ostali (2014) „Use of passive samplers in pollution monitoring: A numerical approach for marinas.“, *Environment international*, 73C, str. 85–93. doi: 10.1016/j.envint.2014.07.013.

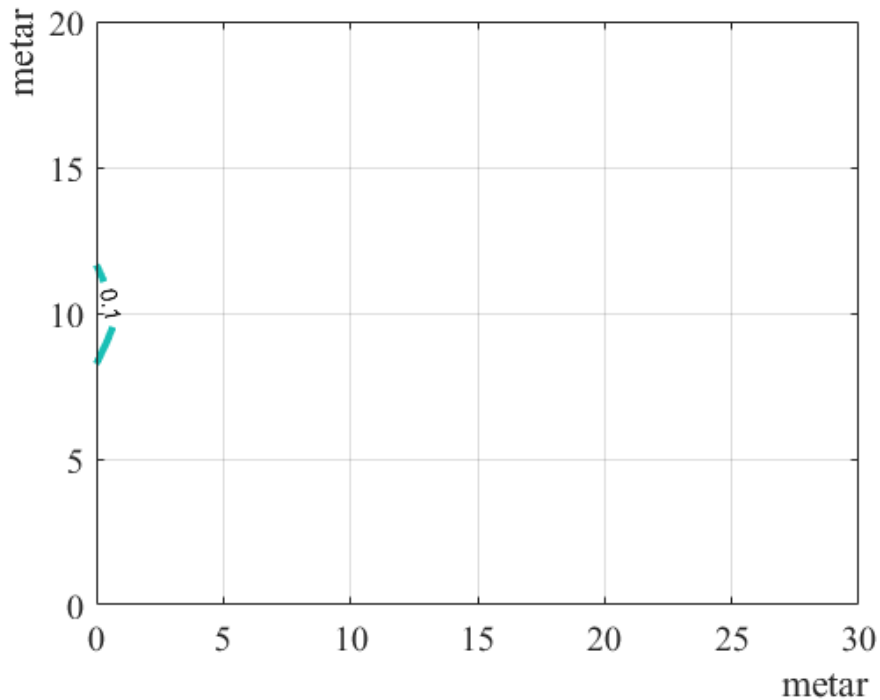
Zavod za javno zdrastvo (2016) *Obavijest o istjecanju fekalnih voda u more na plažama Pogačić i ispred hotela Libertas Rixos*. Dostupno na: <http://www.zzjzdnz.hr/hr/home/obavijesti/1023>.

Zhainakov, A. Z. i Kurbanaliev, A. Y. (2013) „Verification of the open package OpenFOAM on dam break problems“, *Thermophysics and Aeromechanics*, 20(4). doi: 10.1134/S0869864313040082.

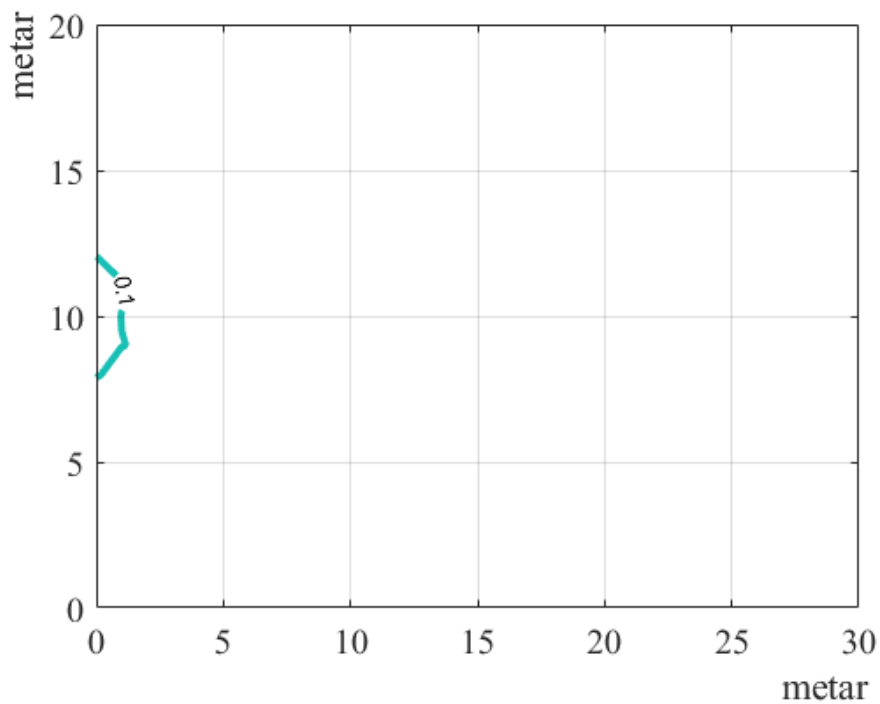
# **PRILOZI**

## 1 Planovi difrakcije valova

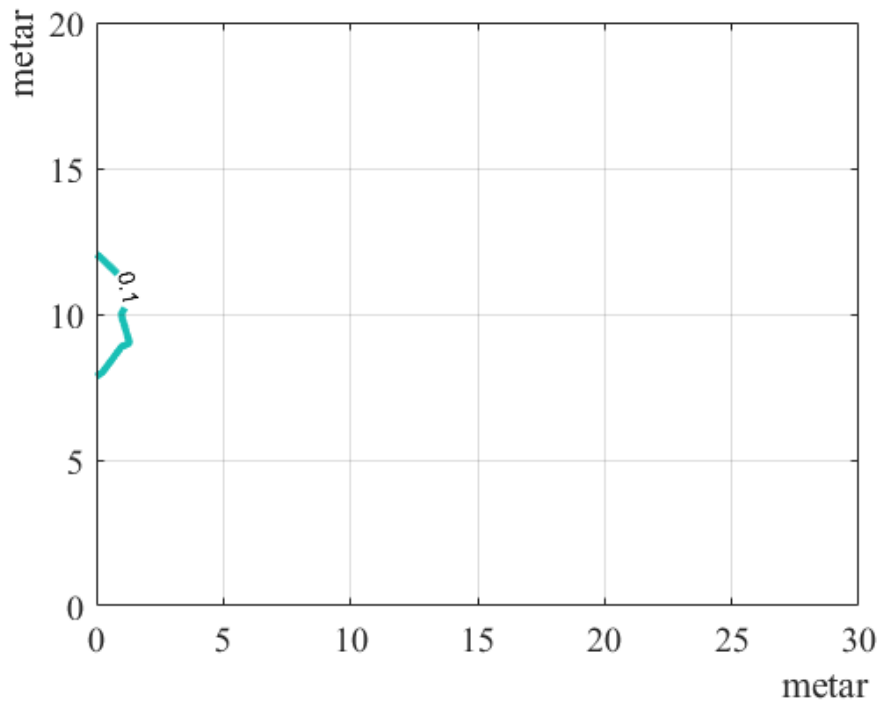
### Grupa propusta (a)



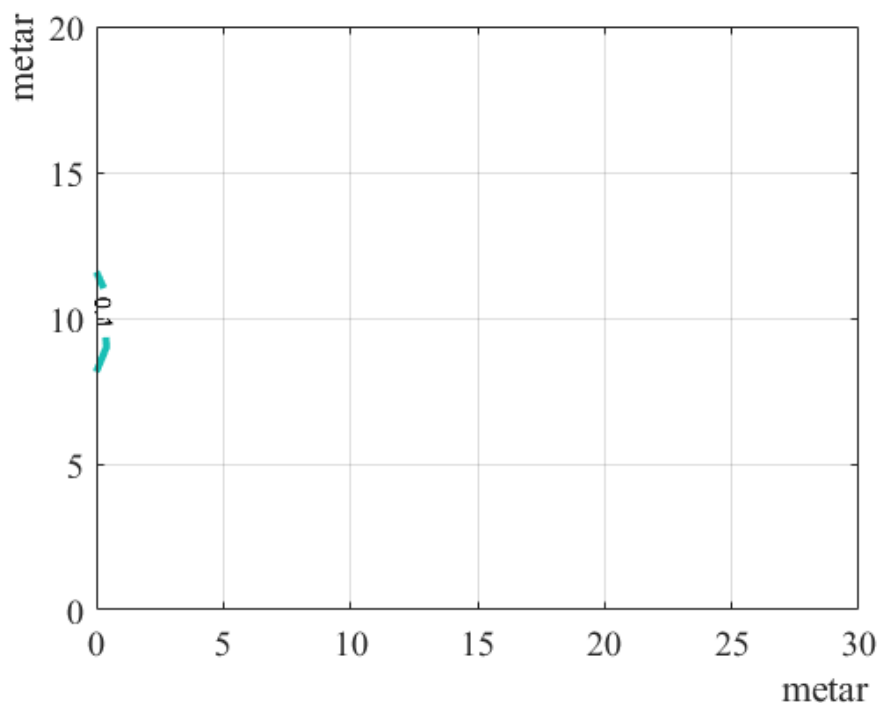
Prilog 1 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



Prilog 2 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)

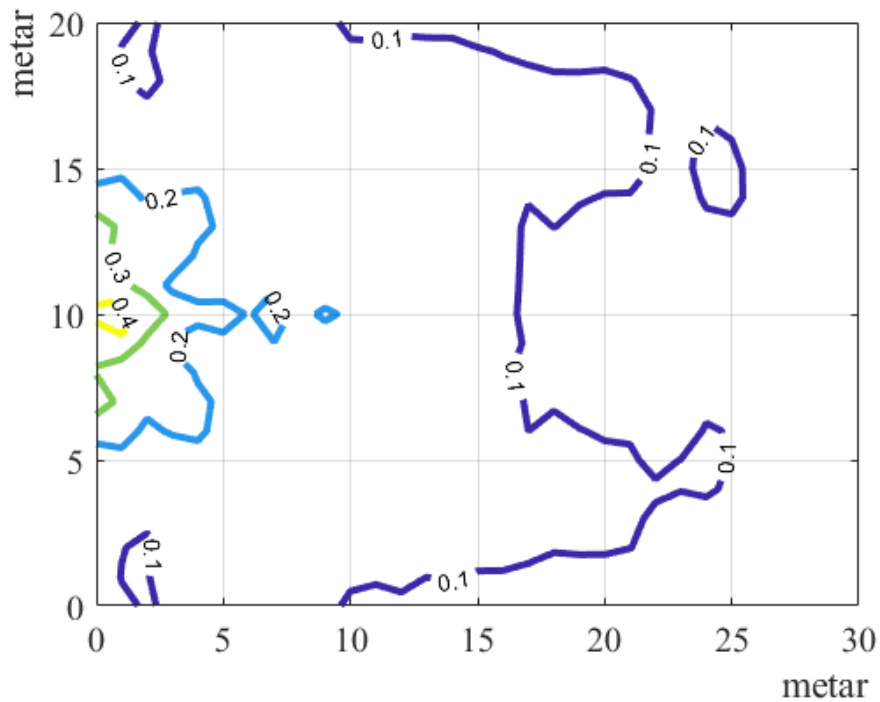


Prilog 3 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)

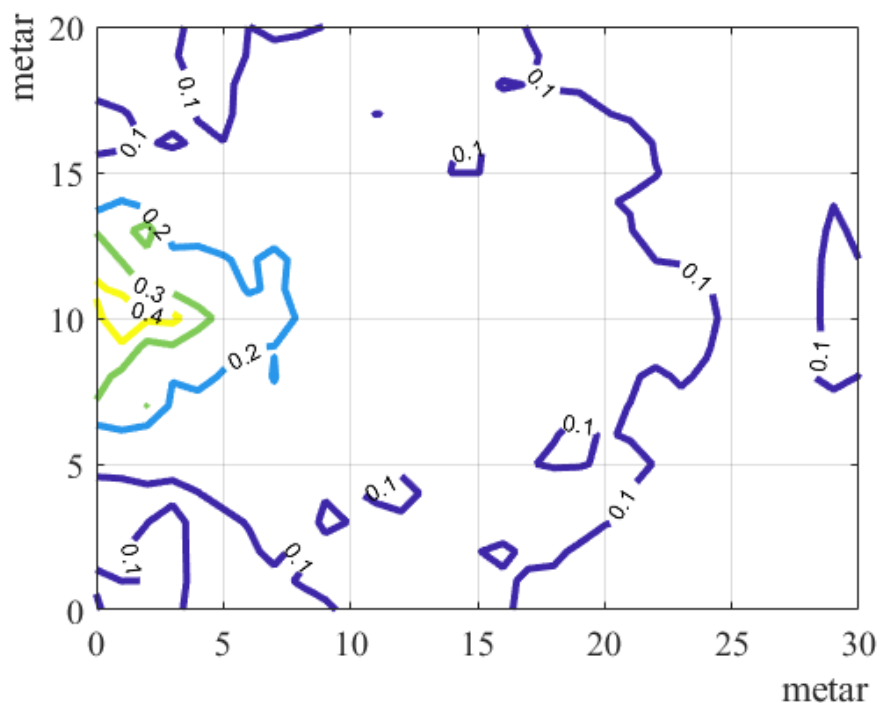


Prilog 4 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)

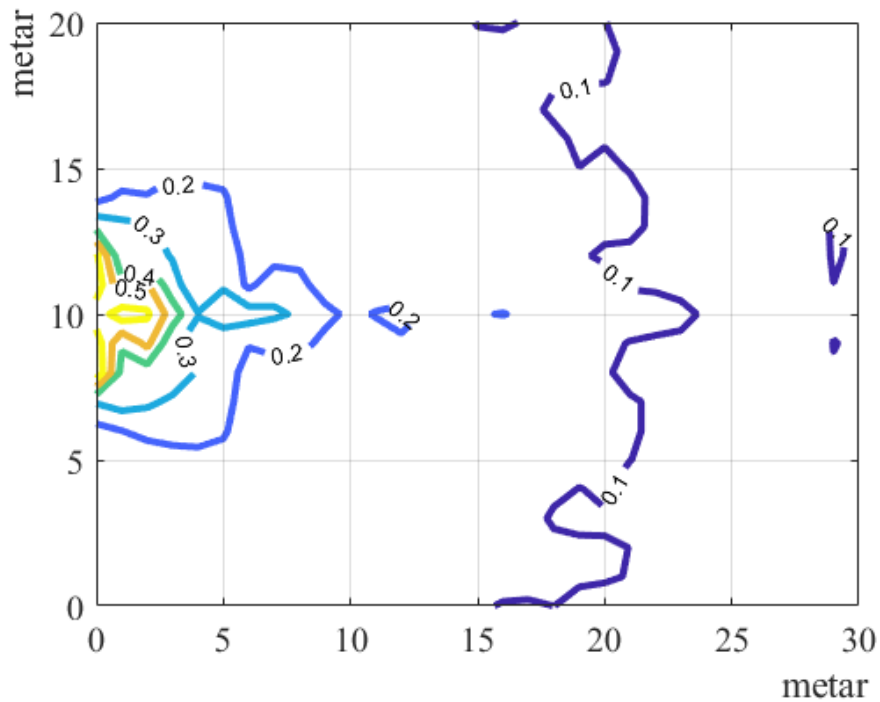




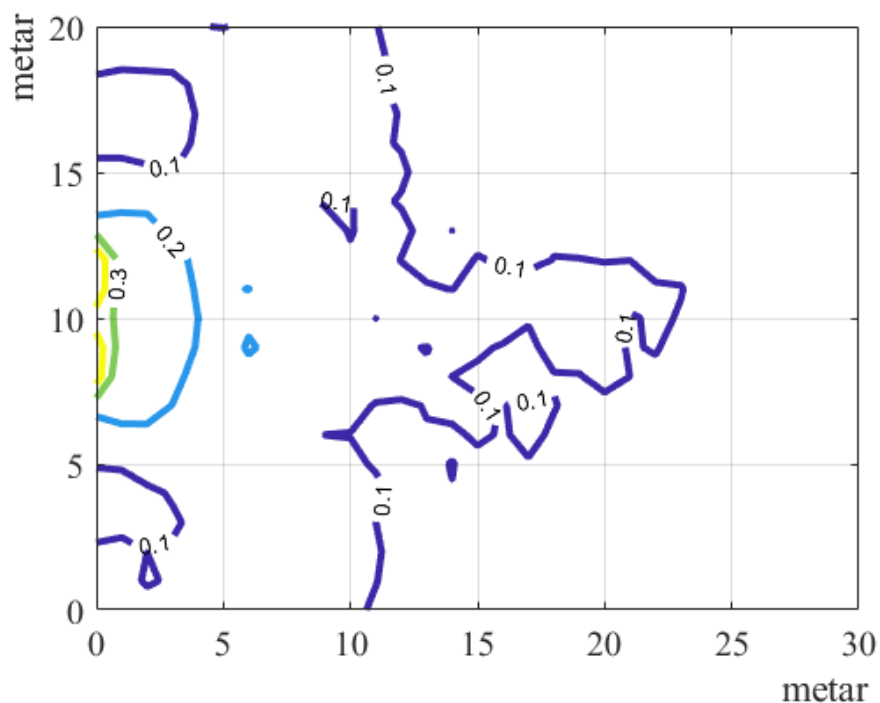
Prilog 5 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



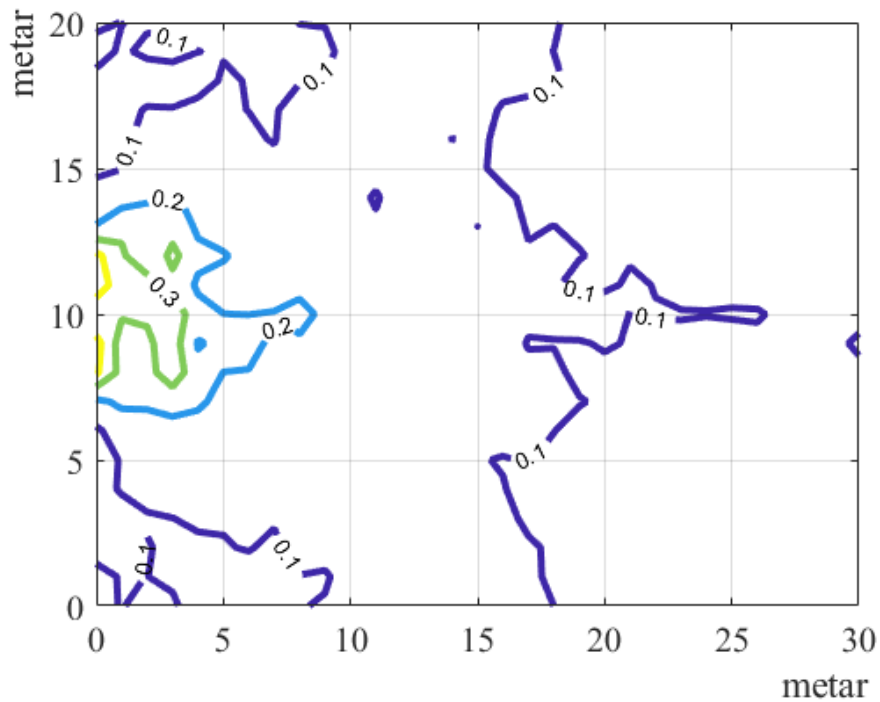
Prilog 6 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



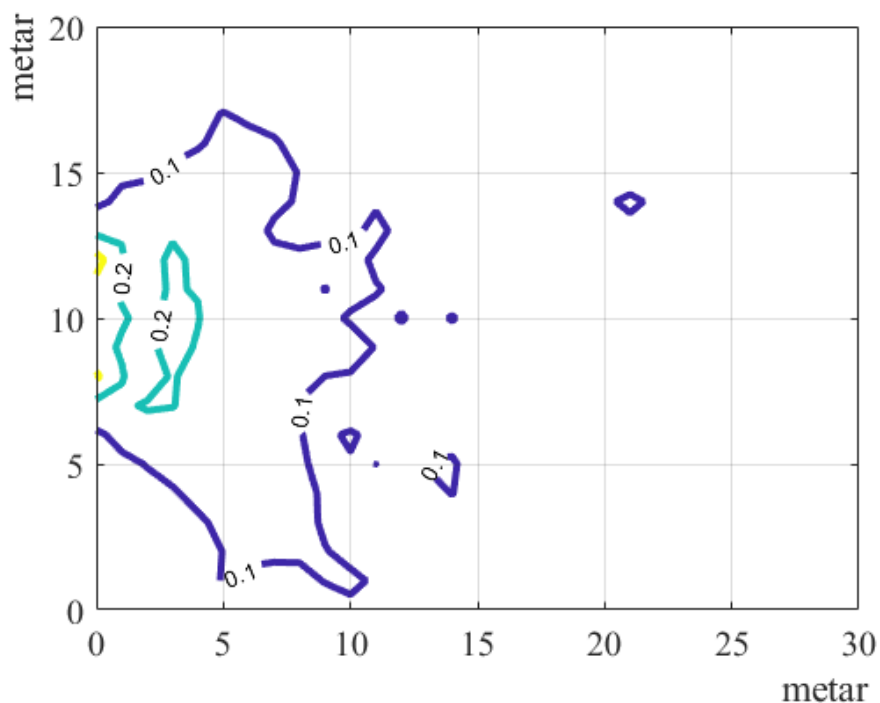
Prilog 7 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)



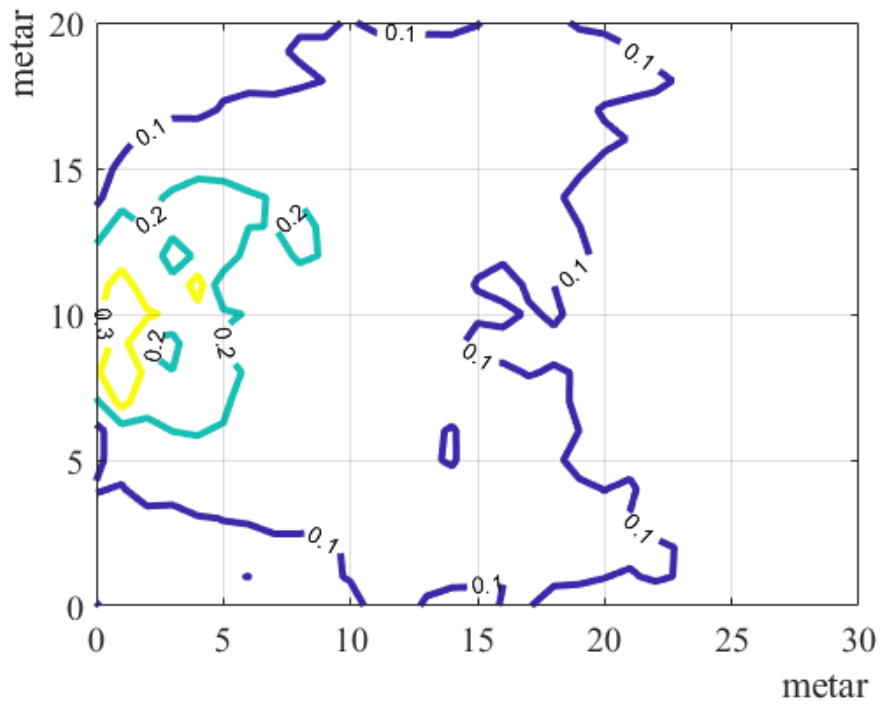
Prilog 8 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)



Prilog 9 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 4,80 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)

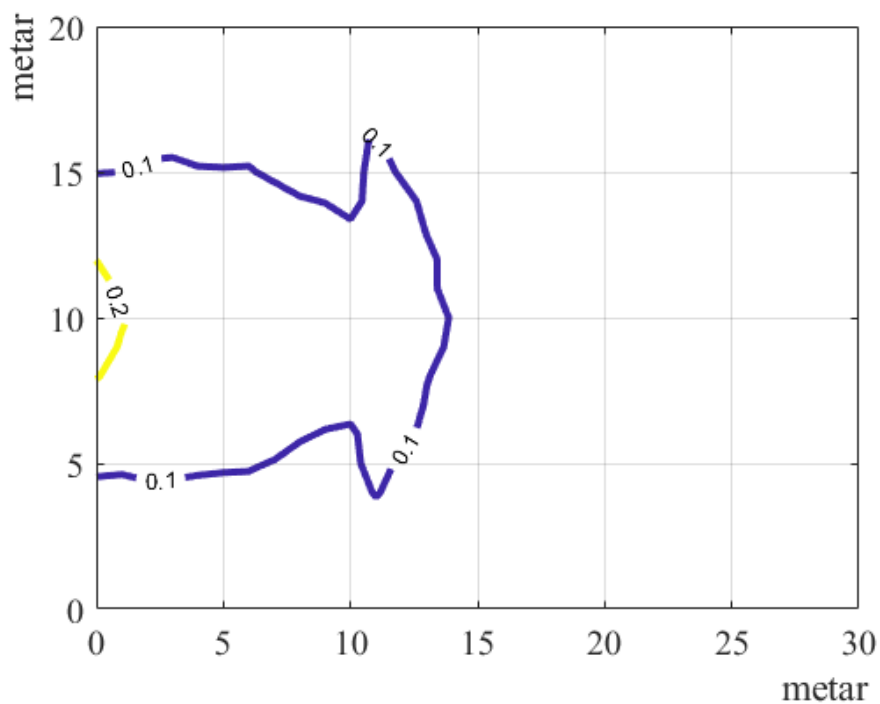


Prilog 10 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 4,38 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)

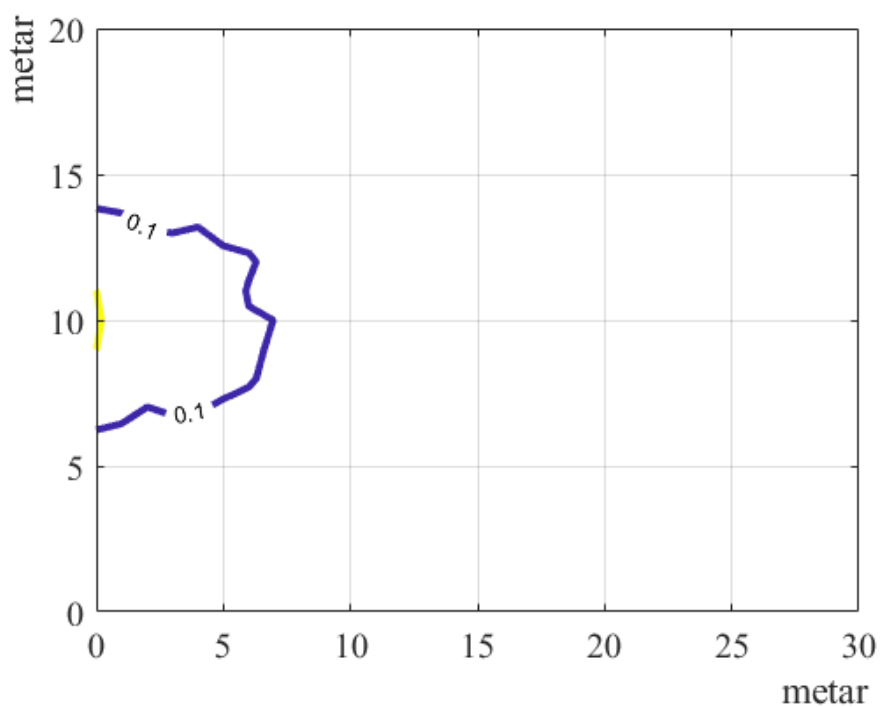


Prilog 11 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 5,37 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)

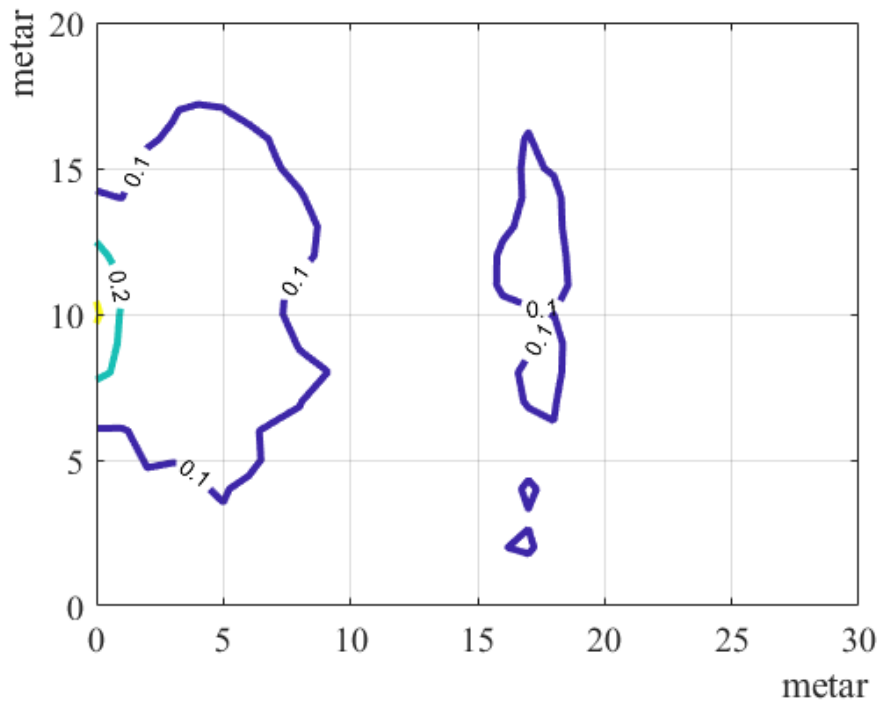
**Grupa propusta (b)**



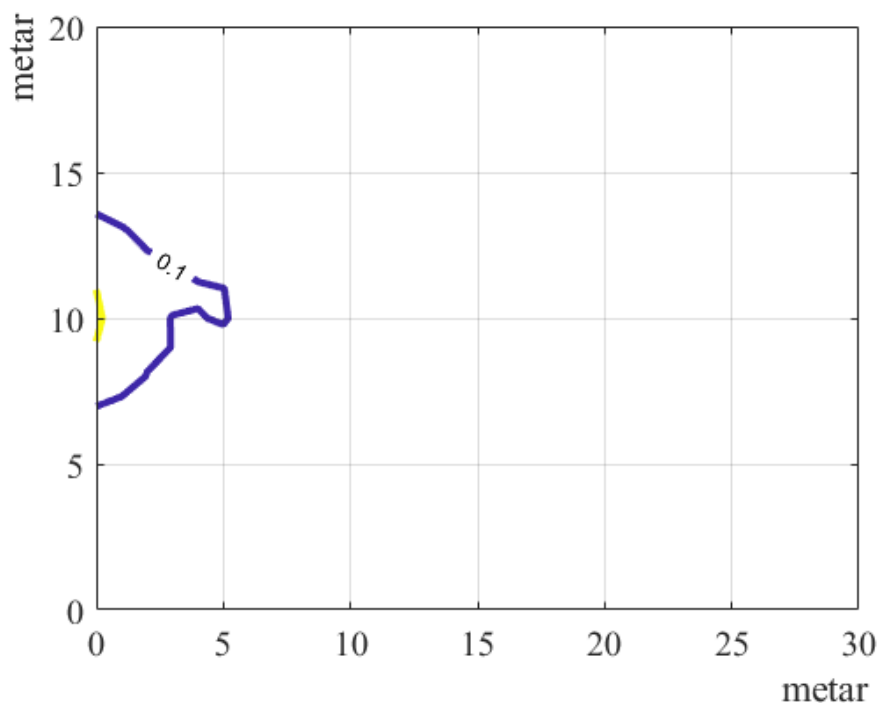
Prilog 12 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



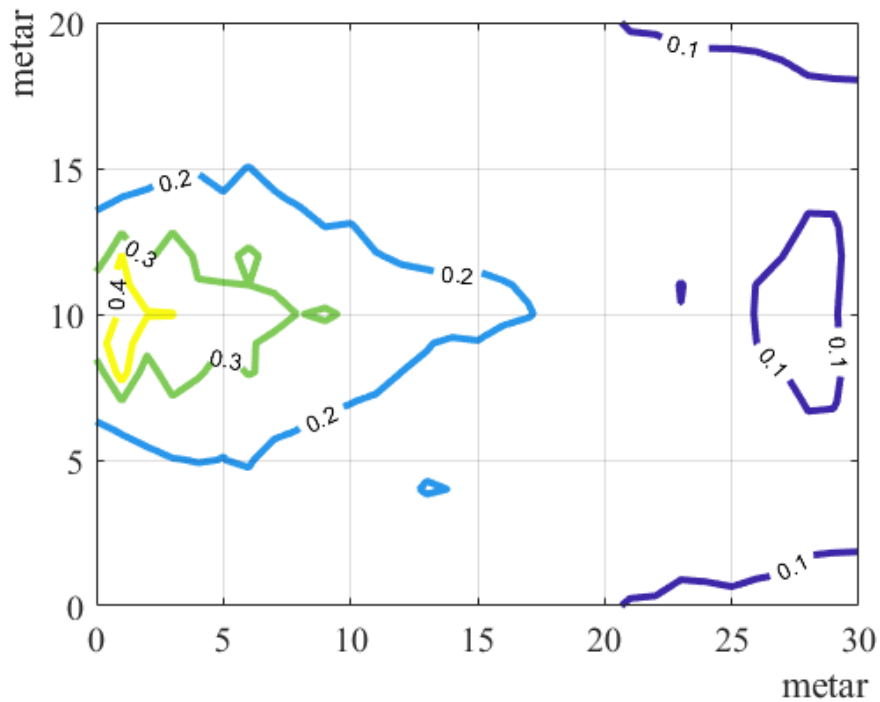
Prilog 13 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



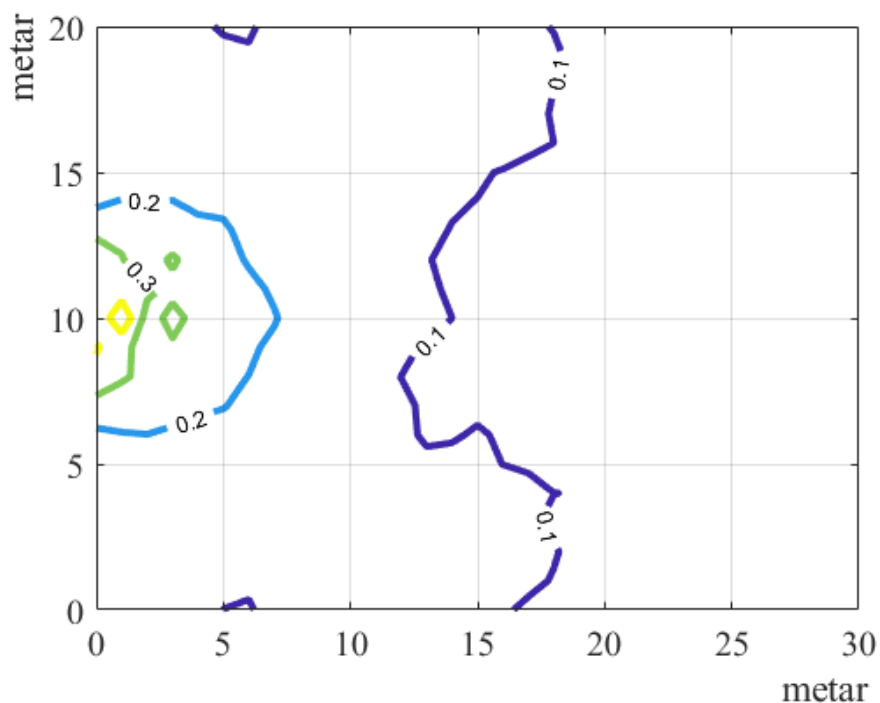
Prilog 14 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



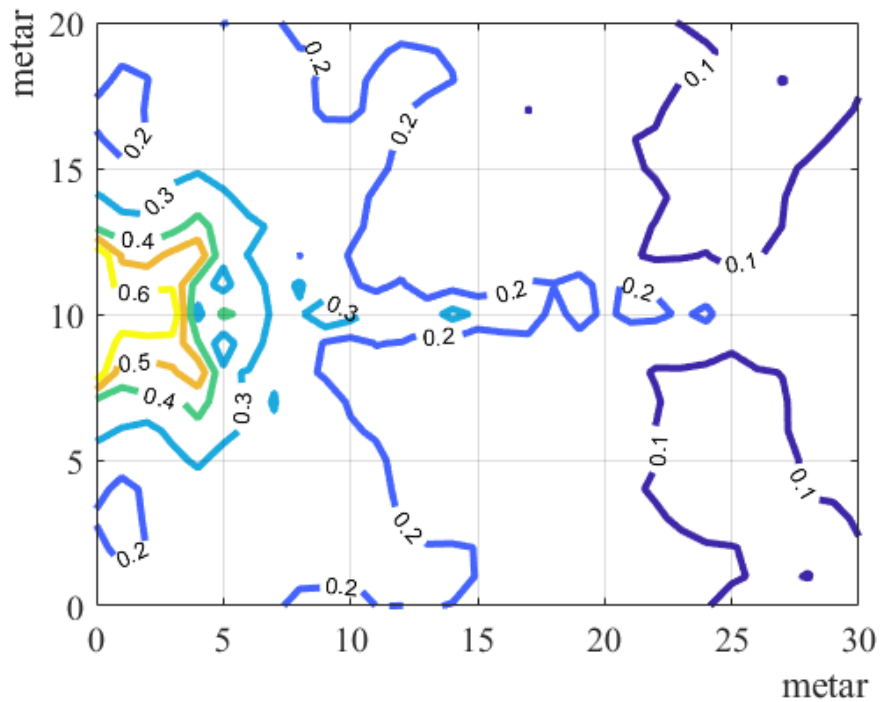
Prilog 15 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



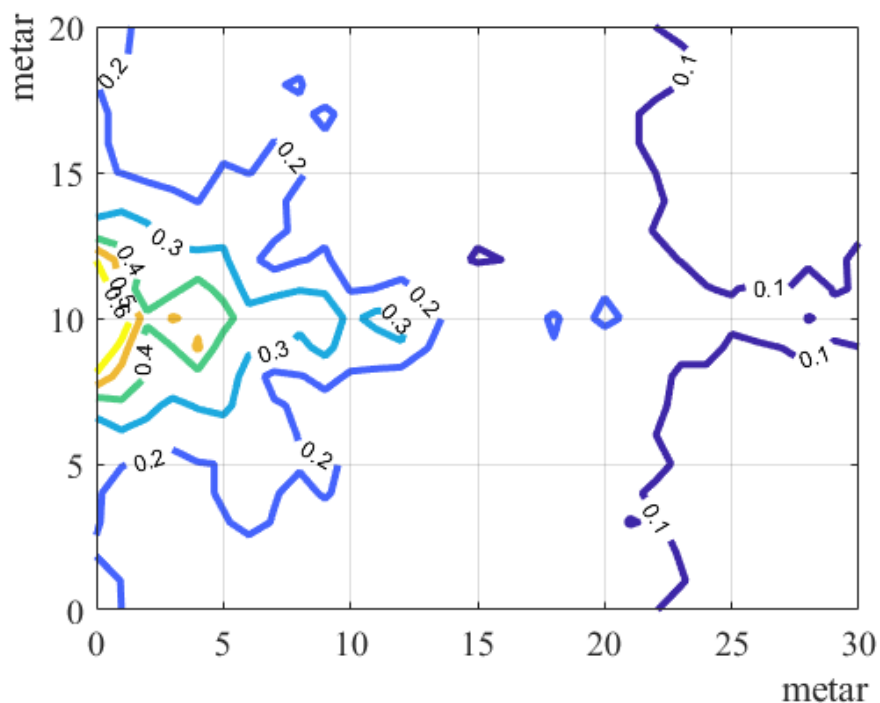
Prilog 16 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)



Prilog 17 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)

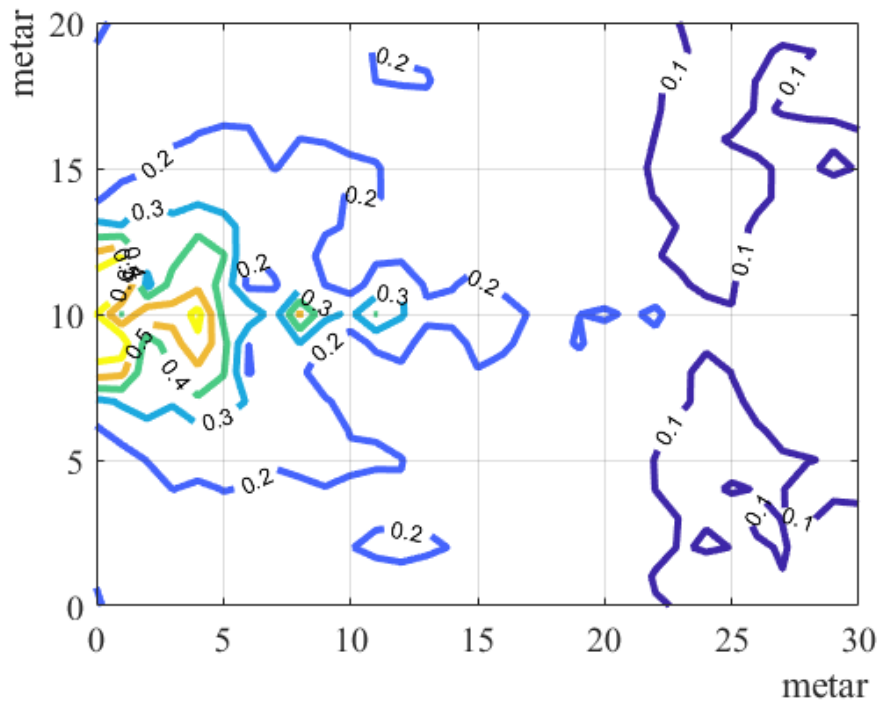


Prilog 18 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)

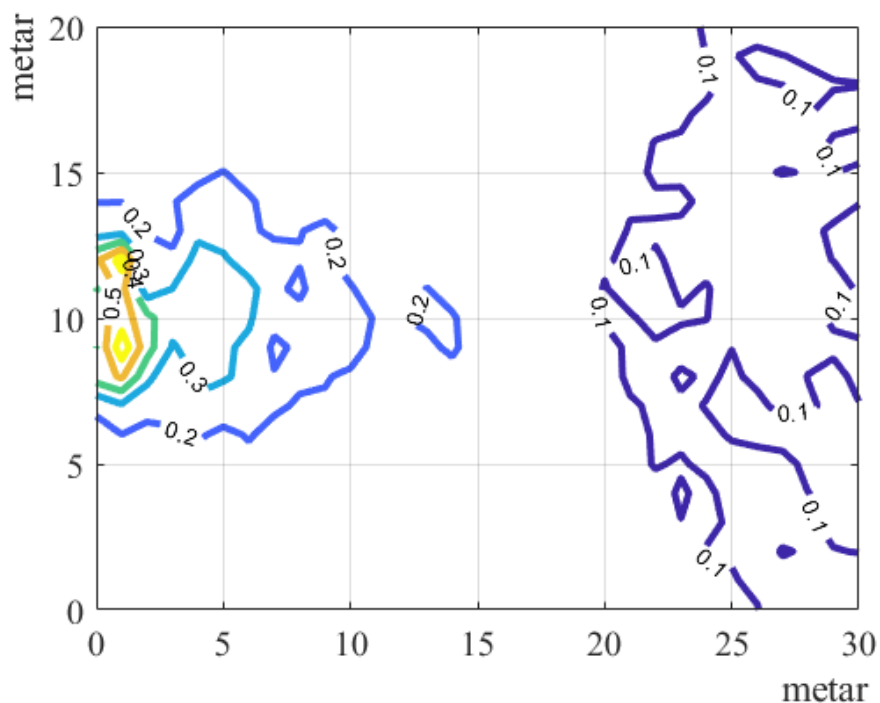


Prilog 19 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)

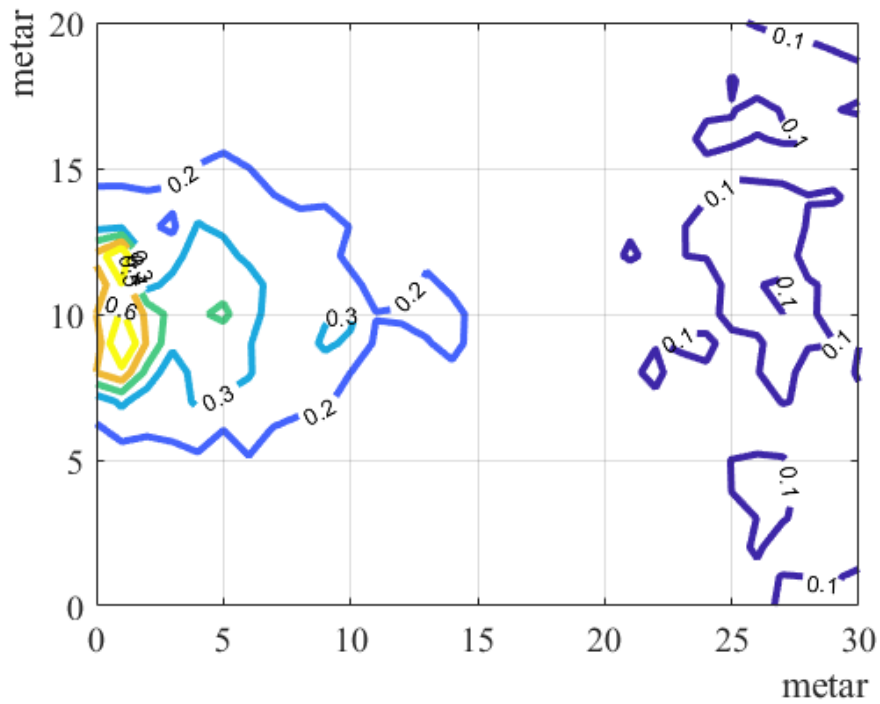




Prilog 20 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 4,80 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

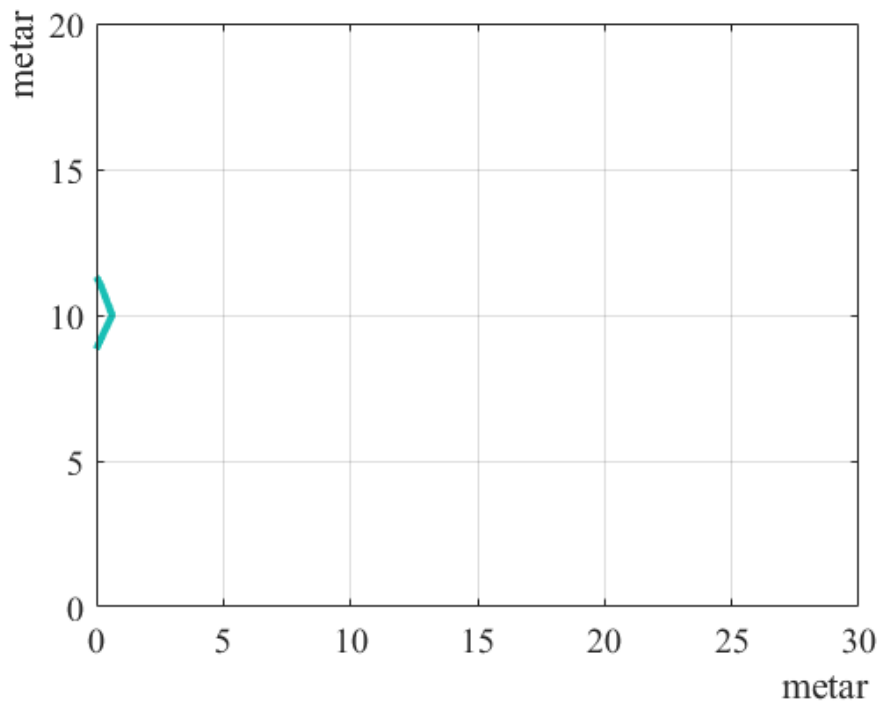


Prilog 21 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 4,38 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

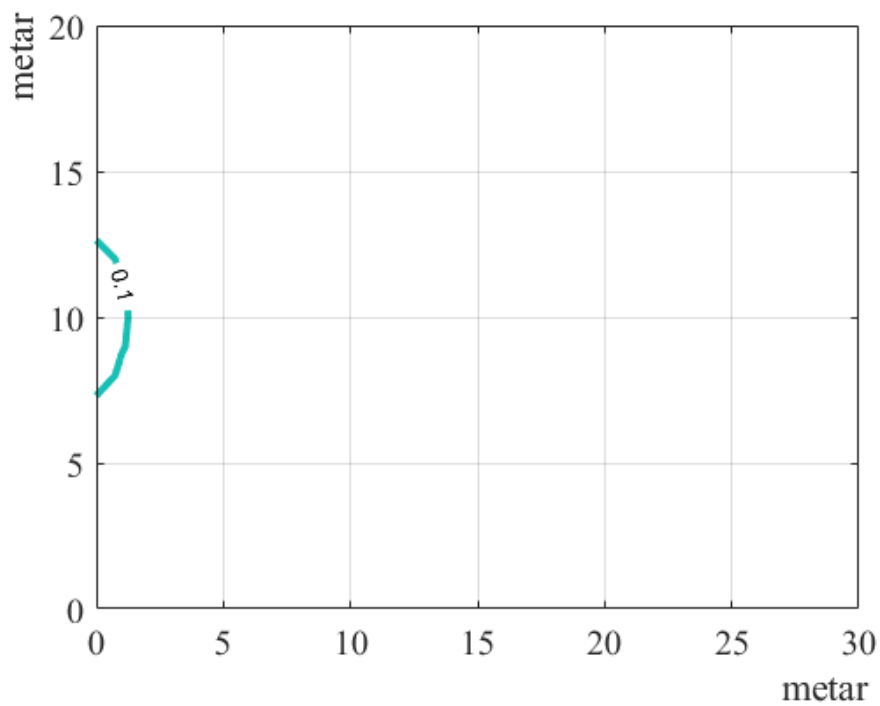


Prilog 22 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 5,37 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

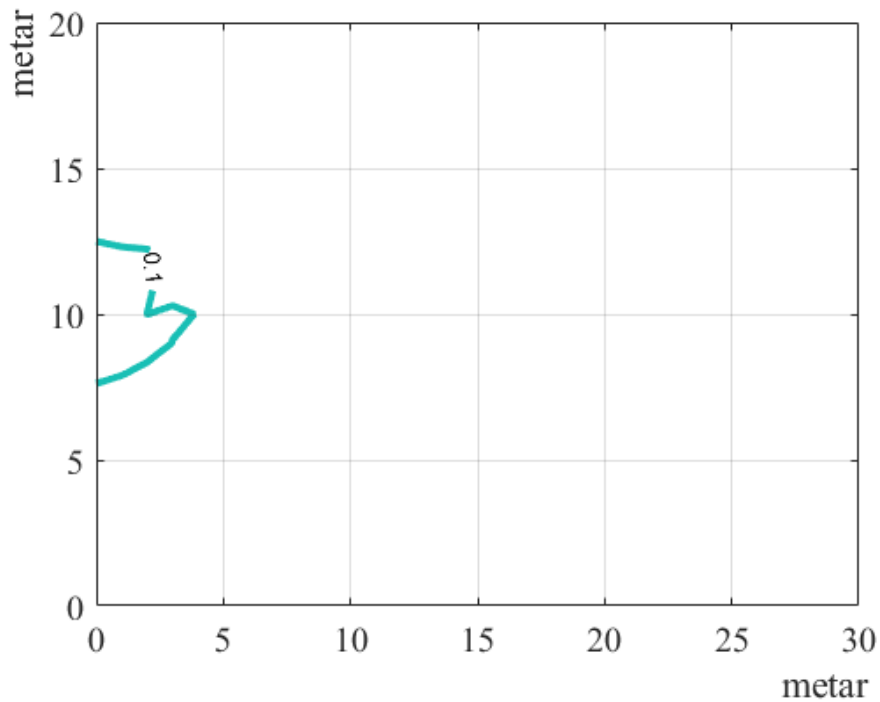
**Grupa propusta (c)**



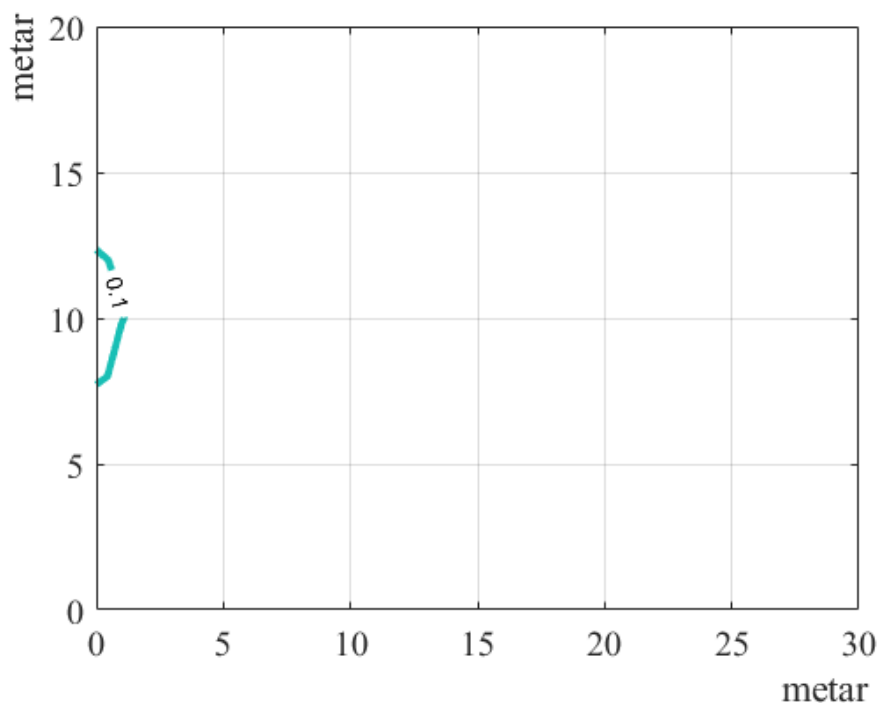
Prilog 23 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



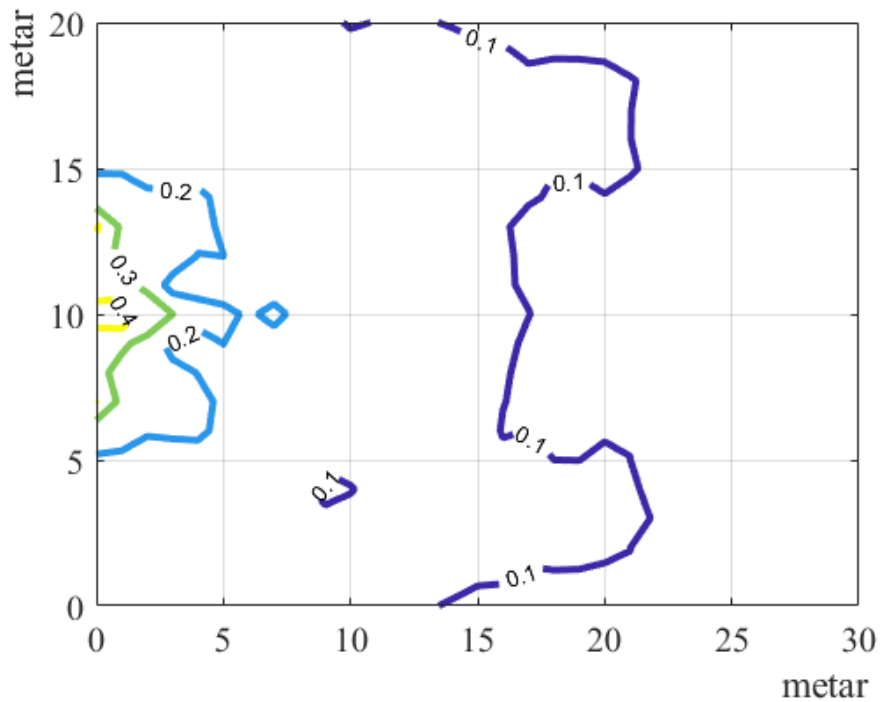
Prilog 24 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



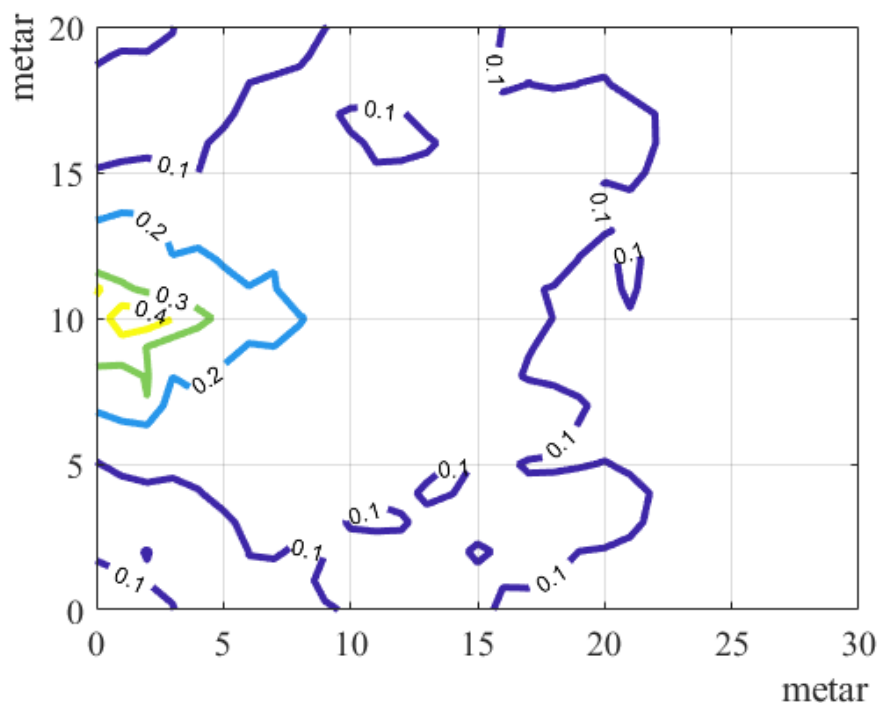
Prilog 25 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



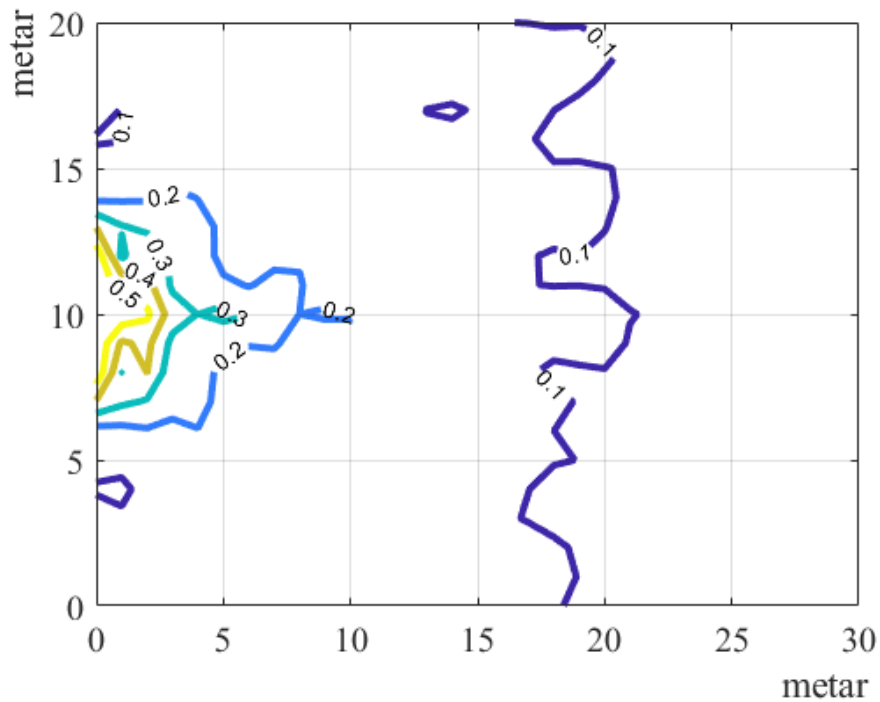
Prilog 26 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



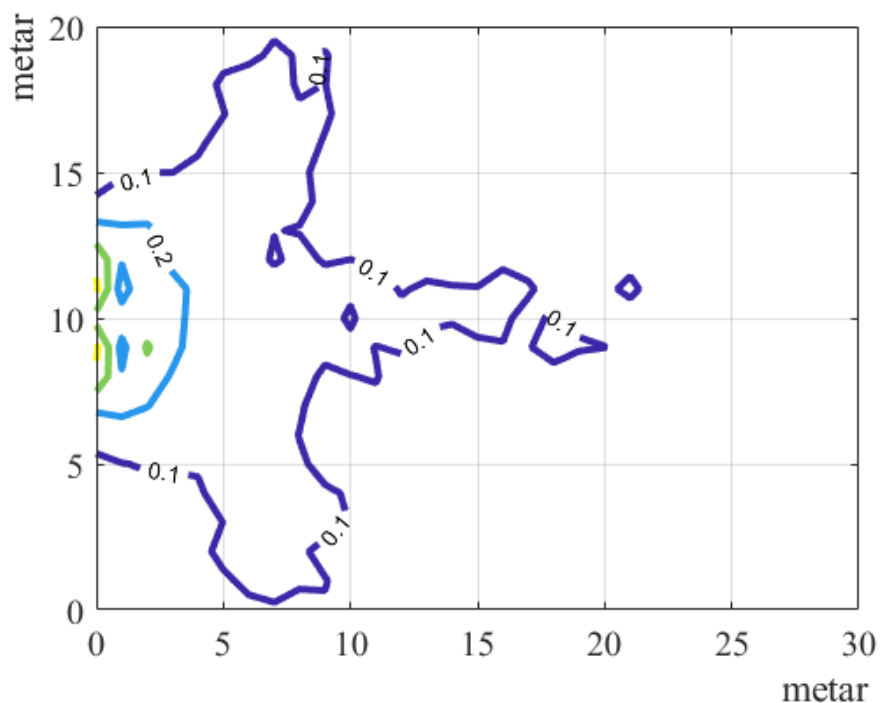
Prilog 27 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)



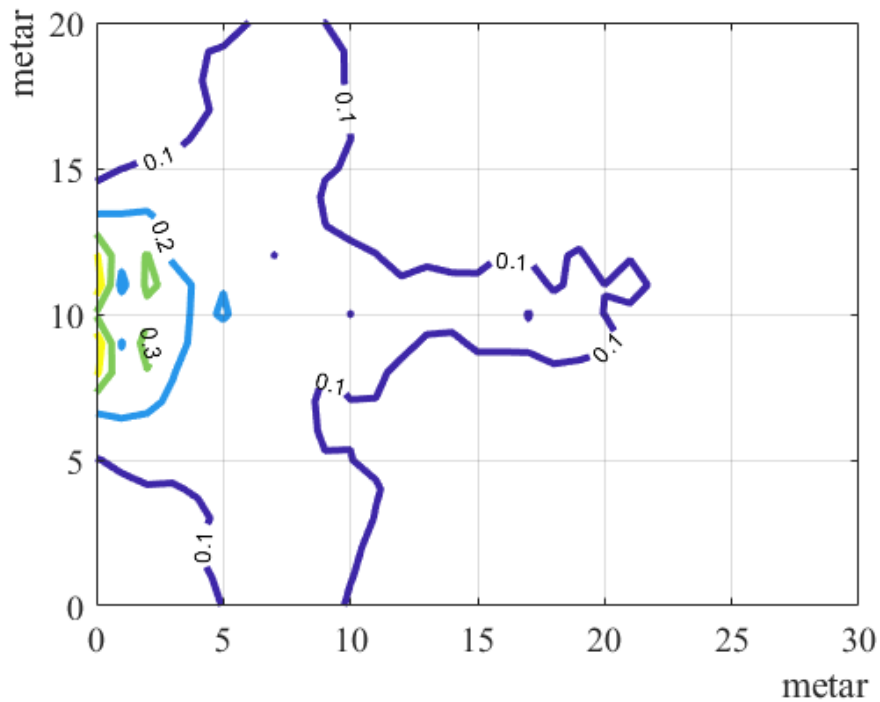
Prilog 28 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)



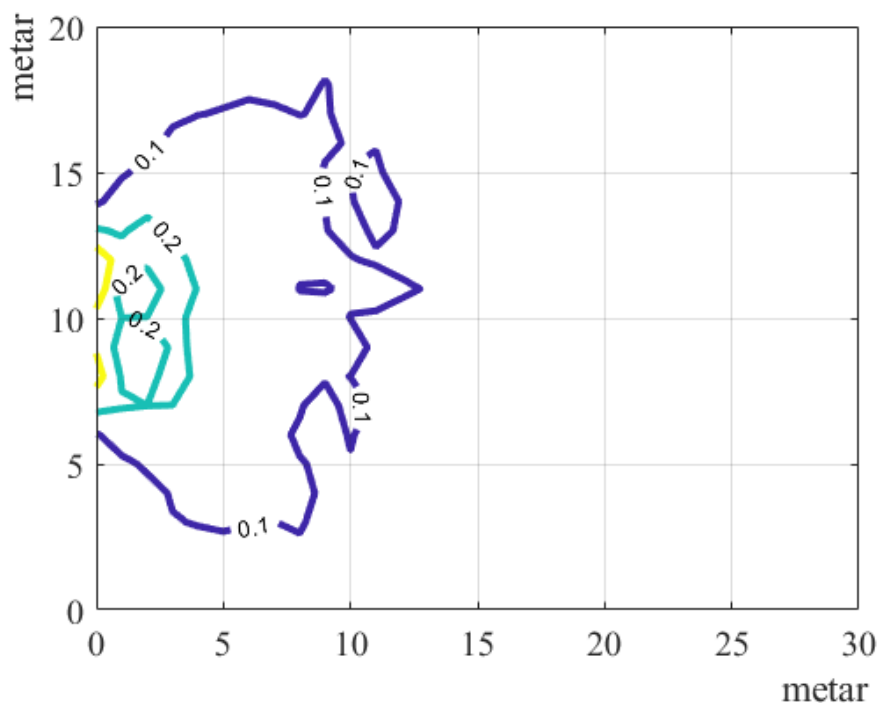
Prilog 29 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



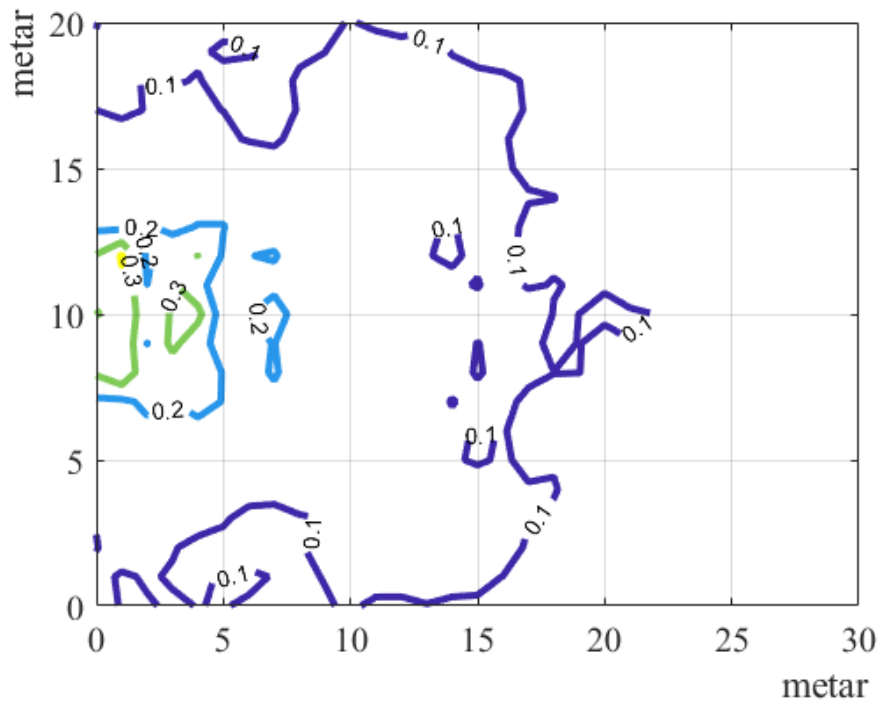
Prilog 30 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



Prilog 31 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 4,80 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



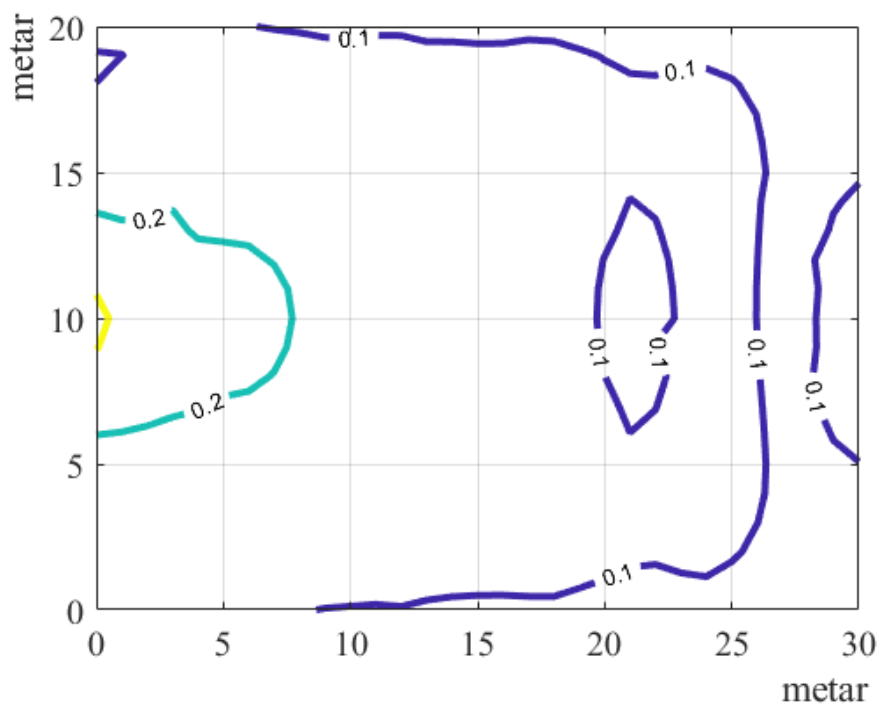
Prilog 32 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 4,38 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



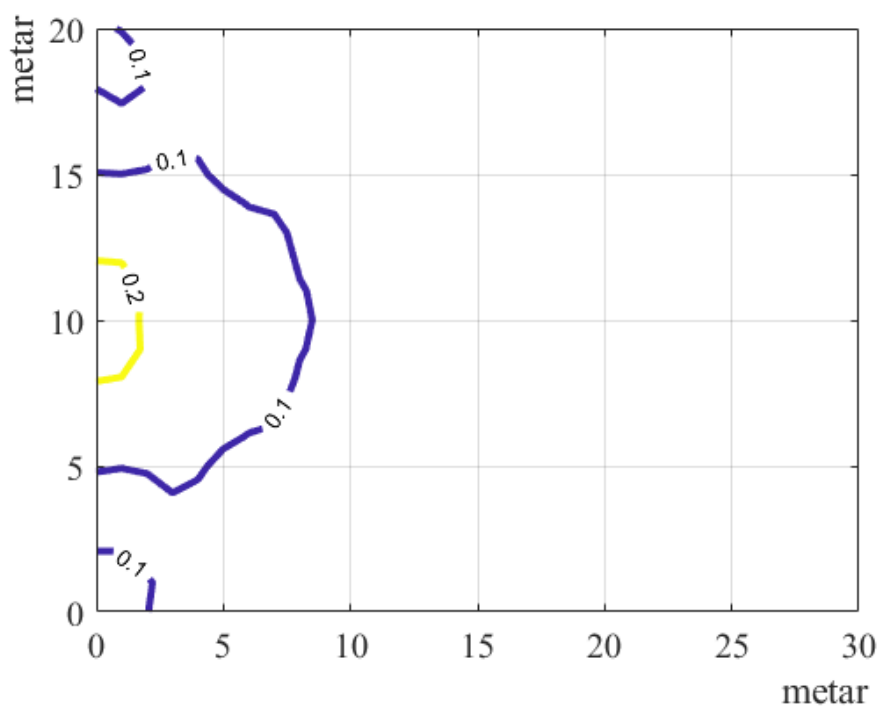
Prilog 33 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 5,37 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



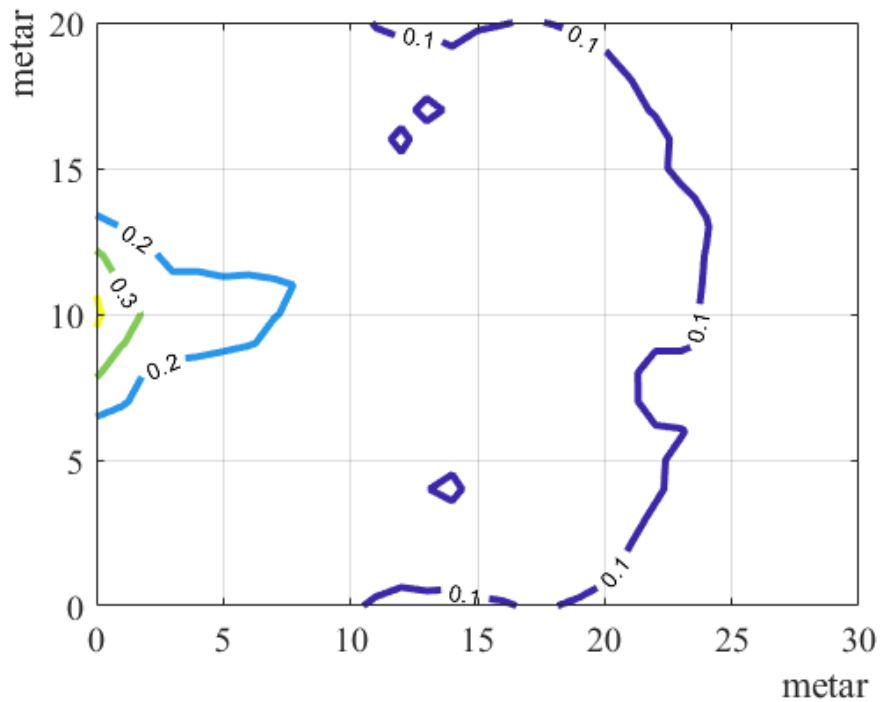
**Grupa propusta (d)**



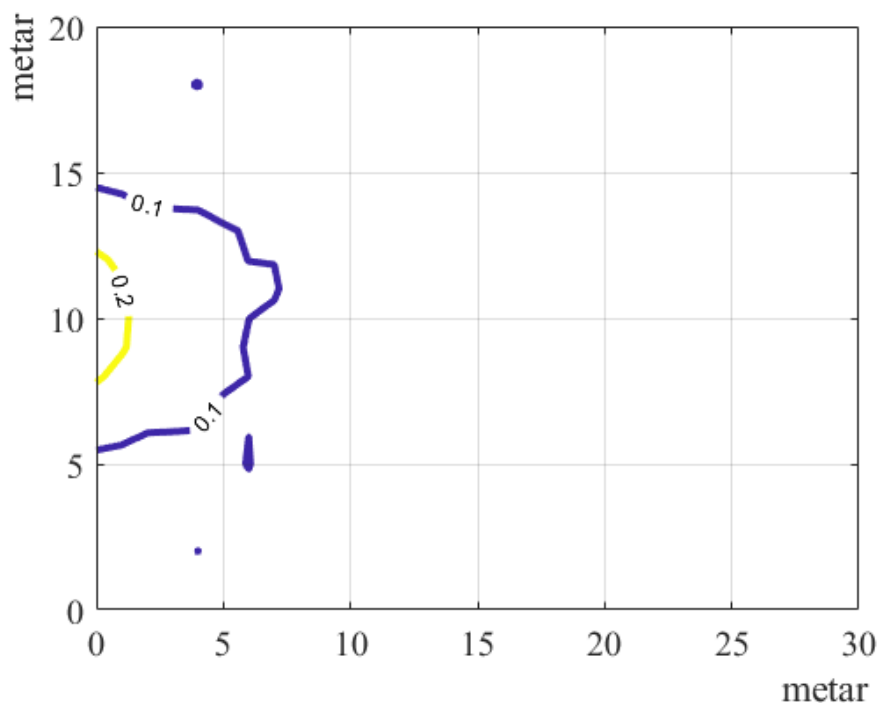
Prilog 34 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcison (Slika 63)



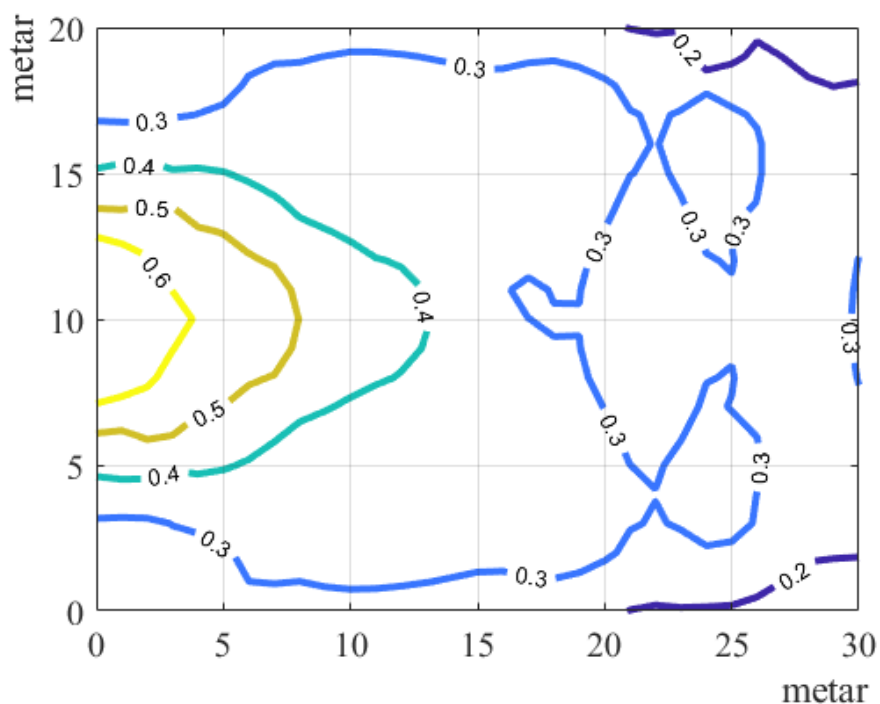
Prilog 35 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcison (Slika 63)



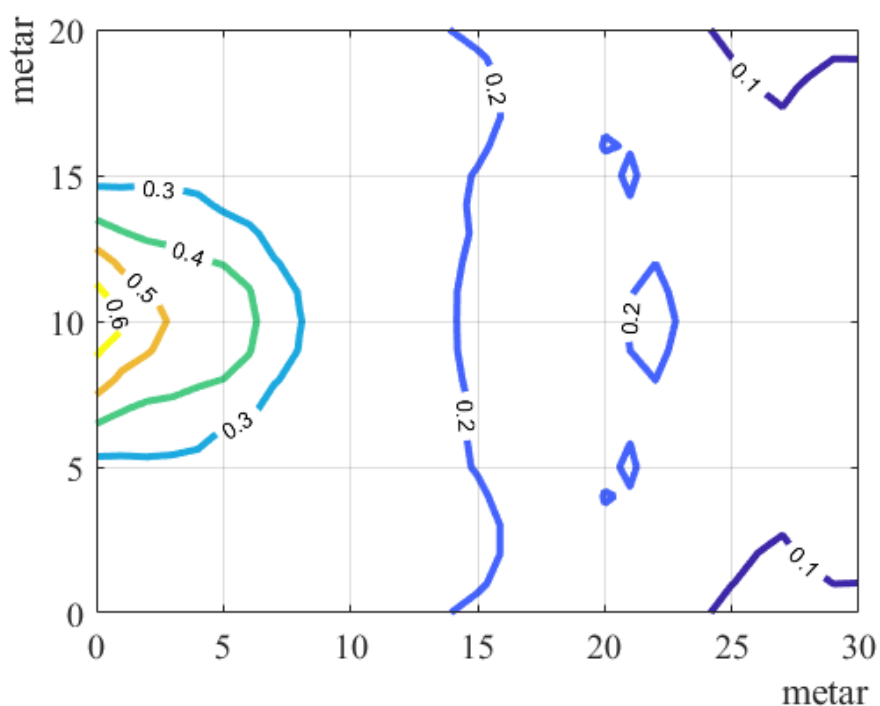
Prilog 36 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



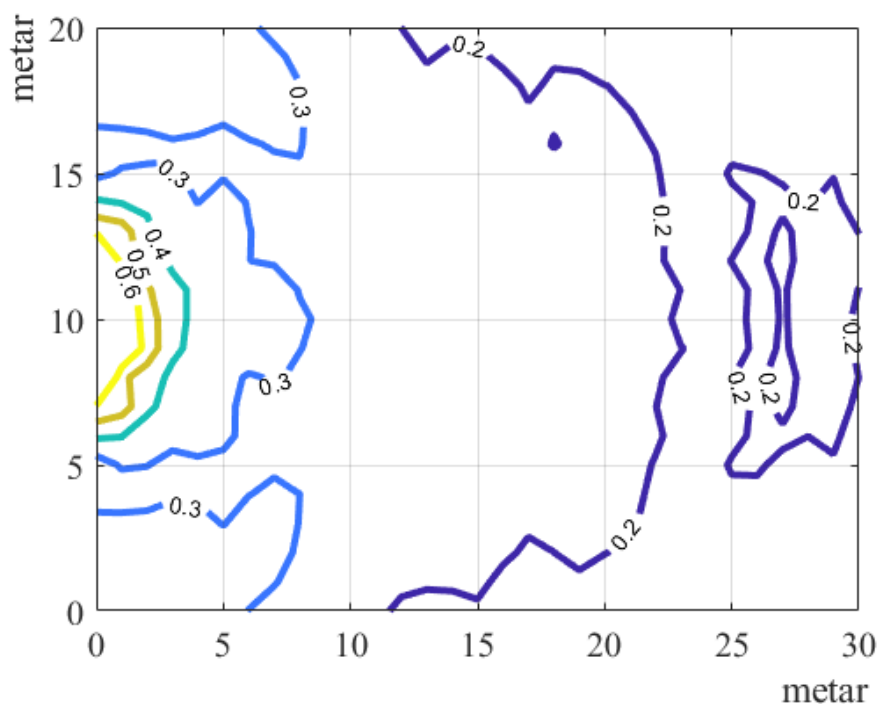
Prilog 37 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)



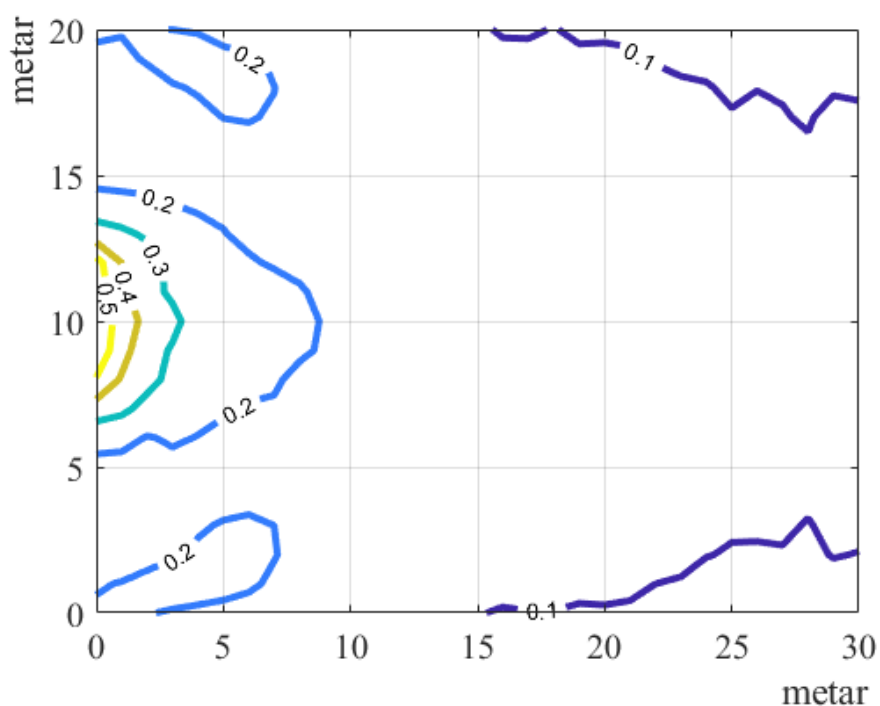
Prilog 38 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcismom (Slika 63)



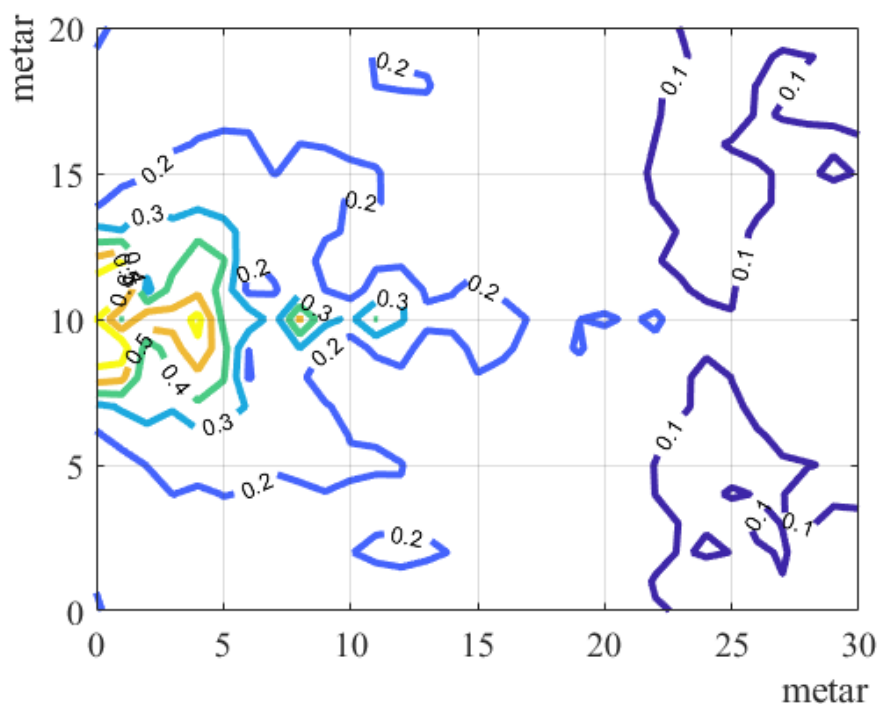
Prilog 39 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcismom (Slika 63)



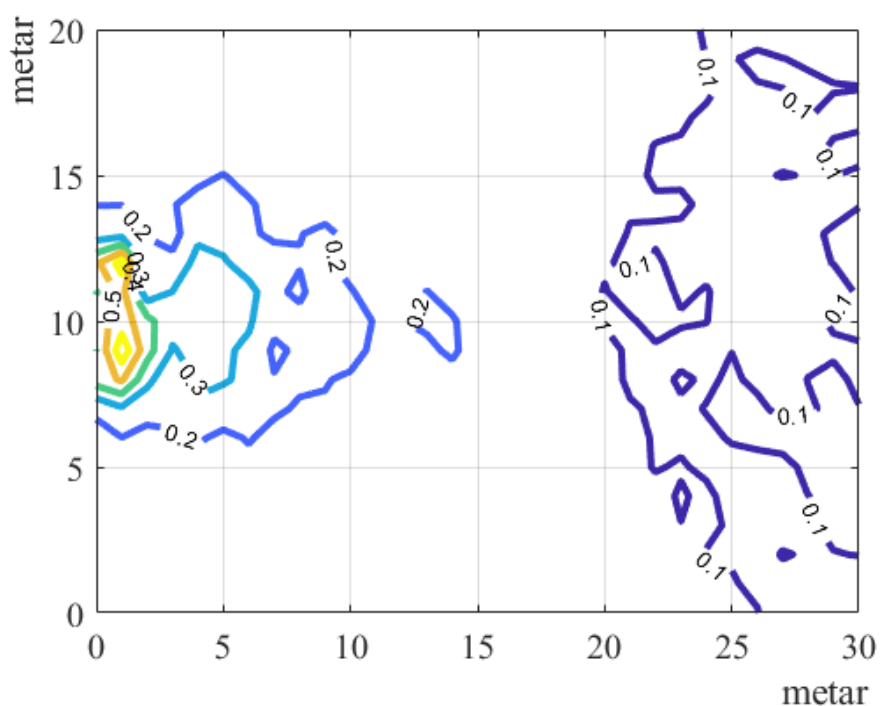
Prilog 40 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)



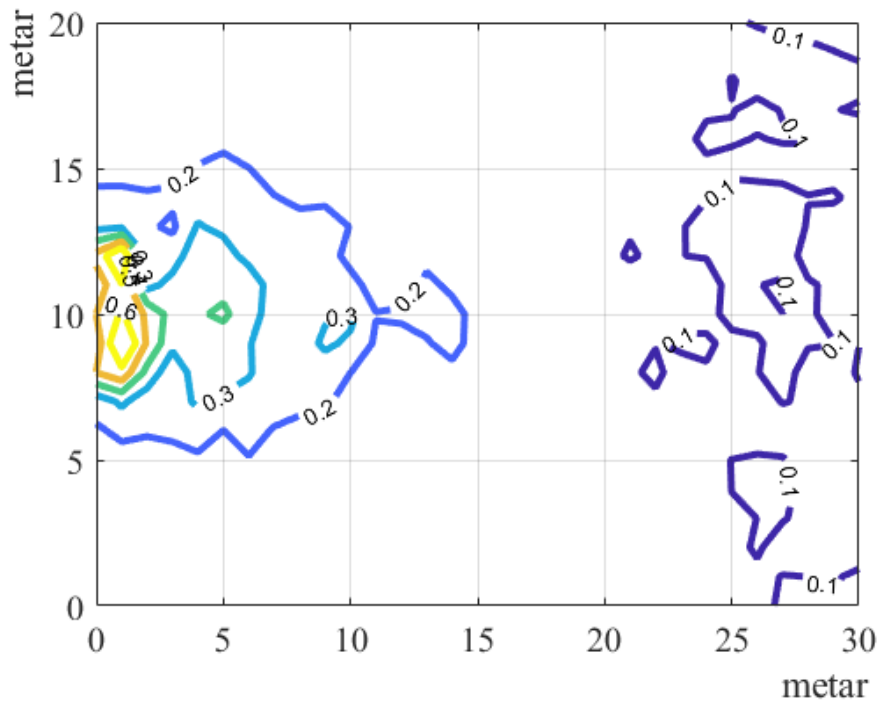
Prilog 41 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisonom (Slika 63)



Prilog 42 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 4,80 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

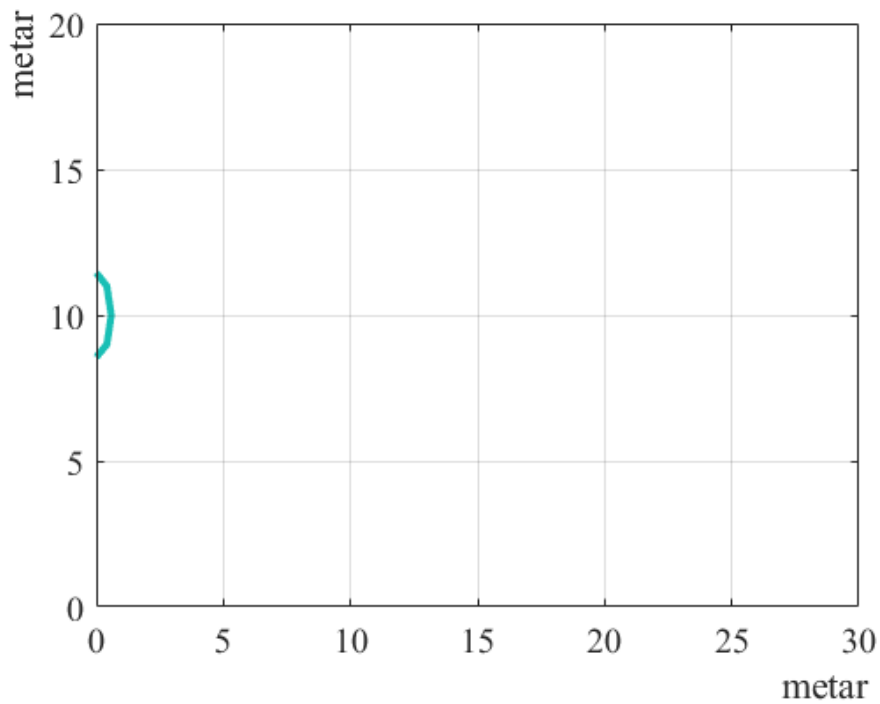


Prilog 43 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 4,38 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

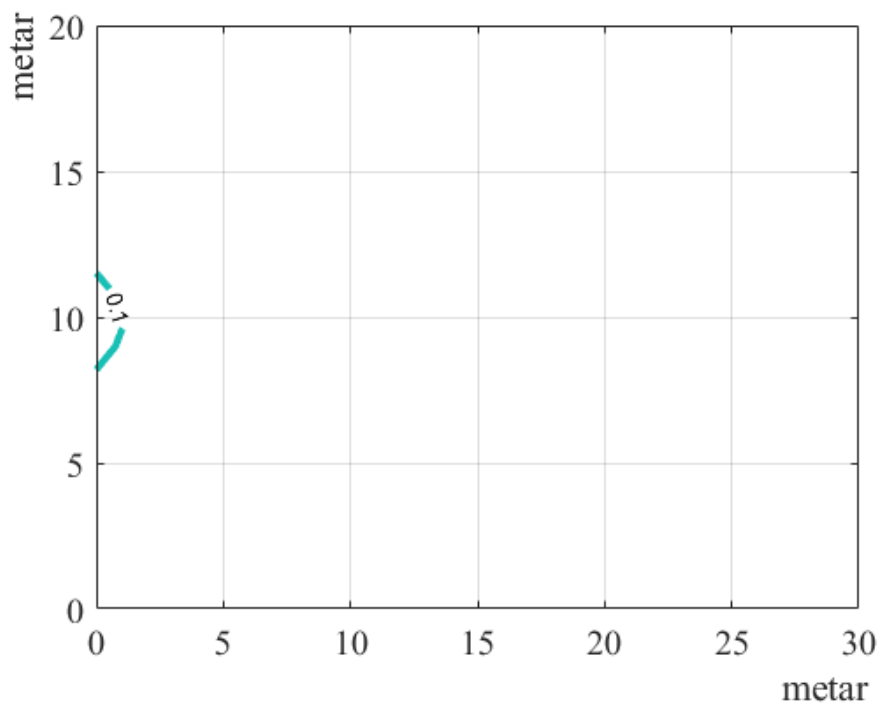


Prilog 44 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 5,37 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)

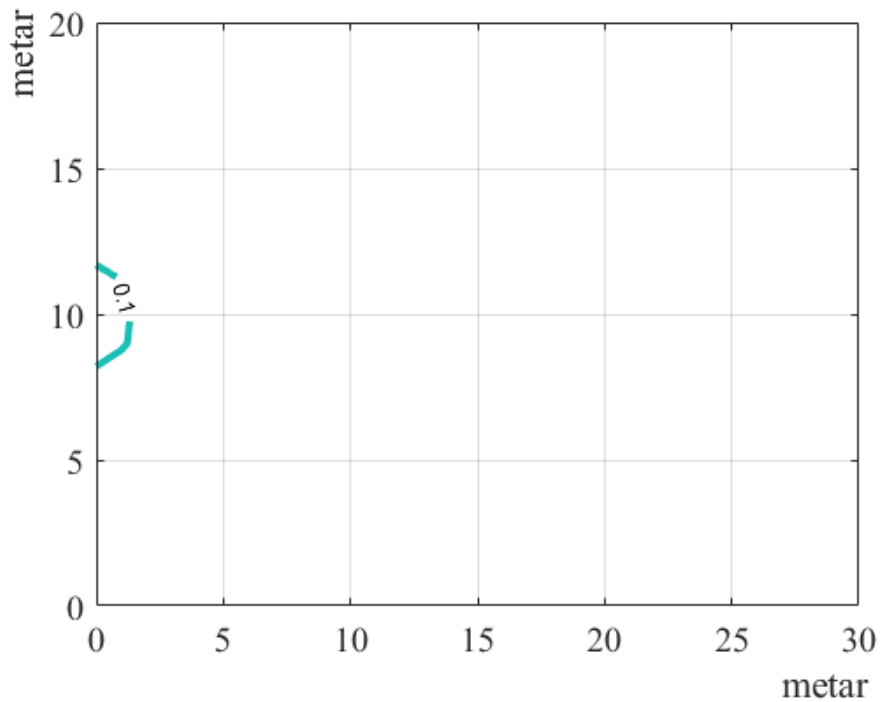
**Grupa propusta (e)**



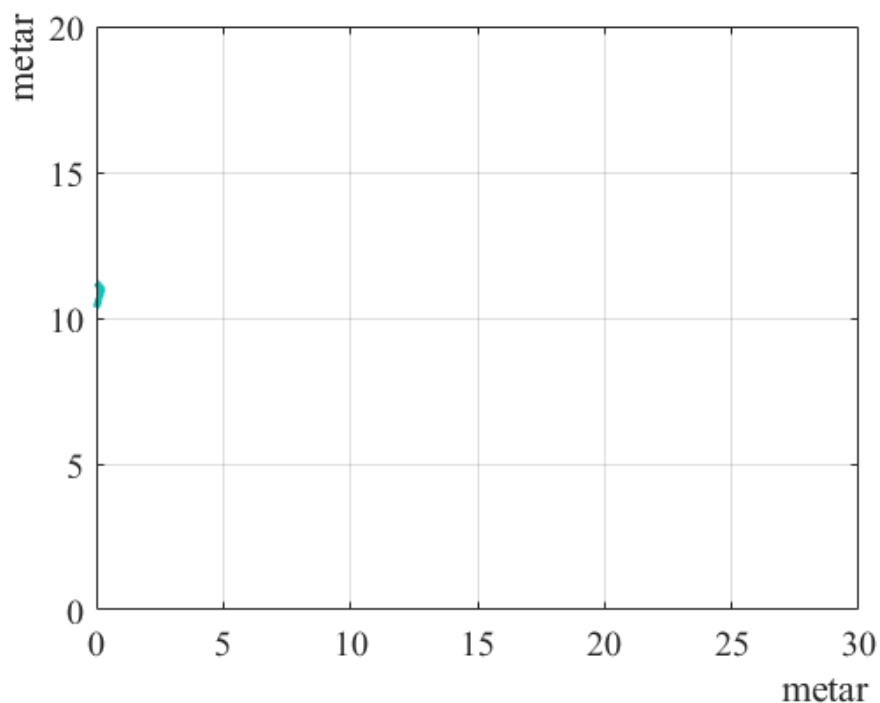
Prilog 45 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)



Prilog 46 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)

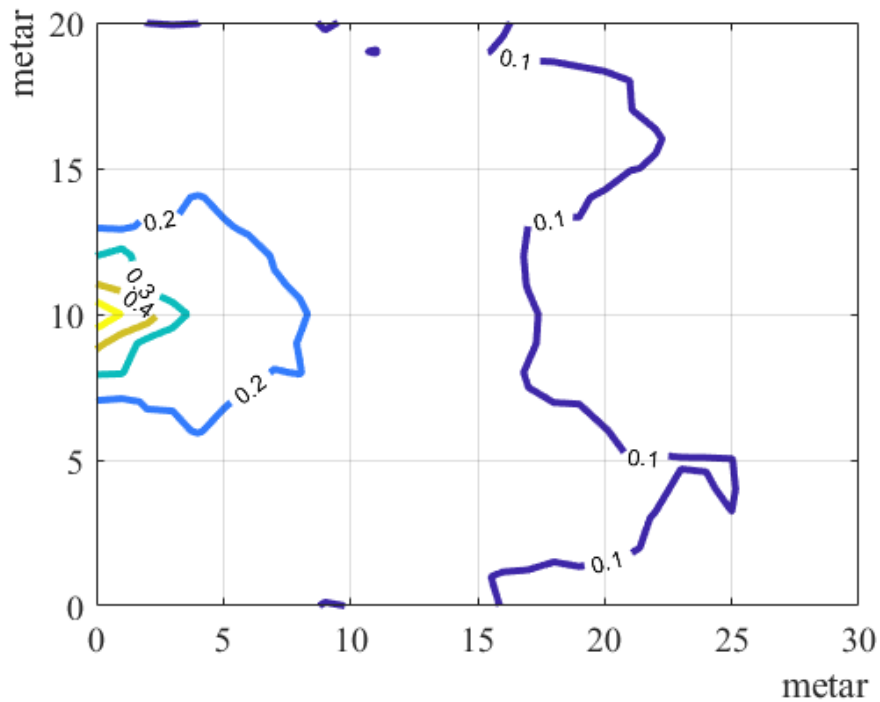


Prilog 47 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)

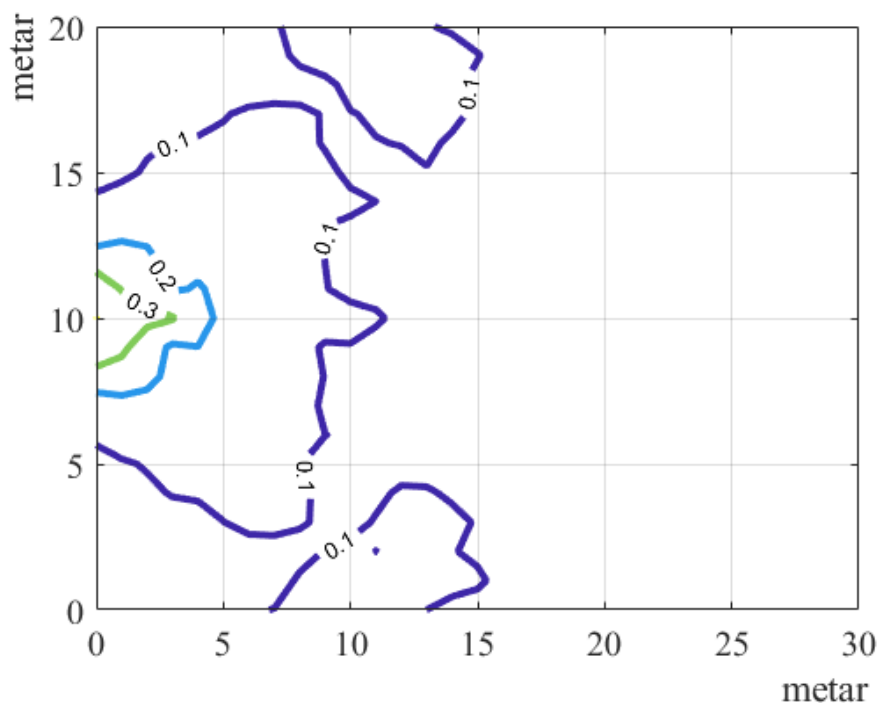


Prilog 48 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; uronjena grupa propusta (W1) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisom (Slika 63)

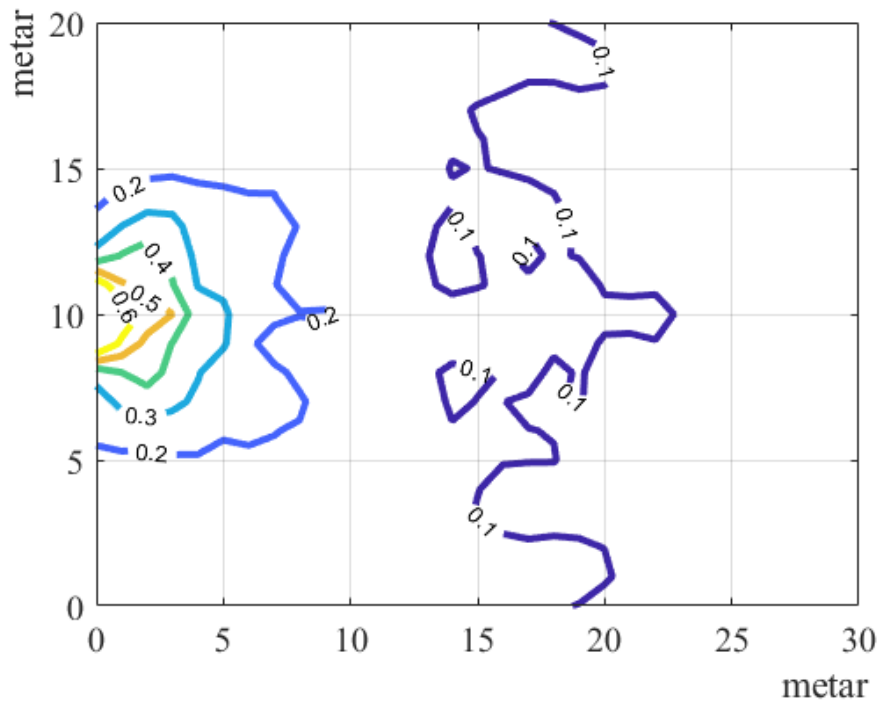




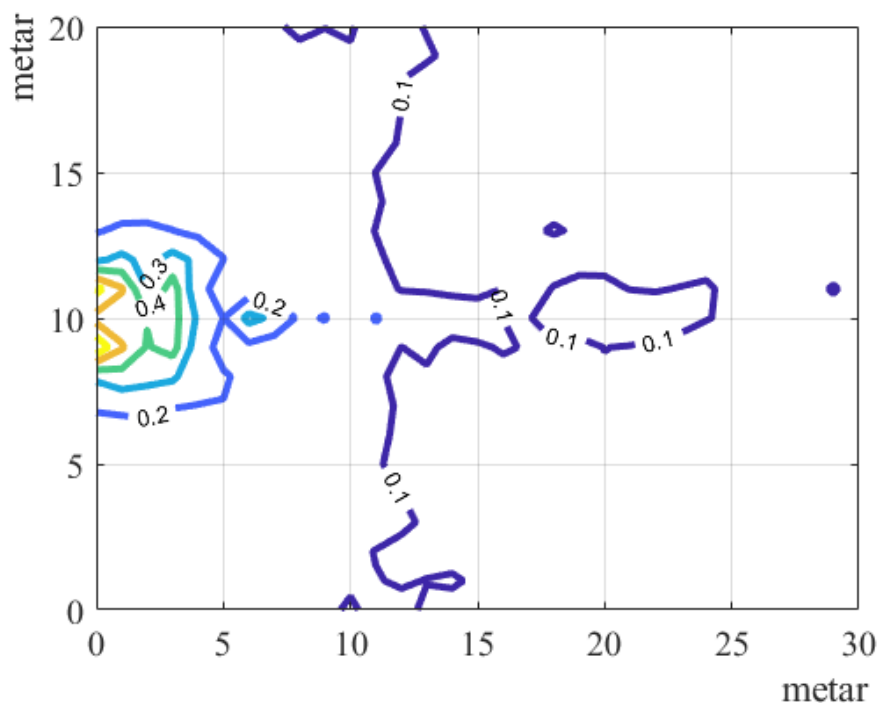
Prilog 49 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,6 m i perioda 2,77 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



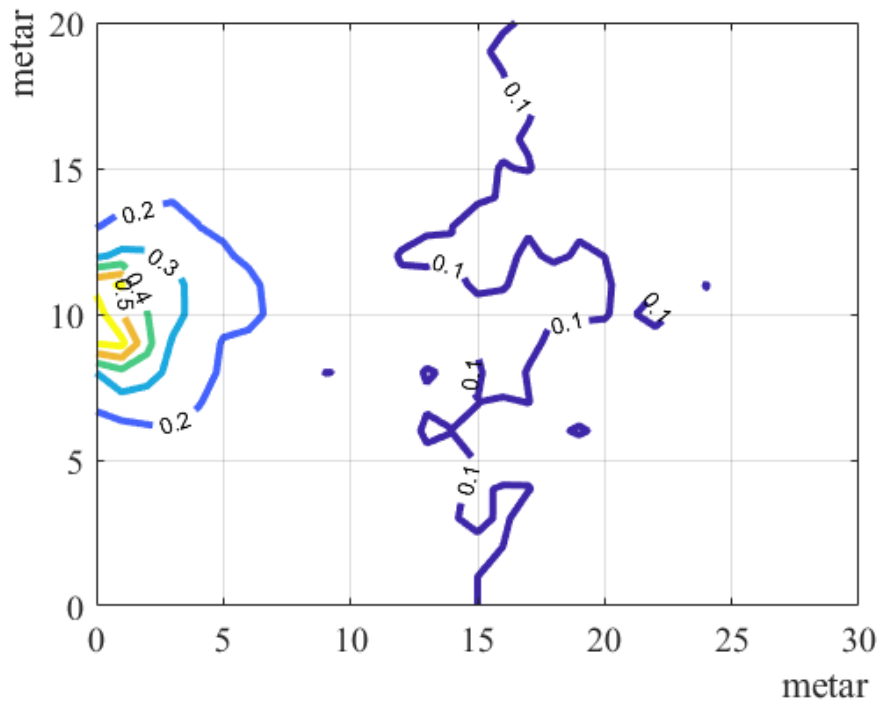
Prilog 50 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 3,40 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



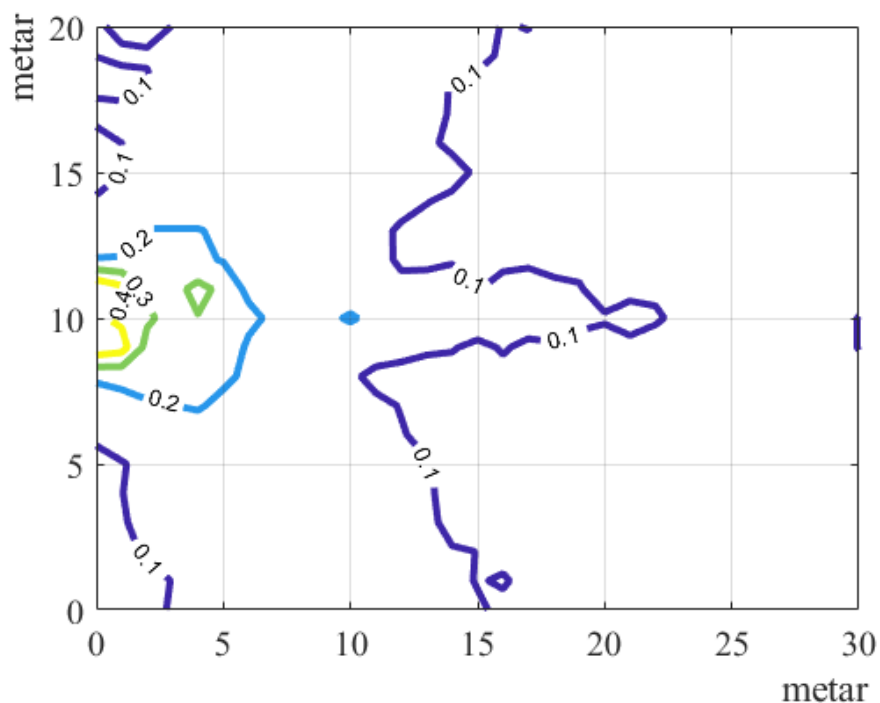
Prilog 51 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 0,9 m i perioda 4,16 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)



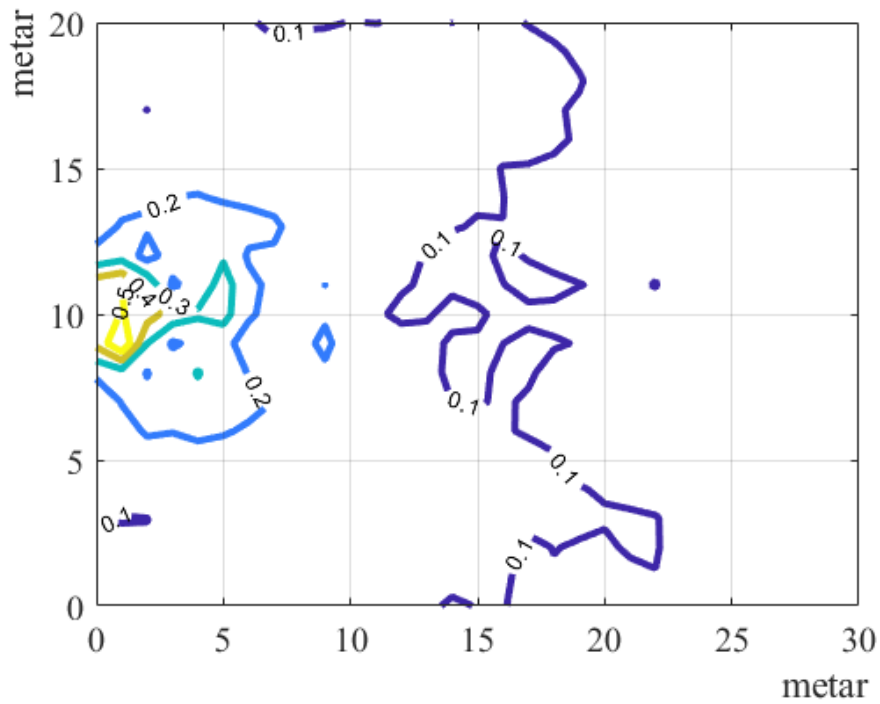
Prilog 52 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 3,92 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosm (Slika 63)



Prilog 53 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,2 m i perioda 4,80 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



Prilog 54 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 4,38 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisosom (Slika 63)



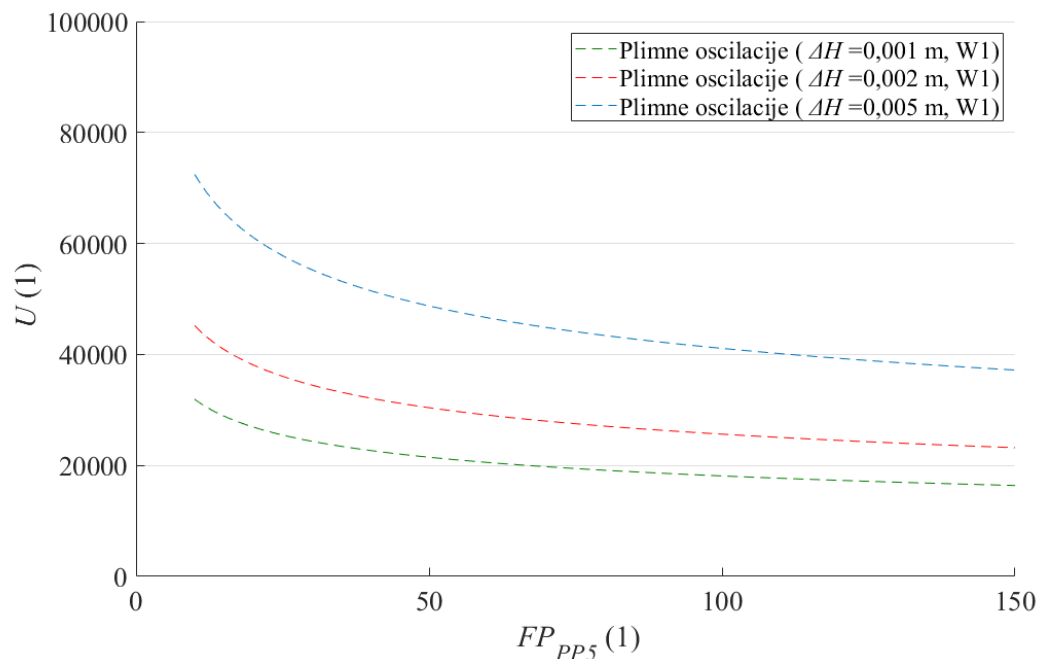
Prilog 55 Polje koeficijenta transmisije za val valne visine 1,5 m i perioda 5,37 s; djelomično uronjena grupa propusta (W2) postavljena na koordinati (0,10) i os propusta je paralelna s apcisolom (Slika 63)

## **2 Dijagrami za procjenu učinkovitosti grupe propusta**

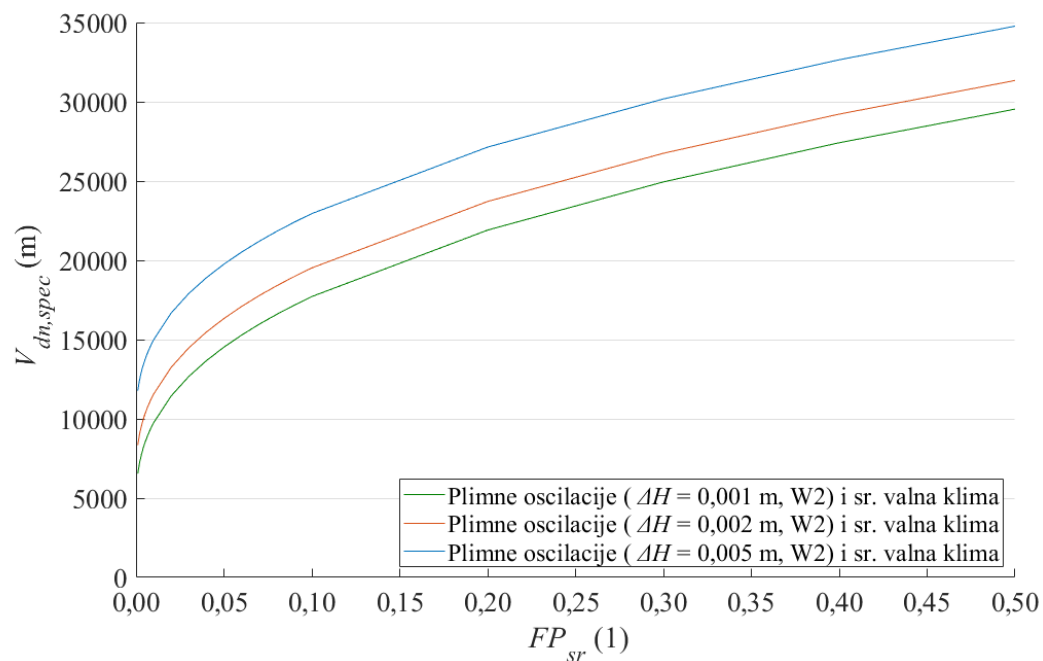
Nadalje se prikazuju grafovi učinkovitosti kada su dominantni generatori plimne oscilacije ili valovi za svaku grupu propusta (Slika 31).

Za određivanje učinkovitosti grupe propusta pod utjecajem valova je potrebno odrediti transmitiranu valnu visinu uslijed vala petogodišnjeg povratnog perioda i dnevni specifični volumen koji protječe kroz grupu propusta u referentom vremenu uslijed srednje valne klime. Konačno će omjer te dvije vrijednosti kako je prikazano u jednadžbi (58) definirati učinkovitost grupe propusta. Drugim riječima, ovim pristupom nema fiksiranja odnosa između petogodišnjeg povratnog perioda i srednje valne klime kako je to radi lakšeg prikaza urađeno u okviru poglavlja 6.2.1.2.

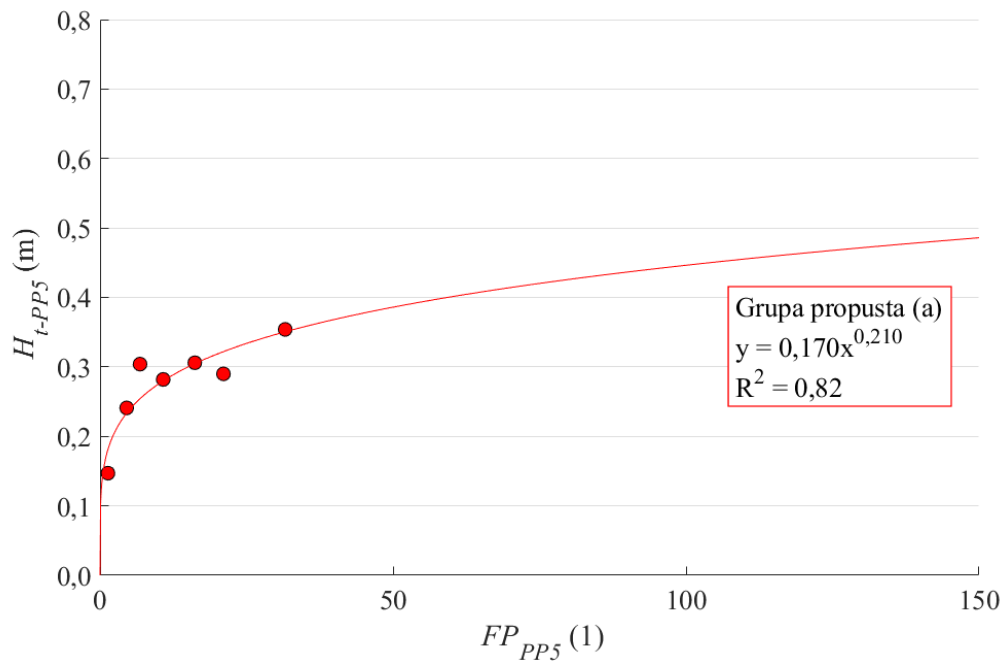
**Grupa propusta (a)**



Prilog 56 Odnos učinkovitosti grupe propusta određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovan plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

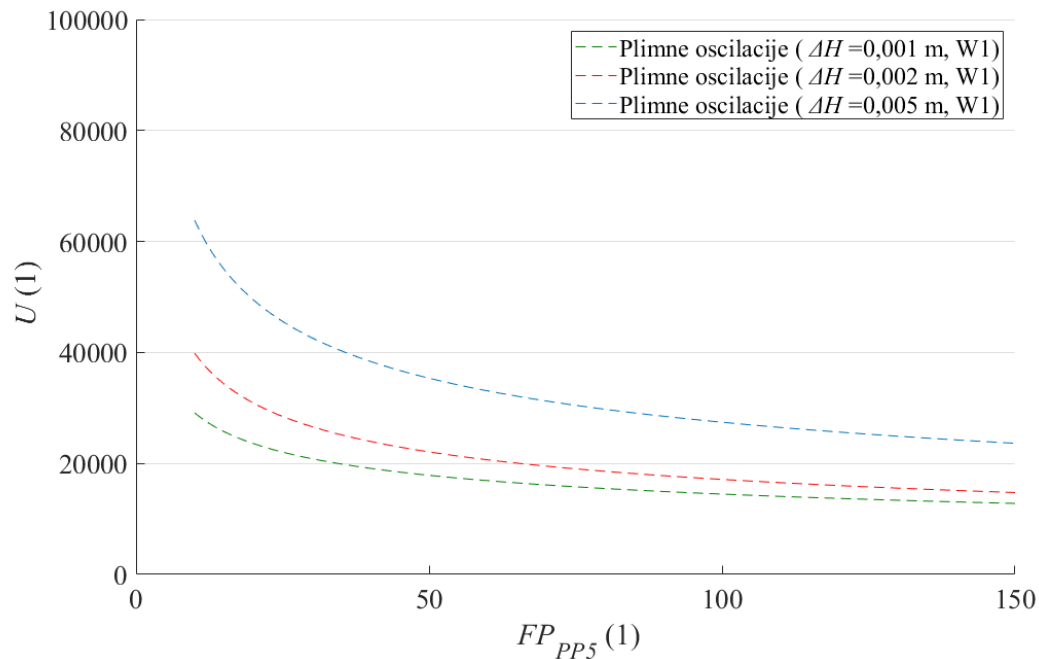


Prilog 57 Odnos specifičnog dnevnog volumena mora uzrokovan plimnim oscilacijama i srednjom valnom klimom prema fluks parametru srednje valne klime za proizvoljnu lokaciju

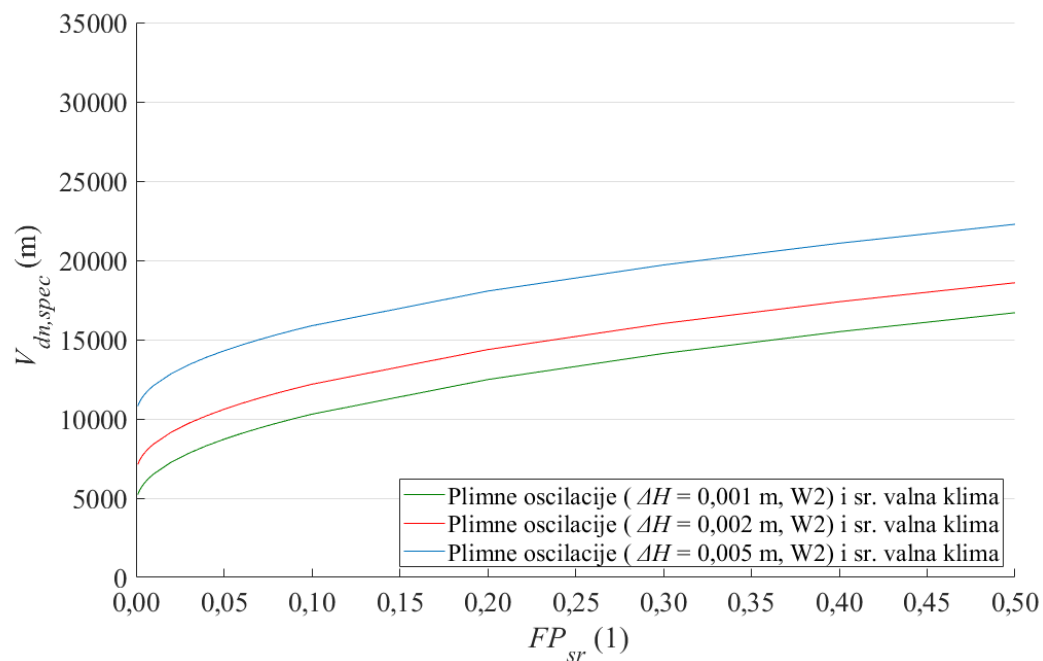


Prilog 58 Odnos transmitirane valne visine u zaštićenom akvatoriju prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

**Grupa propusta (b)**

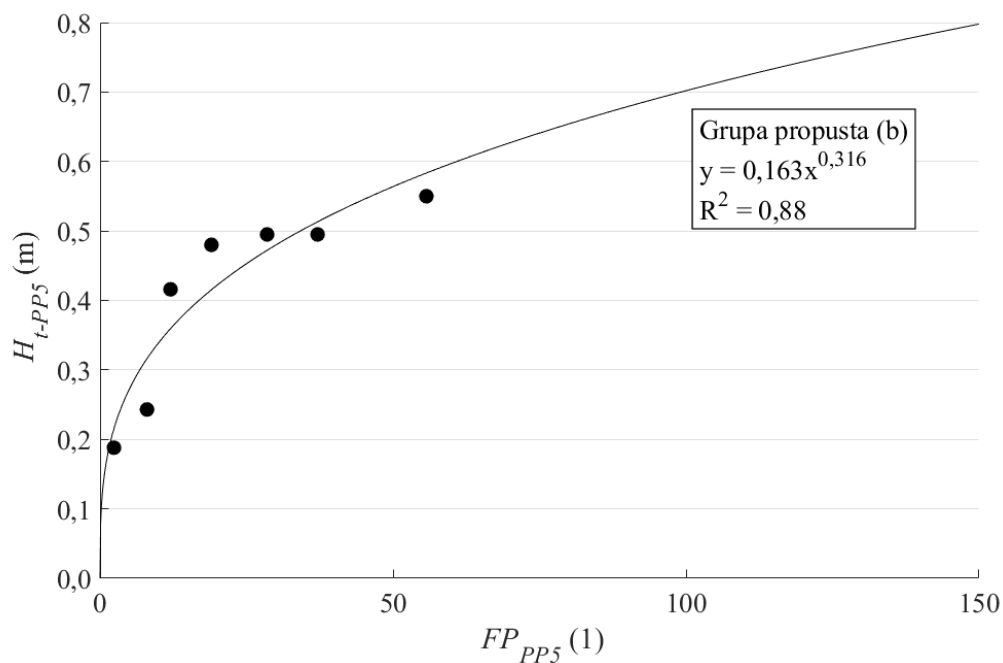


Prilog 59 Odnos učinkovitosti grupe propusta određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovan plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju



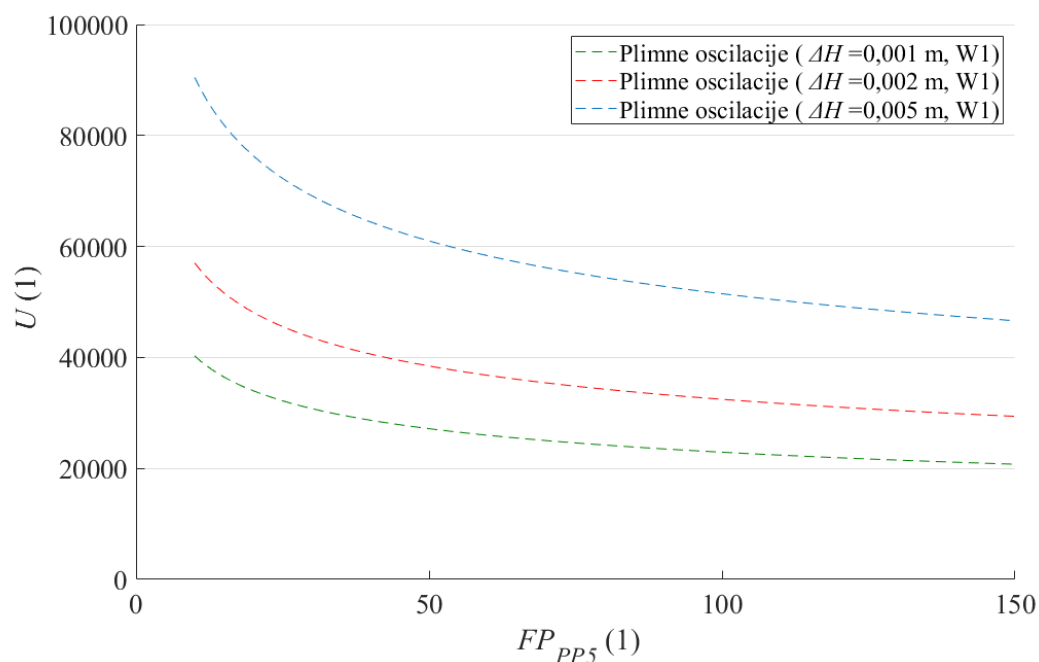
Prilog 60 Odnos specifičnog dnevnog volumena mora uzrokovan plimnim oscilacijama i srednjom valnom klimom prema fluks parametru srednje valne klime za proizvoljnu lokaciju



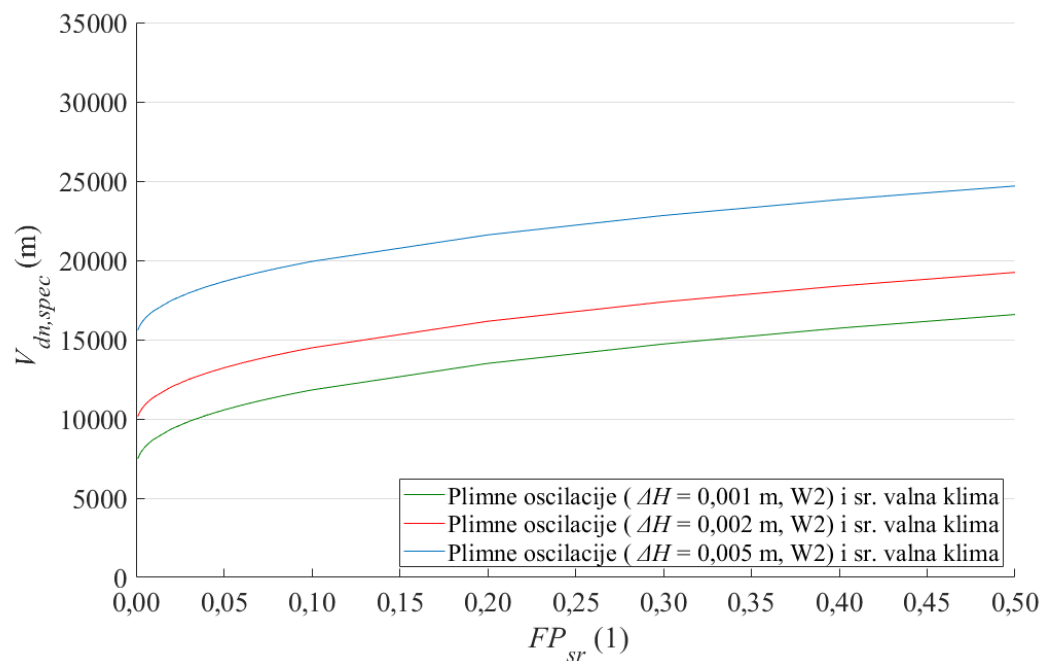


Prilog 61 Odnos transmitirane valne visine u zaštićenom akvatoriju prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

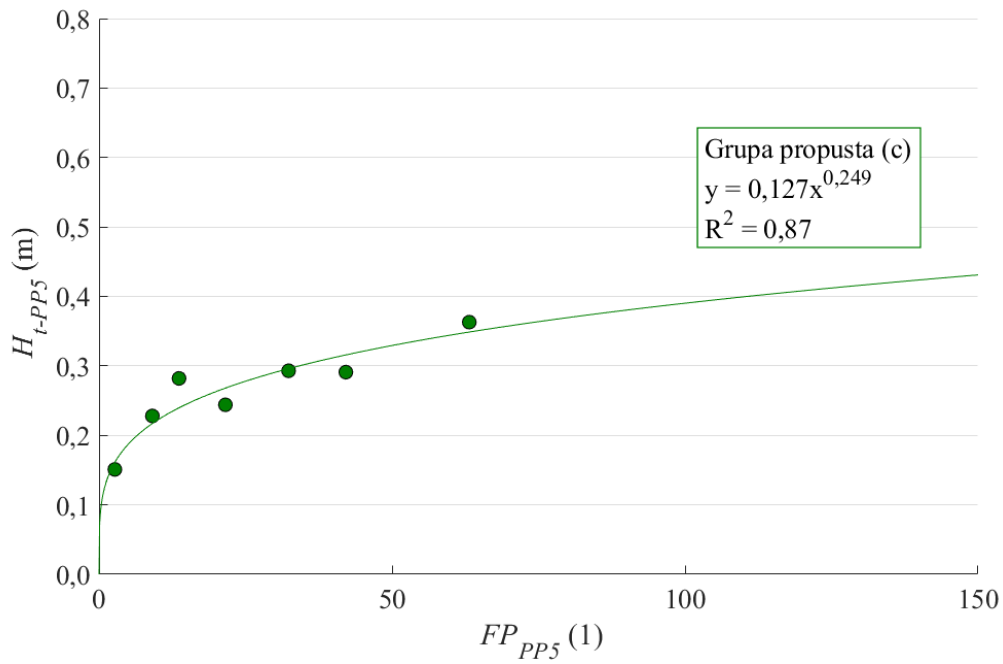
**Grupa propusta (c)**



Prilog 62 Odnos učinkovitosti grupe propusta određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovan plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

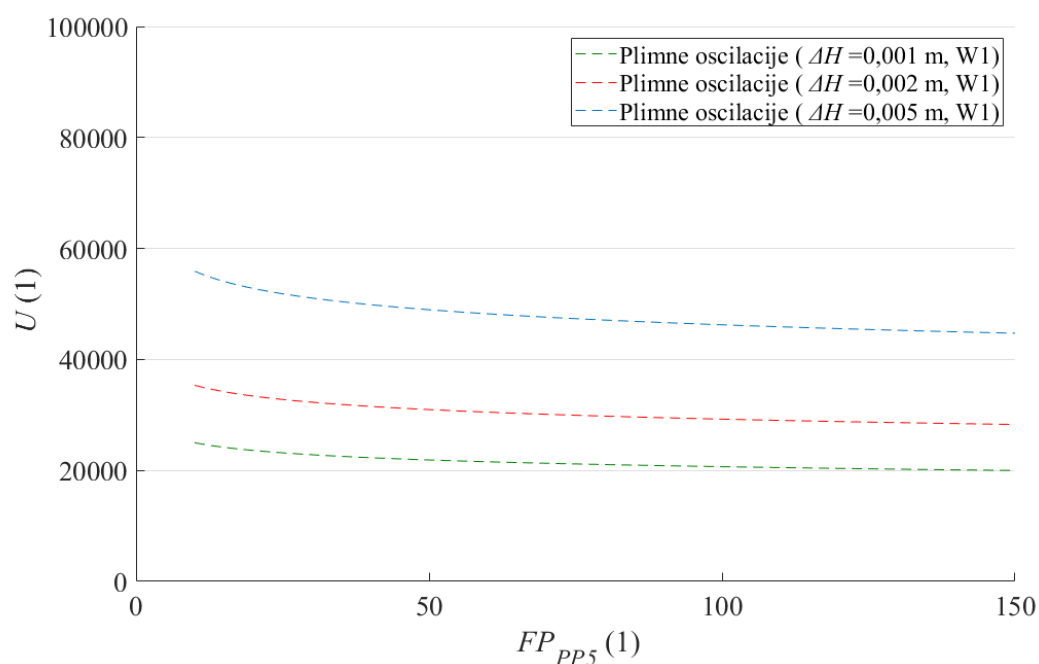


Prilog 63 Odnos specifičnog dnevnog volumena mora uzrokovan plimnim oscilacijama i srednjom valnom klimom prema fluks parametru srednje valne klime za proizvoljnu lokaciju

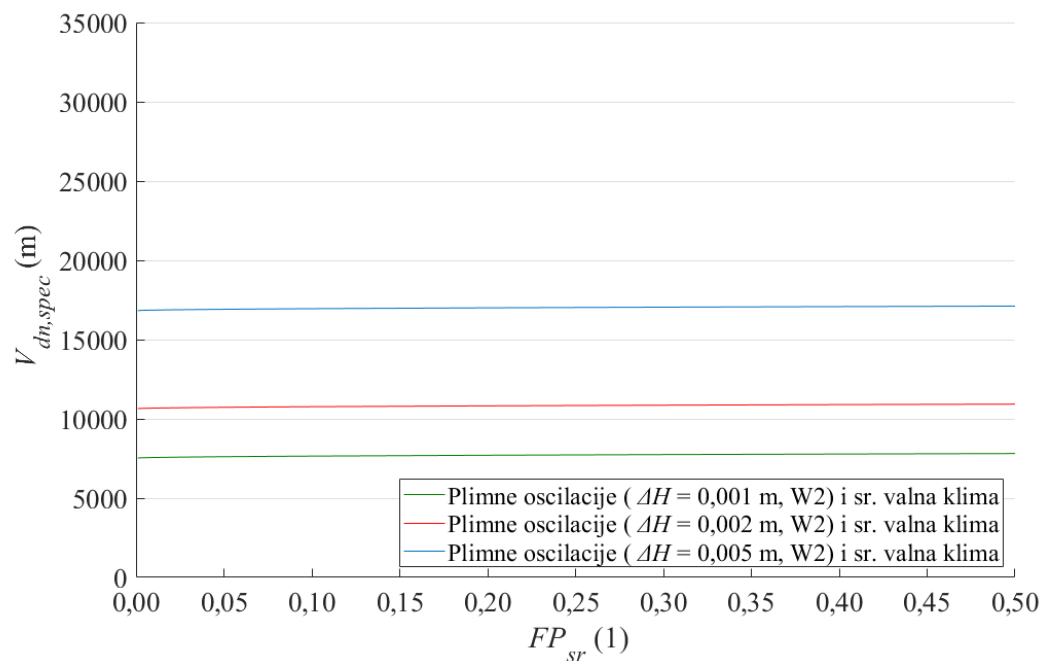


Prilog 64 Odnos transmitirane valne visine u zaštićenom akvatoriju prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

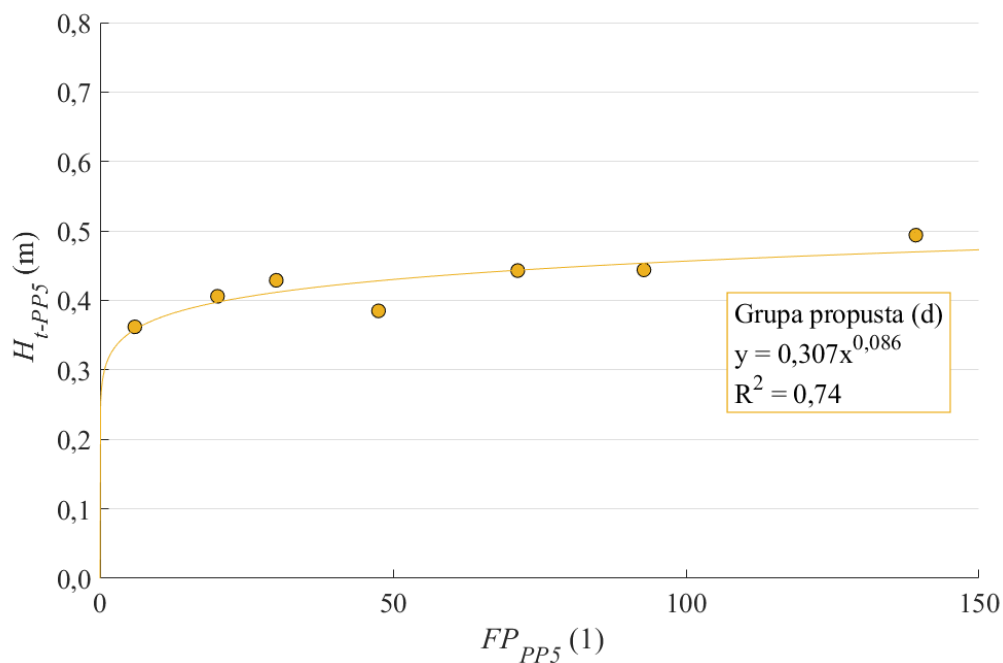
**Grupa propusta (d)**



Prilog 65 Odnos učinkovitosti grupe propusta određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovan plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

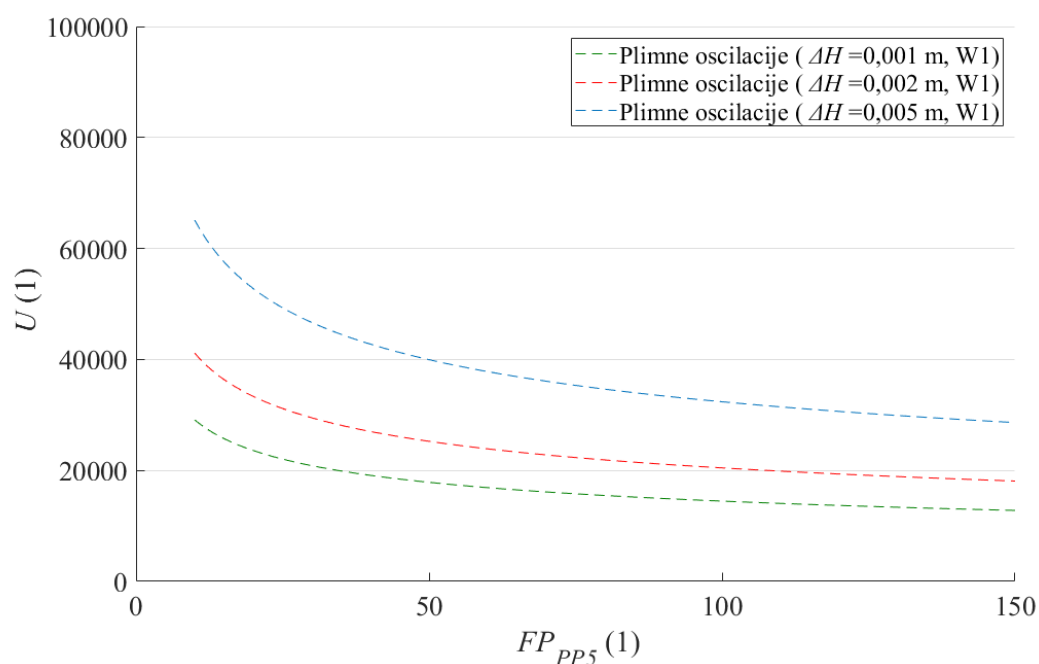


Prilog 66 Odnos specifičnog dnevnog volumena mora uzrokovan plimnim oscilacijama i srednjom valnom klimom prema fluks parametru srednje valne klime za proizvoljnu lokaciju

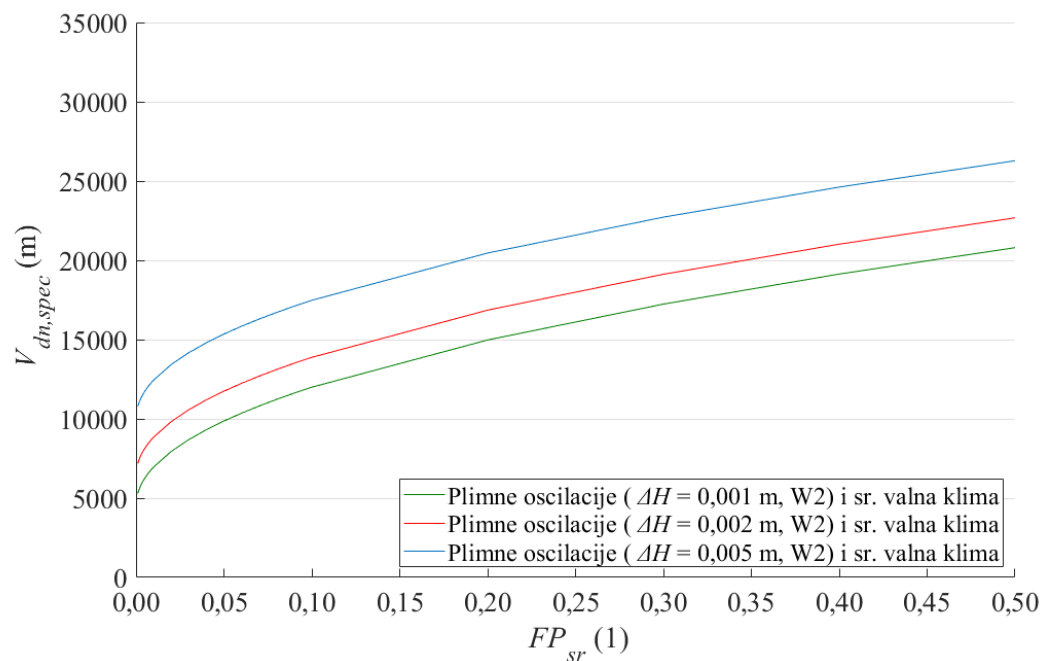


Prilog 67 Odnos transmitirane valne visine u zaštićenom akvatoriju prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

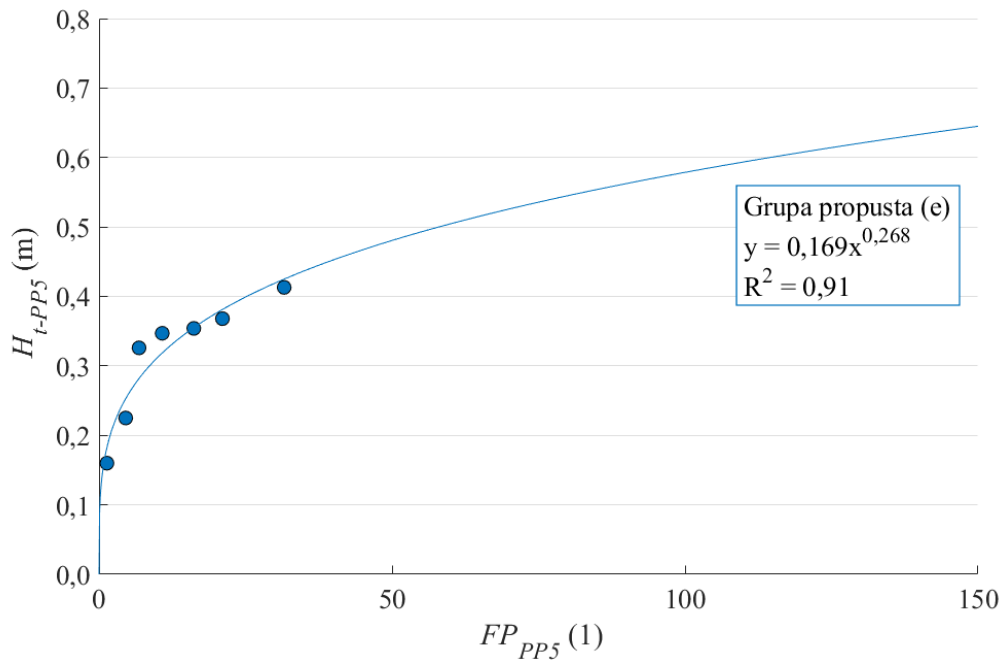
**Grupa propusta (e)**



Prilog 68 Odnos učinkovitosti grupe propusta određene specifičnim dnevnim volumenom mora uzrokovan plimnim oscilacijama i valnom visinom transmitiranog vala prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju



Prilog 69 Odnos specifičnog dnevnog volumena mora uzrokovan plimnim oscilacijama i srednjom valnom klimom prema fluks parametru srednje valne klime za proizvoljnu lokaciju



Prilog 70 Odnos transmitirane valne visine u zaštićenom akvatoriju prema fluks parametru incidentnog valnog polja petogodišnjeg povratnog razdoblja za proizvoljnu lokaciju

# **ŽIVOTOPIS AUTORA S POPISOM OBJAVLJENIH DJELA**

Damjan Bujak, mag. ing. aedif., rođen je 19. svibnja 1991. godine u Zagrebu, gdje se i školovao. Nakon završene XV. gimnazije, 2010. godine upisuje preddiplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje 2013. godine stječe akademski naziv sveučilišni prvostupnik inženjer građevinarstva. Iste godine upisuje diplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje 2015. godine stječe akademski naziv magistar inženjer građevinarstva.

Od 2015. do kraja 2016. godine zaposlen je kao stručni suradnik na zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu te upisuje doktorski studij. Od 2017. godine se zapošljava kao asistent na znanstvenom projektu Hrvatske zaklade za znanost (UIP-2014-09-



6774, Primjena cijevnih propusta za poboljšanje kvalitete mora u lukama/marinama), te je uključen u znanstveni rad na Građevinskom fakultetu.

Kroz stručne poslove usavršava se u stručnom radu kroz izradu studija, elaborata, idejnih, i glavnih projekata. Poglavitno se radi o projektiranju hidrotehničkih građevina i numeričkom modeliranju fizičkih procesa u moru i rijekama.

U dosadašnjem znanstvenom radu napisao je tri izvorna znanstvena rada u CC časopisima, pet znanstvenih radova u drugim časopisima, pet znanstvenih radova na skupovima s međunarodnom recenzijom i sedam sažetaka na skupovima. Dobio je nagradu Hrvatskih voda za najbolji diplomski rad u Hrvatskoj iz područja hidrotehnike, dekanove nagrade za izvrstan uspjeh u okviru diplomskog studija i za rad „Hidraulički slom tla na nizvodnoj strani nasipa“.

Popisom objavljenih djela:

Bartolić, I., Lončar, G., Bujak, D., Carević, D. (2018) 'The Flow Generator Relations for Water Renewal through the Flushing Culverts in Marinas', *Water*, 10 (7)

Bartolić, I., Lončar, G., Bujak, D., Klapčić, S., Mišura, I. (2017) 'Impact of wind, tidal variations, wave field and density gradient on the seawater exchange through flushing culverts in marinas', *Acta Hydrologica Slovaca*, 18 (2) , pp. 271-281

Bašić, K., Gilja, G., Bujak, D., Kuspilić, N. (2018) 'Design criteria for levees', *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector*, Feierabend, M., Novytska, O., Vouk, D., Šabić, M., (ur.), Zagreb : University of Zagreb, pp. 27-33

Bujak, D. (2016) 'Valovima inducirano strujanje kroz cijevni propust u lukobranu', *Zajednički temelji 2016*, Dokšanović, T., Galić, M. (ur.), Osijek, pp. 5-6

Bujak, D., Carević, D. (2016) 'Učinak uronjenosti propusta na izmjenu vode kroz cijevni propust pod utjecajem valova', *Simpozij doktorskog studija građevinarstva*, Lakušić, S. (ur.), Zagreb, pp. 17-26

Bujak, D., Carević, D., Gilja, G. (2018) 'The influence of the natural generators on discharge through the flushing culverts', *Proceedings of the 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18)*, Losada, I. J., Lara, J. L. (ur.), Santander, Spain, 1-10

Bujak, D., Carević, D., Mostečak, H. (2017) 'Velocities inside flushing culverts induced

by waves' *Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering*, 170 (3+4)

Bujak, D., Carević, D., Ramušćak, R., Gašpar, A., (2017) 'Volumetric analysis of flow through flushing culverts embedded in breakwaters, *4th Coastal and Maritime Mediterranean Conference*, Pikelj, K., Bardey, P. (ur.), Split : Institut za oceanografiju i ribarstvo, pp. 1-6

Bujak, D., Carević, D., Ramušćak, R., Kulić, T., Bartolić, I. (2018) 'Analiza izmjene vode kroz cijevne propuste u marini Opatija', *Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*, 70 (4), pp. 353-360

Bujak, D., Carević, D., Ramušćak, R., Kulić, T., Bartolić, I. (2017) 'Analysis of water exchange through the flushing culverts in small harbours', *Book of Abstracts of the 15th International Symposium Water Management and Hydraulic Engineering*, Bekić, D., Carević, D., Vouk, D. (ur.), Zagreb : Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb, pp. 96-96

Carević, D., Bujak, D., Gašpar, A. (2017) 'Ekološki aspekti projektiranja luka i marina na Jadranu, *12. dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva*, pp. 52-53

Carević, D., Bujak, D., Lončar, G., Bartolić, I. (2019) 'Primjena propusta za poboljšanje izmjene mora u lukama', *Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*, 71 (3), pp. 197-207

Carević, D., Bujak, D., Ramušćak, R., Kulić, T., Gašpar, A., (2017) 'Measurements of water circulation in marina Opatija-Croatia', *Proceedings of the 15th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, Bekić, D., Carević, D., Vouk, D. (ur.), Zagreb : University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, Croatia, pp. 203-212

Carević, D., Mostečak, H., Bujak, D., Lončar, G. (2018) 'Influence of water-level variations on wave transmission through flushing culverts positioned in a breakwater body' *Journal of waterway port coastal and ocean engineering-asce*, 144 (5)

Derek, I., Ocvirk, E., Gilja, G., Bujak, D. (2018) 'Analysis of hydraulic flow conditions in vertical slot fish passes', *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector*, Feierabend, M., Novytska, O., Vouk, D., Šabić, M. (ur.), Zagreb : University of Zagreb, pp. 37-38

Lončar, G., Bartolić, I., Bujak, D. (2018) 'Contribution of Wind and Waves in Exchange of Seawater through Flushing Culverts in Marinas', *Tehnički vjesnik*, 25 (6), pp. 1587-1594

Lončar, G., Bekić, D., Carević, D., Bujak, D., Bartolić, I., Beg Paklar, G. (2016) 'Utjecaj kanalskih propusta na izmjenu mora i valovanje u akvatoriju marina', *Hrvatske vode : časopis za vodno gospodarstvo*, 24 (98), pp. 275-284

Lončar, G., Carević, D., Bujak, D., Bartolić, I., Beg Paklar, G. (2017) 'Analiza utjecaja

vjetra, plimnih oscilacija i razdiobe gustoće na izmjenu mora kroz propuste u marinama: primjer marine Ičići', *Hrvatske vode : časopis za vodno gospodarstvo*, 24 (101), pp. 139-148

Marić, M., Ocvirk, E., Gilja, G., Bujak, D. (2018) 'Analysis of hydraulic flow conditions in Denil fish passes', *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector*, Feierabend, M., Novytska, O., Vouk, D., Šabić, M. (ur.), Zagreb : University of Zagreb, pp. 75-76

Martinović, D., Ocvirk, E., Gilja, G., Bujak, D. (2018) 'Analysis of hydraulic flow conditions in pool fish pass', *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector*, Feierabend, M., Novytska, O., Vouk, D., Šabić, M. (ur.), Zagreb : University of Zagreb, pp. 77-78

Ocvirk, E., Gilja, G., Bujak, D. (2017) 'Pool fishway hydraulic analysis', *Proceedings of the 15th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, Bekić, D., Carević, D., Vouk, D. (ur.), Zagreb : University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, Croatia, pp. 165-173