

# Analiza valnih deformacija na području luke Split

Goran Lončar, Vladimir Andročec, Vedran Petrov

## Ključne riječi

Luka Split,  
valna deformacija,  
matematičko modeliranje,  
lučki akvatorij,  
usporedba  
rezultata

## Key words

Port of Split,  
wave deformation,  
mathematical modelling,  
port basin,  
comparison  
of results

## Mots clés

port de Split,  
déformation des vagues,  
modélisation  
mathématique,  
basin du port,  
comparaison  
de résultats

## Ключевые слова

порт Сплит,  
волновые деформации,  
математическое  
моделирование,  
портовый акваторий,  
сравнение  
результатов

## Schlüsselworte

Hafen von Split,  
Wellenverformung,  
mathematisches  
Modellieren,  
Hafenaquatorium,  
Vergleich der  
Ergebnisse

G. Lončar, V. Andročec, V. Petrov

Stručni rad

## Analiza valnih deformacija na području luke Split

Prikazuju se rezultati provedenih istraživanja valnih karakteristika sadašnjeg stanja gradske luke Split i njezinog razvoja pomoću matematičkog i fizikalnog modeliranja valnih deformacija u lučkom akvatoriju. U ovom je radu dan je presjek rezultata provedenih istraživanja valnih deformacija za varijantna rješenja dodatnih gradnji uz kvantifikaciju potencijalnog poboljšanja, zadržavanja ili pogoršanja postojećeg stanja. Uspoređeni su rezultati fizikalnog i numeričkog modeliranja.

G. Lončar, V. Andročec, V. Petrov

Professional paper

## Wave deformation analysis in the Split Port area

Results obtained by the study of wave properties in the present day Port of Split, and the study development process, are presented by means of mathematical and physical modelling of wave deformations in the port basin. An overview of results obtained by the study of wave deformations is presented for alternative solutions involving additional construction work. Effects that could be gained by additional improvements, by maintaining the present situation, and by deterioration of the present situation, are quantified. Physical and numerical modelling results are compared.

G. Lončar, V. Andročec, V. Petrov

Ouvrage professionnel

## Analyse de la déformation des vagues dans la zone du port de Split

Les résultats obtenus par l'étude des propriétés des vagues dans le port de Split actuel, et le procédé de développement de l'étude, sont présentés à l'aide de modélisation mathématique et physique de la déformation des vagues dans le bassin du port. L'aperçu des résultats obtenus au cours de l'étude des déformations des vagues est présenté pour les alternatives exigeant des travaux de construction additionnels. Les effets qui pourraient se produire par le développement additionnel, par la préservation de la situation actuelle, et par la détérioration de la situation actuelle, sont quantifiés. Les résultats de modélisation physique et numérique sont comparés.

Г. Лончар, В. Андрочец, В. Петров

Отраслевая работа

## Анализ волновых деформаций в регионе порта Сплит

Представлены результаты осуществленных анализов характеристик волн настоящего состояния городского порта Сплит и его развития с помощью математического и физического моделирования деформаций волн в портовом акватории. В работе представлено сечение результатов осуществленных исследований деформаций волн для вариантов решения дополнительных строений при квантификации потенциальных улучшений, задерживания или ухудшения существующего состояния. Сравнены результаты физического и цифрового моделирования.

G. Lončar, V. Andročec, V. Petrov

Fachbericht

## Analyse der Wellenverformungen im Bereich des Hafens von Split

Dargestellt sind die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen der Wellenkennzeichen des gegenwärtigen Zustandes des städtischen Hafens von Split und dessen Entwicklung mit Hilfe des mathematischen und physikalischen Modellierens der Wellenkennzeichen im Aquatorium des Hafens. In diesem Artikel gibt man einen Durchschnitt der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen der Wellenverformungen für Variantenlösungen der zusätzlichen Bauten mit Quantifizierung möglicher Verbesserung, Einhaltung oder Verschlechterung des gegenwärtigen Zustands. Die Ergebnisse des physikalischen und mathematischen Modellierens sind verglichen.

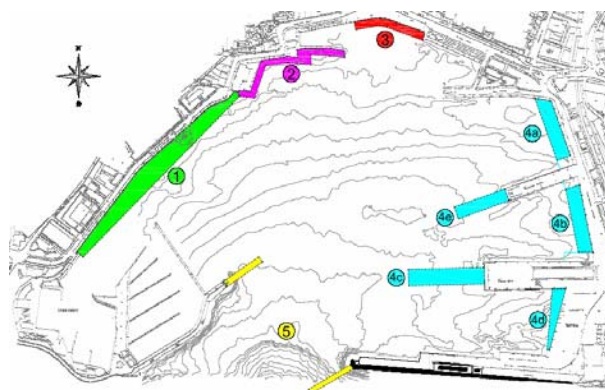
Autori: Doc. dr. sc. **Goran Lončar**; prof. dr. sc. **Vladimir Andročec**, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; **Vedran Petrov**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

## 1 Uvod

Split kao najveća putnička trajektna luka Hrvatske ima posebno značenje za organizaciju i tijek pomorskog prometa, s obzirom da se preko gradske luke povezuje velik dio otočkog arhipelaga Hrvatske. Preko Splita su u najvećoj mjeri povezani srednjodalmatinski otoci: Brač, Šolta, Hvar, Vis, Korčula, i Lastovo, na kojima živi približno 40.000 stanovnika, mnogo povremenih stanovnika i velik broj turista i izletnika tijekom sezone. Dinamika razvoja pomorskog prometa i propusnosti luke, a u svjetlu prognoze rasta putničkog i trajektnog prometa, upućuju na važnost ozbiljnog razmatranja adekvatnih zahvata u lučkom akvatoriju. U tome su posebno osjetljivi ulaz i izlaz iz luke. Unutar akvatorija luke su i nautički sadržaji (ACI marina, Sportsko društvo Labud, Sportsko društvo Mornar i Sportsko društvo Matejuška). Zapadna je obala u smislu prihвата (pristajanja) brodova nedovoljno iskorištena, za razliku od istočne obale koja je rezervirana isključivo za putnički i trajektni promet.

Luci Split zbog važnosti i potreba daljeg razvoja potrebna je provedba analiza s komparativnim i suvremenim znanstvenim alatima. Istraživanjem na numeričkim i fizikalnim modelima ostvaruje se sinergijski učinak s obzirom da se paralelno koriste prednosti pojedinog načina modeliranja. Primjerice, na numeričkim modelima moguća je relativno brza i jeftina provedba analiza deformacija valova uz uvjete izmijenjenih obalnih crta koje su potrebne za kvantifikaciju željenih ili neželjenih posljedica tih promjena u smislu izmjene valnog polja u luci. Na taj se način u znatnoj mjeri omogućava odgovarajuća ušteda u broju potrebnih analiziranih varijanti na fizikalnom modelu čiji je osnovni nedostatak povećana vremenska i ekonomska realizacija izrade varijantnih rješenja. S druge strane, na numeričkim modelima nije moguća provedba analiza prelijevanja koje se uobičajeno tretira s fizikalnim modelima. Zbog navedenih je razloga za provedbu analiza valnih deformacija u splitskoj luci primijenjeno hibridno modeliranje odnosno modeliranje i s fizikalnim i s numeričkim modelima. Zbog svega navedenog na fizikalnim i numeričkim modelima provedene su analize potencijalno adekvatnih zahvata unutar akvatorija gradske luke u Splitu radi poboljšanja (olakšanja) pomorskog prometa i lučko pomorskih aktivnosti. Planirani zahvati u gradskoj luci podijeljeni su u pet zona sukladno slici 1. Za zonu 1. predviđa se rekonstrukcija i proširenje postojeće obale s dogradnjom pristana, za zone 2.,3.,4. predviđa se rekonstrukcija i/ili dogradnja odnosno proširenje obale, a za zonu 5. produljenje glave glavnog lukobrana splitske luke i glava lukobrana ACI marine radi zaštite zapadne obale luke.

S fizikalnim i numeričkim modelima nizom provedenih analiza praćene su sve valne deformacije za sadašnje stanje izgradnje i odabrane varijante kojima su uključeni



Slika 1. Zone planiranih dogradnja gradske luke u Splitu

i planirani novi konstrukcijski elementi. U ovome radu izdvojene su analize koje se odnose samo na sljedeća stanja izgrađenosti:

- analiza valnih deformacija za sadašnje stanje izgrađenosti pri djelovanju direkcijskih dubokovodnih valnih spektara povratnih perioda 5 godina iz centralnih smjerova SE (sektor I), S (sektor II), SW (sektor IV), uz direkcijsku disperziju od  $25^0$  (slika 3.)
- analiza valnih deformacija za buduće stanje izgrađenosti (uređenje ZONE 1. s produljenjem ACI lukobrana za 50 m i 100 m i bez njega te sa smanjenjem refleksije obalne crte zone 1.) i bez nje pri djelovanju istih dubokovodnih valnih spektara kao i u prethodnoj točki
- analiza valnih deformacija za buduće stanje izgrađenosti (uređenje ZONE 1. sa smanjenjem refleksije obalne crte, zone 2. u formi vertikalnog zida ili naspipne školjere, zone 3. u formi vertikalnog zida, zone 4. u formi konstrukcije na pilotima te uz produljenje ACI lukobrana za 50 m i glavnog lukobrana za 50 m s lomom njegove uzdužne osi) pri djelovanju istih dubokovodnih valnih spektara kao i u prethodnoj točki

## 2 Numerički modeli

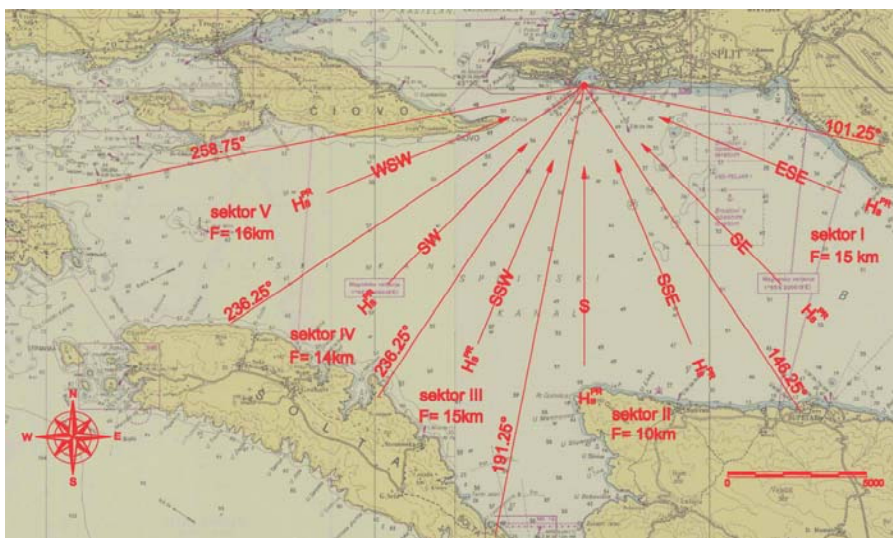
Istraživanje valnog polja unutar luke provedeno je numeričkim modelima MIKE 21/BW (DHI, 2007) i TELEMAC – ARTEMIS (EDF, 2005.).

Numerički model MIKE 21/BW zasnovan je na rješavanju vremenske domene u Boussinesqovim jednadžbama. Boussinesqove jednadžbe sadrže članove kojima je obuhvaćen i utjecaj frekvencijske disperzije i nelinearnosti i to ne samo u dubokovodnom, već i u prijelaznom i plitkovodnom području. Frekvencijska disperzija uzeta je u obzir u jednadžbama količine gibanja u kojima je uzet u obzir i efekt vertikalnog ubrzanja na distribuciju tlakova. Jednadžbe se rješavaju uporabom fluks-formulacije s poboljšanim linearnim disperzijskim karakteristikama. Primjenom tako proširenih jednadžbi Boussinesqova tipa

omogućene su analiza i simulacija propagacije usmjerene valne grupe iz dubokovodnog u plitkovodno područje. Maksimalni omjer dubine i duljine dubokovodnog vala kojim je moguće ostvariti simulaciju je 0,5 uz primjenu proširene Bousinesqove jednadžbe ili 0,22 ako se rabi samo osnovna Bousinesqova formulacija bez proširenja. Jednadžbe se u numeričkom modelu rješavaju implicitnom tehnikom konačnih diferencija. Ovim numeričkim modelom obuhvaćene su sve kombinacije relevantnih utjecaja na deformacije valova poput prostorne varijabilnosti dubina, refrakcija, difrakcija, trenja s dnom, parcijalne refleksije i transmisije, nelinearne interakcije između dvaju ili više valova i frekvencijsko širenje, te nelinearni fenomeni poput formiranja valne grupe, generiranja viših i nižih harmonika.

Modul ARTEMIS jest sastavni dio TELEMAC paketa Artemis kojim se rješava Berkhoffova eliptična jednadžba blagog nagiba (*elliptic mild slope equation*), koristeći se tehnikom konačnih elemenata. Ta jednadžba dobivena je iz osnovnih Navier-Stokesovih jednadžbi, uzimajući u obzir nekoliko hipoteza (mala vrijednost strmine vala, mala vrijednost nagiba dna mora). Glavni su izlazni parametri u svakom čvoru numeričke mreže visina, faza i smjer vala. Valna se analiza temelji na spektralnom prikazu nadolazećeg vala, tj. razina vodnog lica u određenoj točki računa se kao superpozicija konačnog broja monokromatskih valova, gdje se pritom svaki od tih valova kreće svojom pripadnom brzinom koja je funkcija perioda i dubine.

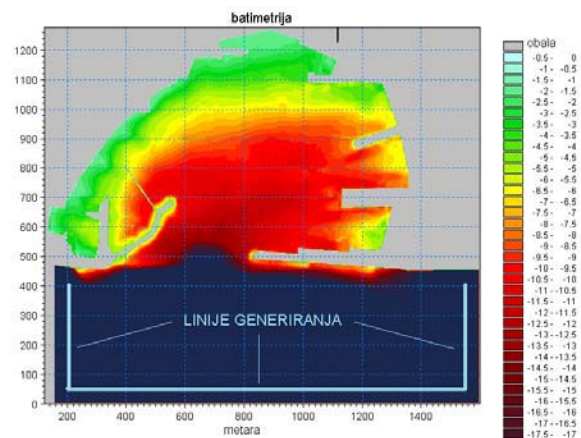
Za detaljniji pregled o numeričkim formulacijama modela MIKE i TELEMAC upućuje se na referencije [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].



Slika 3. Podjela privjetrišta na sektore prema [14] i usvojene znatne valne visine i vršni periodi za analizirane dubokovodne valne spektre povratnih perioda od 5 godina

## 2.1 Prostorna domena numeričkih modela

Prostorne domene numeričkih modela za dispoziciju luke i batimetriju prema sadašnjem stanju izgrađenosti prikazane su na slici 2. Na slikama su ucrtani i položaji linije generiranja valnog spektra u numeričkim modelima. Batimetrija [12] je referencirana na hidrografsku nulu. U modelu MIKE 21/BW primijenjen je ekvidistantan prostorni raster numeričkih čvorova s inkrementom  $\Delta x = \Delta y = 2$  m. U numeričkom modelu TELEMAC – ARTEMIS generirana je numerička mreža trokutastih konačnih elemenata s prostorni inkrementom od  $\Delta x = 2-6$  m.



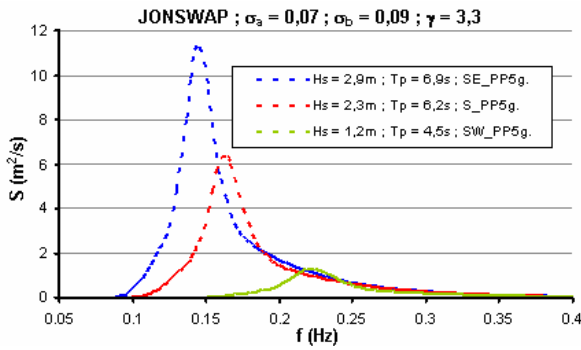
Slika 2. Prostorna domena numeričkog modela i batimetrija luke prema postojećem stanju [12,13]

## 2.2 Rubni uvjeti numeričkih modela

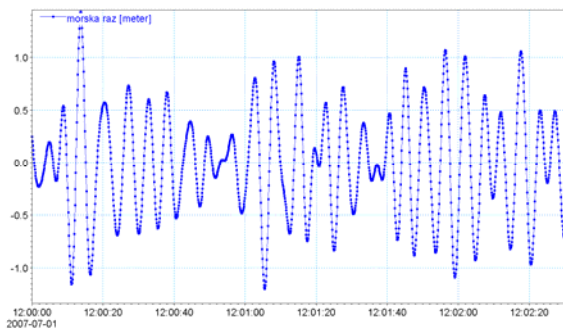
Na linijama generiranja numeričkih modela definirani su rubni uvjeti odabirom dubokovodnih valnih spektara ispred same gradske luke u Splitu sa statističkim obilježjima i povratnim periodima prikazanim na slici 3. dobivenih na temelju analize vjetrovalne klime [14]. Na slici 4. je dvodimenzionalni prikaz spektara, a na slici 5. karakteristične vremenske sekvencije morskih razina na liniji generiranja iz smjera SE (JONSWAP spektar;  $\gamma = 3,3$  [15, 16, 17];  $H_s = 2,9$  m;  $T_p = 6,9$  s; direkcijska disperzija  $25^\circ$ ; PP = 5 g).

Na slici 6. je prikaz usvojenih koeficijenata refleksije i transmisije po obalama gradske luke u Splitu za sadašnje stanje izgrađenosti po zonama pri razini mora koja odgovara hidrografskoj nuli [12]. Numerički opis



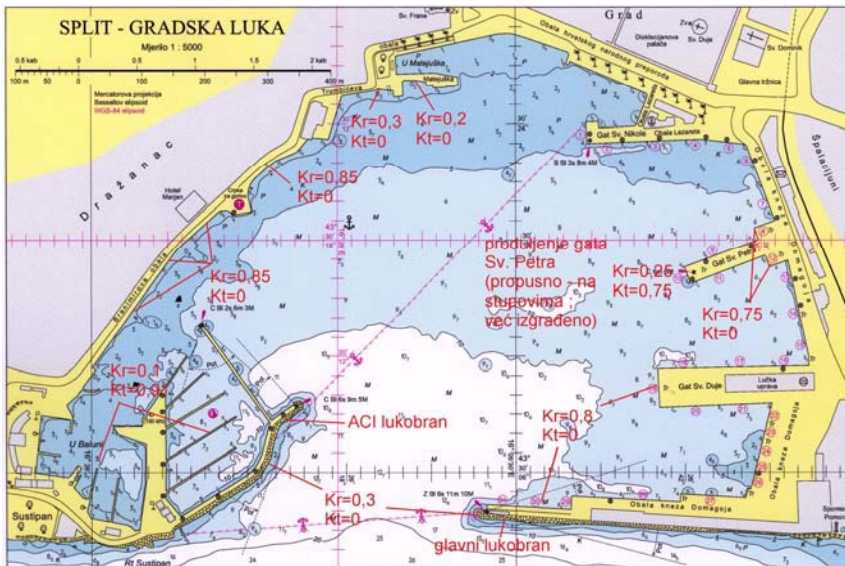


Slika 4. Dijagram dubokovodnih valnih spektara ispred splitske gradske luke sa statističkim obilježjima za povratni period od 5 godina (JONSWAP spektr ;  $\gamma = 3,3$  ; direkcijska disperzija  $25^\circ$ ) [13]



Slika 5. Karakteristične sekvencije morskog razina na liniji generiranja u numeričkom modelu MIKE 21/BW (JONSWAP spektr ;  $\gamma = 3,3$  ;  $H_{S(PP=5g)}=2,9m$  ;  $T_p=6,9s$  ; direkcijska disperzija  $25^\circ$ )

željenog stupnja refleksije od obalne crte i/ili lukobrana te disperzija energije vala u prostornoj domeni modela



Slika 6. Prikaz usvojenih koeficijenata refleksije  $K_r$  i transmisije  $K_t$  po obalama splitske gradske luke [13] za sadašnje stanje izgrađenosti pri razini mora koja odgovara hidrografskoj nuli [12] (naznačene vrijednosti odnose se samo na obalne crte koje nisu u izvedbi vertikalnoga nepropusnog zida za koji je usvojena vrijednost  $K_r = 1$ )

ostvarena je upotrebom apsorbirajućih slojeva (*sponge layers*) i refleksijsko-disipativnih slojeva (*porosity layers*) s baždarnim numeričkim koeficijentima. Apsorbirajućim se slojevima onemogućuje refleksija valova od krutih granica numeričkog modela koje nisu prisutne u stvarnosti, odnosno širenje valne energije izvan područja primarnog interesa za sadašnje stanje izgrađenosti. Za svaki su analizirani incidentni smjer i povratni period vrijednosti koje se upotrebljavaju za refleksijsko-disipativne slojeve različite.

### 3 Fizikalni model

S obzirom na složenost oblika i izrazitu razvedenost luke te složenih hidrodinamičkih pojava, osim sa matematičkim modelom, odabrane su modifikacije analizirane i s pomoću fizikalnog modela. Hidraulička modelska istraživanja na fizikalnom modelu pružit će projektantu uvid u hidrauličko ponašanje građevina u zonama planiranih zahvata i njihov učinak na cijelu luku da bi buduće građevine i čitava luka postali sigurniji i kvalitetniji.

#### 3.1 Prostorna domena fizikalnog modela i izbor mjerila

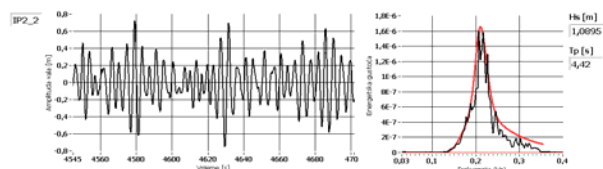
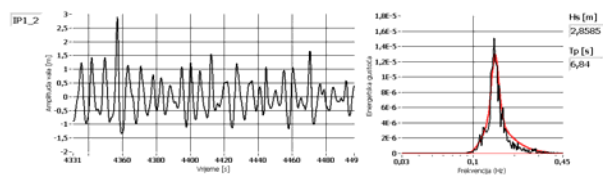
Veličina modeliranog područja, uvjeti sličnosti, kao i mogućnost smještaja modela u Hidrotehničkom laboratoriju Instituta građevinarstva Hrvatske u Zagrebu odredili su i mjerilo modela. Na temelju teorijskih analiza, mogućnosti smještaja modela i karakteristika generatora valova određeno je mjerilo 1:50, i to prema Froudeovoj sličnosti jer dominiraju gravitacijske sile (gravitacijski vjetreni valovi). Fizikalnim modelom obuhvaćeno je područje splitske gradske luke od ACI marine na zapadu do gata sv. Duje (carinski gat) na istoku, od uvale Matejuška na sjeveru do glavnog lukobrana na jugu. Ukupno je obuhvaćeno područje  $1,46 \text{ km} \times 1,20 \text{ km} = 1,75 \text{ km}^2$ . Model je izrađen od čvrstog materijala s ucrtanim rasterom po 100 m i odgovarajućom batimetrijom s točnošću  $\pm 5 \text{ cm}$  u prirodi. Posebna pažnja posvećena je modeliranju morskog dna unutar lučkog akvatorija, a upotrijebljeni su podaci iz najnovijih mjerenja Hrvatskoga hidrografskog instituta iz Splita [12]. Sustav za generiranje valova, prikupljanje i analizu podataka izradio je Brodarski institut, Zagreb. Sustav se sastoji od šest generatorskih ploča, dimenzija  $3000 \times 850 \text{ mm}$ ,

s maksimalnim hodom 400 mm. Svaka od 6 osnovnih generatorskih ploča zasebna je konstrukcijska cjelina i mogu se povezivati u raznim kombinacijama. U našem su slučaju uporabljeni generatorski blokovi 3 + 3, budući da su se generirali valovi iz dva smjera, SE i SW smjera. Svaki je generatorski blok širok 9 m (450 m u prirodi), a udaljeni su oko 500 m od ulaza u luku. Generator valova izveden je kao dvodimenzijski tzv. "piston-type", gdje se generiraju valovi okomito na površinu pomične ploče. Oprema za prikupljanje i analizu izmjerenih veličina sastoji se od 16 kapacitivnih mjernih sonda, po dvije sonde na svakom bloku generatora valova (pričvršćene na ploču generatora), po dvije sonde ispred svakog bloka generatora (za kontrolu povratnog vala) i 12 pomičnih mjernih sonda unutar akvatorija modela. Smještaj fizikalnog modela u Hidrotehničkom laboratoriju IGH Zagreb, zajedno s opremom za generiranje i registriranje visine valova, prikazan je na slikama 7., 8., 9., 10. i 11.



Slike 10., 11. Izgled fizikalnog modela splitske gradske luke – produljenje lukobrana ACI marine (lijevo) i glavnog lukobrana (desno) [13]

### 3.2 Rubni uvjeti – deformacije valova (fizikalni model)



(--- Teorijski spektar ; ---- Generirani spektar)

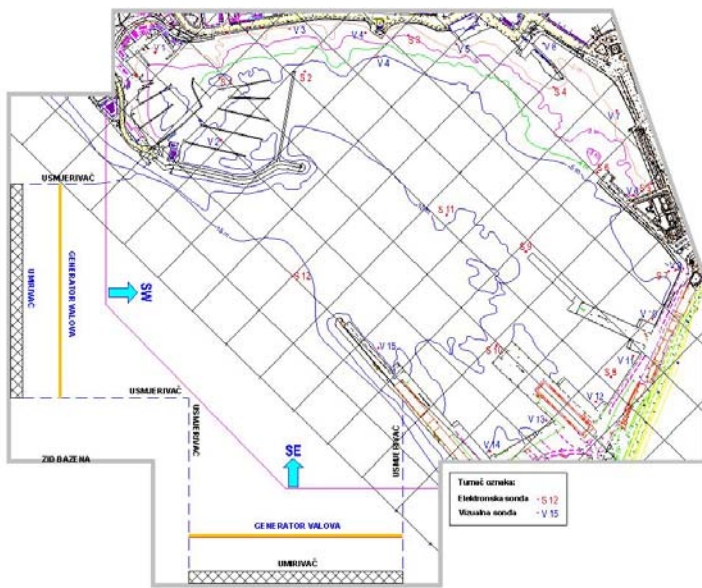
Slika 12. Dubokovodni valni spektri ispred ulaska u luku za smjer SE ( $H_s = 2,9$  m ; PP = 5 god., slika gore) i za smjer SW ( $H_s = 1,2$  m ; PP = 5 god., slika dolje) [13]

Na fizikalnom modelu generirani su valni spektri na temelju podloga iz elaborata vjetrovalne klime splitske gradske luke [14]. Smjerovi generiranja na fizikalnom modelu jesu SE (jugo) i SW (lebić). Karakteristike generiranih valova, snimka ulaznog teorijskog signala i dobivenog mjerena spektra prikazani su na slici 12.

### 4 Rezultati modeliranja

Na temelju provedenih numeričkih analiza dobivena su i rezultatna polja znatnih valnih visina statistički obrađenih za 40 minuta numeričke simulacije.

Pri dubokovodnom valnom spektru iz S smjera (slika 13.), izgradnja samo zone 1. u formi vertikalnog zida s koeficijentom refleksije  $K_r = 1$  uzrokuje znatno pogoršanje trenutnog stanja na cijelom području luke (slika 13.b). U slučaju produljenja ACI lukobrana za 50 m (slika 13.c), u istočnom dijelu luke još se uvijek pojavljuje povećanje valnih visina u usporedbi s postojećim stanjem. Nadalje, produljenjem ACI lukobrana za 100 m (slika 13.d) omogućava se smanjenje valnih visina ispod pos-

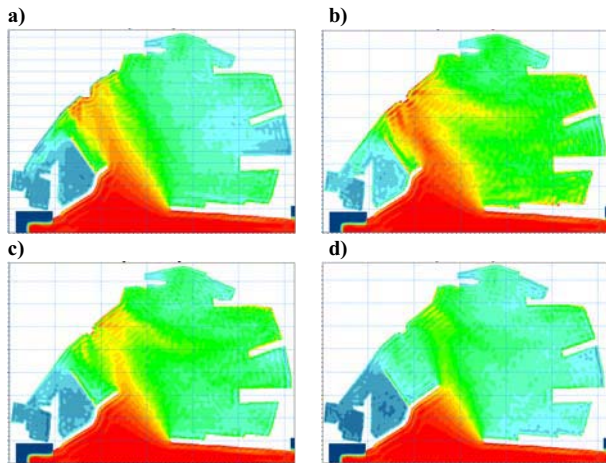


Slika 7. Smještaj fizikalnog modela u Hidrotehničkom laboratoriju IGH Zagreb, zajedno s opremom za generiranje i registriranje visine valova pri postojećem stanju luke [13]



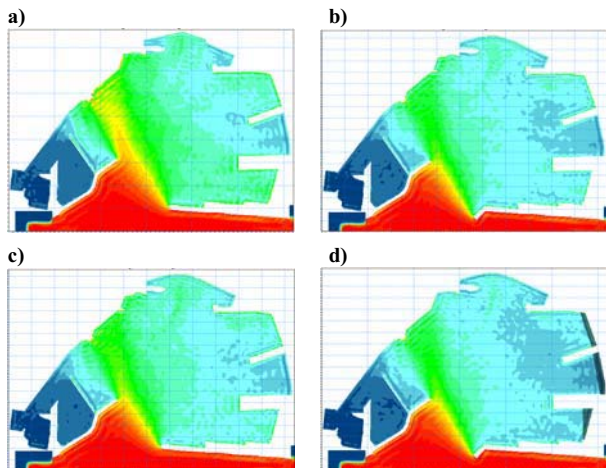
Slike 8. i 9. Izgled fizikalnog modela splitske gradske luke – pogled na sjevernu (lijevo) i južnu (desno) stranu luke [13]





Slika 13. Prikaz polja znatnih valnih visina za sadašnje stanje izgrađenosti (a), uređenje zone 1. s vertikalnim zidom (b), uređenje zone 1. s vertikalnim zidom i sa produljenjem ACI lukobrana za 50 m (c), uređenje zone 1. s vertikalnim zidom i s produljenjem ACI lukobrana za 100 m (d) pri dubokovodnom valnom spektru iz smjera SE za povratni period od 5 godina [13]

tojećeg stanja. Zbog toga je u nastavku analizirana i varijanta s izvedbom zone 1. kao komore za smanjenje refleksije. U numeričkom modelu koeficijent refleksije od obalne crte izvedene kao komora za smanjenje refleksije usvojen je s vrijednosti  $K_r = 0,5$ . Takvom izvedbom zone 1. uz produljenje ACI lukobrana od 50 m, omogućeno je da valne visine budu manje od postojećeg stanja na cijelom području luke (slika 14.a).

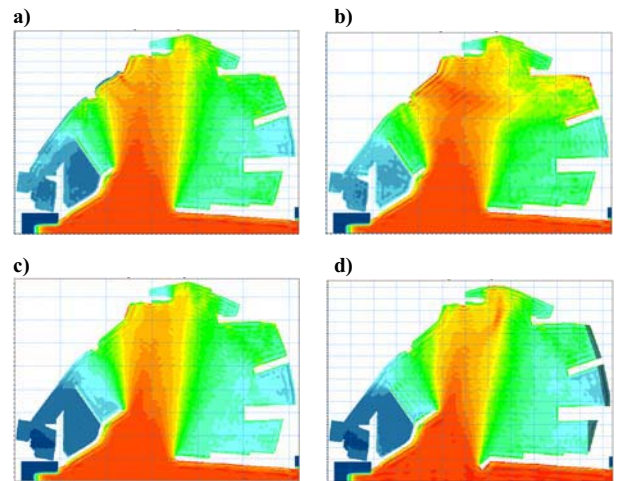


Slika 14. Prikaz polja znatnih valnih visina za uređenje zone 1. s prigušnim komorama (a, b, c, d), zone 2. i 3. s vertikalnim zidom (b, c), uz produljenje ACI lukobrana za 50 m (b) ili 100 m (c) i glavnog lukobrana za 50 m (b, c, d), te uz izvedbu zone 2. kao nasipne školjere i zone 4 kao propusne konstrukcije na pilotima (d) [13]

Na slici 14. prikazana su i daljnja varijantna rješenja u kojima se zona 1. uvijek izvodi s komorama za smanjenje refleksije ( $K_r = 0,5$ ). Izvedba zone 2. prvobitnim projektom zamišljena je također u obliku vertikalne

obale (slike 14.b i 14.c), no kako se nizom provedenih analiza to rješenje pokazalo uzročnikom daljnjeg povećanja valnih visina u području akvatorija luke, u konačnom predloženom rješenju obala zone 2. definirana je kao nasipna školjera (slika 14.d). Produljenje glavnog lukobrana za 50 m s lomom osi i ACI lukobrana za 50 m (slika 14.b) ili 100 m (slika 14.c) uzrokuje daljnje željeno smanjenje valnih visina.

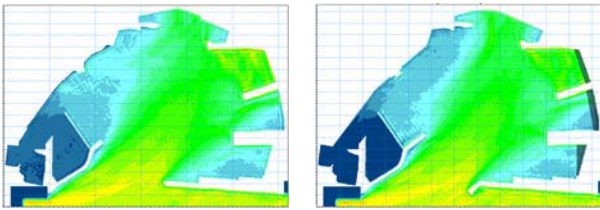
Pri dubokovodnom valnom spektru iz S smjera (slika 15.) izgradnja samo zone 1. u obliku vertikalnog zida s koeficijentom refleksije  $K_r = 1$  uzrokuje znatno pogoršanje postojećeg stanja na cijelom području luke (slika 15.b). U slučaju produljenja ACI lukobrana za 50m i izvedbe zone 1. kao komore za smanjenje refleksije s koeficijentom refleksije  $K_r = 0,5$  uočava se poboljšanje postojećeg stanja (slika 15.c). Dodatna izvedba produljenja glavnog lukobrana za 50 m s lomom osi, zone 2. u formi nasipne školjere, zone 3. kao vertikalne stijene i zone 4. kao konstrukcije na pilotima također omogućava daljnje smanjenje valnih visina na gotovo cijelom području luke (slika 15.d).



Slika 15. Prikaz polja znatnih valnih visina za sadašnje stanje izgrađenosti (a), uređenje samo zone 1. s vertikalnim zidom (b), uređenje zone 1. s prigušnim komorama uz produljenje ACI lukobrana za 50 m (c,d) i glavnog lukobrana za 50m s lomom osi (d), te uz izvedbu zone 2. kao nasipne školjere i zone 4. kao propusne konstrukcije na pilotima (d) pri dubokovodnom valnom spektru iz smjera S za povratni period od 5 godina [13]

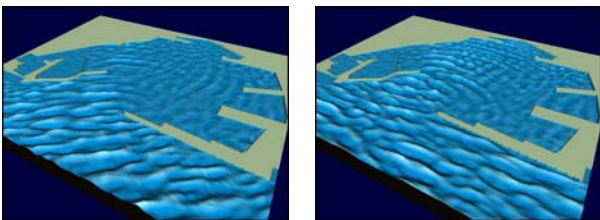
Pri dubokovodnom valnom spektru iz SW smjera (slika 16.) dodatna izvedba analiziranih konstrukcijskih cjelina po zonama najmanje utječe na izmjenu valnih visina u akvatoriju luke. Produljenjem ACI lukobrana za 50 m i glavnog lukobrana za 50 m sa lomom osi te izvedbe zone 1. kao komore za smanjenje refleksije s koeficijentom refleksije  $K_r = 0,5$ , zone 2. u obliku nasipne školjere, zone 3. kao vertikalne stijene i zone 4. kao konstrukcije na pilotima omogućava blago smanjenje valnih visi-

na u usporedbi s postojećim stanjem izgrađenosti na cijelom području luke (slika 16.b).



Slika 16. Prikaz polja znatnih valnih visina za sadašnje stanje izgrađenosti (a) te pri uređenju zone 1. s prigušnim komorama uz produljenje ACI lukobrana za 50 m i glavnog lukobrana za 50 m s lomom osi, te uz izvedbu zone 2. kao nasipne školjere i zone 4. kao propusne konstrukcije na pilotima (b) pri dubokovodnom valnom spektru iz smjera SW za povratni period od 5 godina [13]

Na slici 17. prikazano je 3D valno polje za dubokovodne valne spektre iz SE (slika 17.a) i S smjer (slika 17.b) pri sadašnjem stanju izgrađenosti. Na slici 18. označena su karakteristična područja unutar gradske luke u Splitu za koja su proračunate vrijednosti srednjih znatnih valnih visina za provedene numeričke analize deformacija valova. U tablici 1. je komparativni prikaz vrijednosti srednjih znatnih valnih visina na karakterističnim područjima sa slike 18. unutar splitske gradske luke za dubokovodni valni spektar i SE smjera.



Slika 17. Prikaz trenutačnog prostornog valnog polja pri dubokovodnom valnom spektru iz SE smjera (lijevo) i S smjera (desno) u jednom trenutku numeričke simulacije pri sadašnjem stanju izgrađenosti (MIKE 21/BW [13])



Slika 18. Karakteristična područja unutar splitske gradske luke za koja su proračunate vrijednosti srednjih znatnih valnih visina prikazanih u tablici 1.

Tablica 1. Srednje znatne valne visine na karakterističnim područjima sa slike 16. za dubokovodni valni spektar iz SE smjera, povratni period 5 godina (VZ – vertikalni zid, KOM – komore za smanjenje refleksije, NŠ – nasipna školjera, PIL – propusna konstrukcija na pilotima) [13]

ANALIZA	Područje ( $H_s$ – srednje (m))														
	1	2	3a	3b	4	5	6a	6b	7a	7b	8	9	10a	10b	10c
sadašnje	0,28	0,28	0,88	1,25	0,79	0,64	0,44	0,58	0,44	0,52	0,38	0,67	0,71	0,62	0,70
1 (VZ)															
+ACI_50m	0,26	0,31	0,61	1,33	0,89	0,98	0,76	0,98	0,72	0,65	0,77	0,60	0,64	0,66	0,65
1 (KOM)															
+ACI_50m	0,10	0,13	0,34	0,96	0,82	0,60	0,42	0,54	0,44	0,48	0,48	0,59	0,62	0,62	0,60
1 (KOM)															
2(VZ), 3(VZ)															
+ACI_50m															
+GL_50m	0,10	0,13	0,28	0,70	0,65	0,52	0,38	0,49	0,41	0,43	0,41	0,47	0,48	0,49	0,49
1 (KOM), 2(NŠ), 3(VZ), 4(PIL)															
+ACI_50m															
+GL_50m	0,08	0,12	0,25	0,67	0,49	0,46	0,35	0,44	0,37	0,41	0,37	0,40	0,40	0,44	0,47

## 5 Usporedba rezultata numeričkih modela

U tablicama 2. i 3. prikazane su srednje vrijednosti znatnih valnih visina na karakterističnim područjima (slika 16.) unutar luke dobivene numeričkim modelima Mike i Telemac za sadašnje stanje izgrađenosti.

Tablica 2. vrijednosti srednjih znatnih valnih visina na karakterističnim područjima unutar splitske gradske luke za postojeće stanje izgrađenosti s modelom Mike za valne spektre iz S, SE i SW smjera [13]

MIKE	Područje ( $H_s$ – srednje (m))														
	1	2	3a	3b	4	5	6a	6b	7a	7b	8	9	10a	10b	10c
S	0,22	0,20	0,56	1,57	1,40	0,87	0,59	0,73	0,56	0,53	0,50	0,63	0,72	0,60	0,61
SE	0,28	0,28	0,88	1,25	0,79	0,64	0,44	0,58	0,44	0,52	0,38	0,67	0,71	0,62	0,70
SW	0,11	0,12	0,26	0,41	0,39	1,08	0,73	0,93	0,72	0,78	0,46	0,54	0,36	0,41	0,57

Tablica 3. vrijednosti srednjih znatnih valnih visina na karakterističnim područjima unutar splitske gradske luke za postojeće stanje izgrađenosti s modelom Telemac za valne spektre iz S, SE i SW smjera

TELEMAC	Područje ( $H_s$ – srednje (m))														
	1	2	3a	3b	4	5	6a	6b	7a	7b	8	9	10a	10b	10c
S	0,32	0,32	0,64	1,49	1,45	0,65	0,38	0,56	0,44	0,57	0,40	0,65	0,70	0,66	0,73
SE	0,33	0,38	0,75	1,32	0,88	0,54	0,28	0,42	0,36	0,45	0,32	0,58	0,70	0,67	0,56
SW	0,25	0,26	0,33	0,45	0,39	0,92	0,33	0,81	0,88	1,01	0,51	0,60	0,40	0,40	0,53

Uočava se visoki stupanj sličnosti između rezultata u gotovo cijeloj domeni (razlika manja od +/-20 %). Značajne razlike prisutne su za područje ACI marine gdje Telemac daje veće valne visine (do 60 %) i u području iza gata sv. Petra (područje 6.a i 6.b), gdje je dobivena visina vala manja i do 80 % od vrijednosti dobivene modelom Mike. Razlog razlikama jest u različitim postavkama dvaju numeričkih modela. Naime, Telemac valne deformacije tretira Berkhoffovom jednadžbom blagog nagiba, dok je u Mike modelu uporabljena Boussinesqova valna jednadžba. U plićim područjima kao što je područje ACI marine (područje 1 i 2) model Mike trebao bi bolje simulirati realno stanje. Područje oko gata sv. Petra (područje 6 i 7) ne može se izravno uspoređivati s



obzirom na to da je novoizgrađeni dodatak gata sv. Petra na pilotima drukčije tretiran u navedenim numeričkim modelima. U modelu Miku je dio gata na pilotima tretiran kao propustan, dok u Telemacu ta opcija nije moguća pa je tretiran kao nepropustan; u oba modela ima ista refleksijska svojstva. Iz navedenog razloga u modelu Miku more struji ispod naglavne konstrukcije oslonjene na pilotima i prenosi se dio valne energije na područje iza, dok je u Telemacu područje 6 u sjeni (manja valna visina), a područje 7 preuzima cijelu dolaznu valnu energiju zbog čega su i veće visine vala.

### 6 Usporedba rezultata numeričkog i fizikalnog modeliranja

Usporedba rezultata fizikalnog modela s numeričkim modelima (Telemac i Mike) moguća je samo na karakterističnim točkama unutar luke gdje su postavljene mjerne sonde tijekom ispitivanja na fizikalnom modelu (slika 7). Promatrano je postojeće stanje izgrađenosti, uz napomenu kako je fizikalni model izrađen u mjerilu 1:50. Incidentni valni spektri postignuti su radom dvaju generatora valova. Jedan je postavljen za smjer SW, a drugi za smjer SE. U tablici 4. dan je komparativni prikaz vrijednosti znatnih valnih visina na karakterističnim točkama (točke S1-S12 sa slike 7.) unutar luke Split, za provedene analize na fizikalnom modelu i numeričkim modelima Mike i Telemac. Na nastavnim je dijagramima grafička interpretacija usporedbe rezultata modela, fizikalnog i numeričkih, za postojeće stanje izgrađenosti i smjer incidentnog vala SW i SE. Iz priloženog može se uočiti zadovoljavajuća sličnost rezultata fizikalnog modela i numeričkih modela.

Tablica 4. Usporedba rezultata fizikalnog s numeričkim modelima za smjer SW i postojeće stanje izgrađenosti

pozicija	MIKE (m)		FIZ. MODEL (m)		TELEMAC (m)	
	SW	SE	SW	SE	SW	SE
S1	0.15	0.34	0.37	0.43	0.19	0.32
S2	0.35	0.85	0.62	0.93	0.39	0.77
S3	0.47	1.42	0.45	1.25	0.41	1.25
S4	0.53	0.59	0.45	0.73	0.41	0.66
S5	0.41	0.47	0.34	0.48	0.42	0.6
S6	0.57	0.5	0.6	0.61	0.63	0.53
S7	1.08	0.68	1.1	0.79	0.68	0.64
S8	0.45	0.47	0.59	0.72	0.34	0.33
S9	0.85	0.47	0.85	0.68	0.87	0.43
S10	0.51	0.48	0.58	0.62	0.67	0.35
S11	0.94	0.69	0.91	0.74	0.84	0.6
S12	1.23	2.77	1.05	2.48	1.13	2.36

Za smjer SW dolaznoga valnog spektra, uočeno je pozitivno odstupanje numeričkog modela na području ACI marine (35-55 %) i u istočnom dijelu luke uz obalu (20 – 40 %). Negativno odstupanje (<20 %) zabilježeno je na području Matejuške i rive. Na ostalim kontrolnim točkama rezultati su gotovo istovjetni. Za smjer SE dolaznoga valnog spektra, uočeno je pozitivno odstupanje

numeričkog modela na području ACI marine (<20 %) i u istočnom dijelu luke (15-55 %). Za oba smjera (SW, SE) dolaznog vala karakteristično je da su odstupanja rezultata numeričkih modela od fizikalnog modela na točkama u sredini akvatorija splitske luke (S11 i S12) mala (<17 %), što potvrđuje kompatibilnost rezultata numeričkih modela s fizikalnim modelom.

### 7 Zaključak

Provedeno je matematičko i fizikalno modeliranje valnih deformacija u akvatoriju splitske luke za sadašnje stanje izgrađenosti i planirane zahvate uzduž obalne crte luke. Planirane dogradnje podijeljene su u pet zona. Na temelju provedenih analiza dobiveni su zaključci kojima je optimiziran opseg planiranog zahvata u luci radi održavanja postojećeg stanja valovanja ili njegova poboljšanja.

Modelski rezultati polja znatnih valnih visina i izmjerene znatne valne visine pokazuju da je u svakom slučaju za održavanje ili poboljšanje postojećeg stanja u području zone 1. potrebna izvedba obalne crte s prigušnim komorama (koeficijent refleksije maksimalno  $K_r = 0,5$ ), uz produljenje ACI lukobrana za bar 50 m i glavnog lukobrana također za 50 m s lomom osi i paralelno s linijom ACI lukobrana. Potom, obalna crta zone 2. treba biti izvedena kao nasipna školjera, a zone 4. kako propusna konstrukcija na stupovima. Kao alternativno i prihvatljivo rješenje zona 2. i 4. također je izvedba komora za smanjenje refleksije.

Za dio akvatorija luke koji pripada ACI marini (kontrolna područja 1 i 2 sa slike 18.) utvrdilo se da, prema vrijedećem kriteriju maksimalno dopuštenih znatnih valnih visina  $H_{S-maks} = 0,3$  m (hrvatski registar brodova), pri djelovanju valnih spektara iz S, SE i SW smjera s povratnim periodom od 5 godina, prethodno definirana planirana dogradnja obalnih crta predstavlja prihvatljivo rješenje. Bez obzira na produljenje ACI lukobrana za 50 m ili 100 m s unutarnje, štice strane lukobrana, predviđene



Slika 19. Pojava velikih valnih visina s unutarnje strane ACI lukobrana pri njegovu produljenju za 100 m [13]



za privez plovila, pojavljuju se relativno velike valne visine kao posljedica izgradnje zone 1. (slika 19.). Zbog toga je i taj dio konstrukcije potrebno izvesti u formi komora za smanjenje refleksije.

#### LITERATURA

- [1] Madsen, P. A.: *Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber*, Coastal Engineering, 7 (1983), 381-396.
- [2] Madsen, P. A.; Murray, R.; Sorensen, O. R.: *A new form the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics*, Coastal Engineering, 15 (1991), 371-388.
- [3] Madsen, P.A.; Sorensen, O.R.: *A new form the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics*. Part 2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Engineering, 15 (1992), 183-204.
- [4] Madsen, P.A.; Sorensen, O.R.: *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model*. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Engineering, 32 (1997), 255-287.
- [5] Madsen, P.A.; Sorensen, O.R.; Schäffer, H.A.: *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model*. Part II: surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves, Coastal Engineering, 32 (1997), 289-319.
- [6] Sorensen, O.R.; Schäffer, H.A.; Madsen, P.A.: *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model*. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations, Coastal Engineering, 33 (1998), 155-176.
- [7] Sorensen, O.R.; Schäffer, H.A.; Sorensen, L.S.: *Boussinesq-type modelling using unstructured finite element technique*, Coastal Engineering, 50 (2004), 181-198.
- [8] DHI : MIKE 21 - Coastal Hydraulics and Oceanography, 2007.
- [9] DHI : MIKE Zero – Wave modelling, 2007.
- [10] ARTEMIS : Version 3.0 Principle Note. Report EDF HE-42/97/002. ,1997.
- [11] Berkhoff J.C.W.: *Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves*. Wave Diffraction and Refraction, Delft Hydraulics Laboratory, Publication n°163. ,1976.
- [12] HHI : Batimetrijske podloge za Gradsku luku Split, Split, 2007.
- [13] GFZ i IGH : Matematički i fizikalni model valovanja i strujanja Gradske luke Split u skladu sa smjericama iz GUP-a, 2008.
- [14] GFZ: Izrada matematičkog i fizikalnog modela valovanja i strujanja za Gradsku luku Split - Elaborat vjetrovalne klime, Zagreb, 2007.
- [15] Goda Y. : *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced series on ocean engineering, World Scientific Ed., New Jersey, 2000.
- [16] Massel S.R.: *Ocean Surface Waves : their physics and prediction*, Advanced series on ocean engineering, World scientific Ed., New Jersey, 1996.
- [17] Mei C.C.: *The applied dynamics of ocean surface waves*, Advanced series on ocean engineering, World scientific Ed., New Jersey, 1989.

Na fizikalnom modelu pokazalo se da je obalna crta zone 3. izložena intenzivnom prelijevanju pri djelovanju spektara iz SW smjera, a koje je također moguće znatno umanjiti izvedbom komora za smanjenje refleksije.