

# Usporedba numeričkog i fizikalnog modela refleksije i uplićavanja valnog polja

---

**Mandalinić, Kleme**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:382329>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Kleme Mandalinić**

**Split, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Usporedba numeričkog i fizikalnog modela refleksije i  
uplićavanja valnog polja**

**Završni rad**

**Split, 2024.**

# Usporedba numeričkog i fizikalnog modela refleksije i uplićavanja valnog polja

## ***Sažetak:***

Ovaj završni rad istražuje refleksiju i uplićavanje valova kroz dva pristupa: fizikalni model i numerički model u MATLAB-u. Fizikalni model koristi plastičnu kutiju (34 x 54 cm), LED svjetla, spužvu za umanjeње refleksije valova na stijenkama bazena, 3D printane modele obale, električni motor za stvaranje valova i digitalni mjerač razine vode u bazenu. Eksperimenti su provedeni za različite tipove obale i tri različita vala. Numerički model programiran u MATLAB-u izračunava plan refrakcije, uplićavanje i refleksiju uz zadavanje koeficijenta refleksije u obalnoj zoni. Cilj rada bio je usporediti rezultate fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija te analizirati njihovu točnost i efikasnost. Rezultati su pokazali visoku podudarnost, uz razmatranje odstupanja zbog eksperimentalnih ograničenja i aproksimacija primijenjenih u numeričkom modelu. Zaključno, rad istražuje i ukazuje na prednosti i izazove oba pristupa u analizi ponašanja valnog polja uslijed procesa refleksije i uplićavanja.

***Ključne riječi:*** refleksija, uplićavanje, fizikalni model, numerički model, „MATLAB, valno polje, simulacija valova, eksperimentalna analiza

## **Comparison of numerical and physical models of wave field reflection and shoaling**

### ***Abstract:***

This thesis investigates the phenomena of wave field reflection and shoaling by implementing two approaches: a physical model and a numerical model using MATLAB. The physical model uses a plastic rectangular box (34 x 54 cm), LEDs, a sponge layer to reduce reflections from the box walls, 3D-printed coastal models filled with cement paste, an electric motor with a paddle for generating waves, and a digital water level sensor. Experiments were conducted with different obstacles, indirectly measuring wave height and period. The numerical model in MATLAB calculates refraction patterns, shoaling, and reflection by assigning a reflection coefficient in the coastal zone. The aim was to compare the results from physical experiments with those from numerical simulations and analyze their accuracy and efficiency. The results showed a high level of agreement, considering deviations due to experimental limitations and numerical approximations. In conclusion, this study has highlighted the advantages and challenges of both approaches when analyzing wave field behavior under the reflection and shoaling transformation processes

***Keywords:*** reflection, shoaling, physical model, numerical model, MATLAB, wave field, wave simulation, experimental analysis

---

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: Kleme Mandalinić  
MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083229380  
KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**  
PREDMET: Pomorske građevine

**ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Tema: Analiza refleksije i uplićavanja valova: usporedba numeričkog modela i fizikalnog modela male skale

Opis zadatka: Ovaj rad će se fokusirati na analizu refleksije i uplićavanja valova koristeći fizikalni model male skale, numerički model i grafo-analitičku metodu iz literature. Cilj je usporediti rezultate dobivene eksperimentalnim mjerenjima s numeričkim modelom, odnosno s rezultatima grafo-analitičke metode.

Rad treba sadržavati:

- Izradu fizikalnog modela male skale za prikaz djelovanja morskih valova pri dolasku na obalu koja izaziva refleksiju i uplićavanje.
- Izradu dva karakteristična tipa obale korištenjem 3D printera.
- Provedbu eksperimenata s tri različita vala na svakom od modela obale.
- Mjerenje visine valova u područjima nastanka refleksije i uplićavanja.
- Izradu numeričkog modela za dva tipa obale i proračun za tri različite dolazne visine vala.
- Usporedbu rezultata numeričkog modela, odnosno grafičko-analitičke metode i izmjerenih visina vala u fizikalnom modelu.

U Splitu, 18.03.2024.

Voditelj Završnog rada:

Komentor Završnog rada:

Doc.dr.sc. Morena Galešić Divić

Izv.prof.dr.sc. Vladimir Divić

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>6</b>
<b>2. OPIS VALNE TRANSFORMACIJE REFLEKSIJE I UPLIĆAVANJA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Općenito o morskim valovima i njihovom nastanku.....	7
2.2. Transformacije valnog polja .....	8
2.3. Refleksija .....	11
2.4. Uplićavanje.....	13
2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja refleksije .....	15
2.6. Primjena i važnost procjene utjecaja uplićavanja .....	16
<b>3. FIZIKALNI MODEL ZA REFLEKSIJU I UPLIĆAVANJE.....</b>	<b>17</b>
3.1. Osnove fizikalnih modela .....	17
3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela .....	18
3.3. Provedeni eksperiment za refleksiju i uplićavanje.....	22
3.4. Ograničenja fizikalnog modela .....	25
<b>4. NUMERIČKI I MODEL TRANSFORMACIJA VALNOG POLJA .....</b>	<b>27</b>
4.1. Osnove numeričkog modela .....	27
4.2. Postavke numeričkog modela za refleksiju i uplićavanje .....	28
<b>5. REZULTATI I USPOREDBA .....</b>	<b>31</b>
5.1. Refleksija .....	31
5.2. Uplićavanje.....	41
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>52</b>
<b>7. POPIS TABLICA I SLIKA .....</b>	<b>53</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>56</b>

## 1.UVOD

Cilj ovog završnog rada je istražiti refleksiju i uplićavanje valnog polja kroz integraciju fizikalnog i numeričkog modeliranja. Posebna pažnja posvećena je analizi transformacije valnog polja u realnim i simuliranim uvjetima, s ciljem unaprjeđenja razumijevanja i primjene u kontekstu pomorskih građevina.

Transformacije valnog polja igraju važnu ulogu u dizajnu i proračunima pomorskih građevina. Promjene u obliku obale, prisutnost prepreka ili specifičnosti terena mogu značajno utjecati na ponašanje valova. Takve promjene zahtijevaju precizno modeliranje i simulacije koje mogu predvidjeti kako će se valovi ponašati u različitim scenarijima. Nedostatak preciznosti u modelima ili nepotpuno razumijevanje interakcije valova s okolinom može dovesti do značajnih problema u proračunima i dizajnu.

Integracija fizikalnih eksperimenata u kontroliranom okruženju s numeričkim simulacijama pruža sveobuhvatan uvid u ponašanje valova. Fizikalni modeli omogućuju direktno mjerenje u kontroliranim (laboratorijskim) uvjetima, dok numerički modeli pružaju fleksibilnost u variranju parametara i uvjeta. Kombinacija ova dva pristupa omogućuje validaciju numeričkih algoritama i teorijskih predviđanja na temelju stvarnih eksperimentalnih podataka. Ovaj pristup omogućuje sveobuhvatno razumijevanje složenih procesa koji se događaju u interakciji valova i okoline, što je od ključne važnosti za optimizaciju dizajna pomorskih građevina.

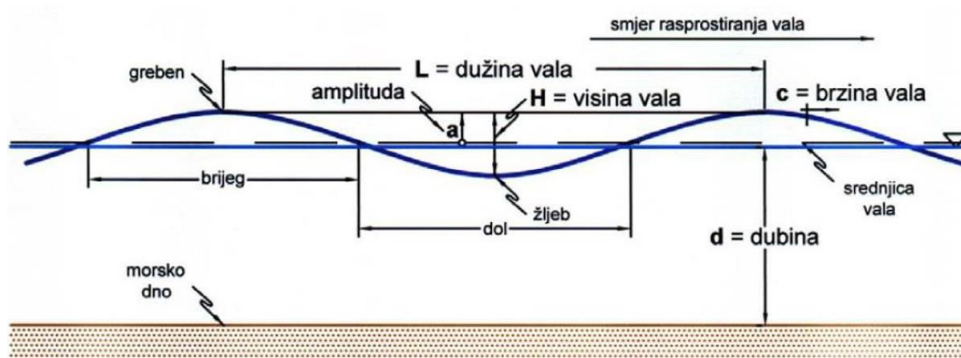
Ovaj rad je proveo i eksperimentalno i numeričko istraživanje kako bi se detaljno proučili refleksija i uplićavanje valnog polja. Postignut je visok stupanj podudarnosti između rezultata fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija, što potvrđuje valjanost i primjenjivost predloženih modela u razumijevanju valnih procesa. Analiza transformacija valnog polja pridonosi boljem razumijevanju ponašanja valova u realnim uvjetima, što je ključno za optimizaciju dizajna pomorskih građevina i sigurnost plovidbe.

## 2.OPIS VALNE TRANSFORMACIJE REFLEKSIJE I UPLIĆAVANJA

### 2.1. Općenito o morskim valovima i njihovom nastanku

Morski valovi su složen fenomen koji proizlazi iz periodičnih oscilacija površine mora. Ova periodična kolebanja nastaju zbog djelovanja različitih sila na vodene čestice. Pobuđujuće sile koje pokreću ove oscilacije mogu biti uzrokovane različitim čimbenicima kao što su vjetar, gibanje plovila, interakcija s drugim tijelima u moru, te promjene u gravitacijskom polju izazvane djelovanjem nebeskih tijela ili seizmičkim poremećajima. S druge strane, umirujuće sile pomažu u stabilizaciji valova. To uključuje površinsku napetost koja nastaje zbog privlačnih sila između vodenih molekula, gravitaciju koja djeluje na vodenu masu, te Coriolisovu silu koja proizlazi iz rotacije Zemlje. Ova kompleksna ravnoteža između pobuđujućih i umirujućih sila rezultira različitim oblicima i veličinama valova koje promatramo na površini mora.

Osnovni parametri vala uključuju valnu visinu  $H$  izraženu u metrima, što predstavlja vertikalnu udaljenost od dna (žlijeba) do vrha (grebena) vala. Valna duljina  $L$  izražena je također u metrima i predstavlja horizontalnu udaljenost između dva uzastopna grebena. Valni period  $T$  izražen je u sekundama i predstavlja vremenski period između dva uzastopna prolaza grebena kroz istu točku. Amplituda vala, označena kao  $H/2$ , predstavlja maksimalni pomak fizičke površine mora od srednjice vala. Valna visina  $H$  i duljina  $L$  parametri su vala koji se mijenjaju s dubinom, dok se period  $T$  ne mijenja s dubinom.



Slika 2.1 Osnovni parametri vala (Pršić M., web skipta: Plovni putevi i luke, ZG)



Valovi se mogu klasificirati prema duljinama njihovih perioda. Valovi kratkih perioda ( do 30 s) obično se formiraju lokalno pod utjecajem kratkotrajnih vjetrova ili oluja, te su često primjetni na plićim vodama. S druge strane, dugo periodični valovi imaju dulje periode između vrhova i dolina. Njihovi uzroci mogu biti globalniji, kao što su udaljeni vjetrovi ili seizmička aktivnost. Takvi valovi mogu putovati tisućama kilometara prije nego što stignu na obalu. Primjerice, tsunami valovi su ekstremni oblik valova dugih perioda (više od 5 min) koji se generiraju seizmičkim poremećajima, poput potresa na morskom dnu ili podvodnih klizišta. Imaju izuzetno dugi period između vrhova i mogu putovati velike udaljenosti preko oceana prije nego što stignu na obalu. Ova razlika u periodima između valova rezultira različitim karakteristikama valova te njihovim različitim utjecajima na okolinu i obalne regije. Najčešći i najvažniji za analizu i projektiranje, posebno u Mediteranu i Hrvatskoj, su vjetrovni valovi koji spadaju u valove kratkih perioda. Vjetrovni val nastaje na dodirnoj plohi između dva medija različitih gustoća, kao što su zrak i more, koji se kreću različitim brzinama, što uzrokuje trenje i prijenos energije između tih medija. Ova interakcija među medijima s različitim gibanjima rezultira fenomenom poznatim kao vjetrovni valovi na površini mora.

## 2.2. Transformacije valnog polja

Linearna valna teorija je osnovni teorijski model koji se koristi za proučavanje ponašanja valova u različitim uvjetima. Ova teorija se temelji na pretpostavci da su valovi male amplitude i da su linearne prirode, što znači da su promjene u karakteristikama valova proporcionalne izvoru pobude. U kontekstu dubokog mora, linearna valna teorija pruža rješenje za monokromatske valove u zoni dubokog mora. To znači da se valovi u dubokim vodama ponašaju kao monokromatski valovi koji imaju jednu dominantnu frekvenciju i jednoličnu duljinu vala.

Pri prijelazu iz dubokog mora u srednje duboko i plitko more, morsko dno počinje utjecati na valove na površini. Kako se dubina smanjuje, dolazi do deformacije vala. Utjecaj dna očituje se kroz parametre vala, ali također i kroz smjer gibanja valova, poznat kao valne zrake. Dubokovodni val ulaskom u zonu utjecaja dna prolazi kroz transformacije uplićavanja i refrakcije, te često u dodiru s obalnim konstrukcijama difrakciju, lom vala, refleksiju i transmisiju. Navedene transformacije se mogu javljati i u dubokom moru, iako su obično manje izražene nego u plićim vodama.

**Uplićavanje** (shoaling effect) je deformacija valova na nagnutom dnu zbog smanjenja dubine kada val na obalnu crtu nailazi pod kutem od nula stupnjeva. Koeficijent uplićavanja  $K_s$  je mjera koja se koristi za opisivanje deformacije valova na nagnutom dnu ili pri promjeni dubine.

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 c_0}{n c}} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} = K_s$$

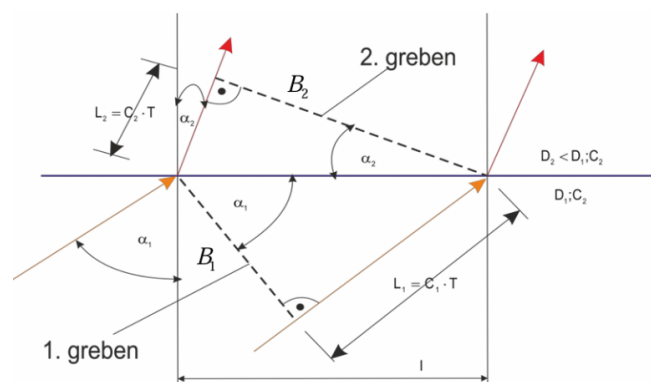
1

$H_0$  – početna visina dubokovodnog vala

$n=c_{g0}/c$  - omjer brzine grupe valova i brzine jednog vala

$K_s$  – koeficijent uplićavanja

Kod **refrakcije**, zrake vala koje zatvaraju kut s normalom na obalnu crtu imaju kut veći od nula stupnjeva. Val se transformira iz dubokog mora prema obali na način da se spomenuti kut postupno smanjuje, sve dok se zraka vala u trenutku dodira obalne crte ne poklopi s normalom na obalnu crtu. Ova pojava proizlazi iz promjene batimetrije, odnosno smanjenja dubine kako val prilazi obalnoj crti. Snellov zakon (Slika 2.2) definira zakretanje zrake pri prijelazu iz jedne zone u drugu, što se obično primjenjuje na lom zraka svjetlosti kroz materijale različitih svojstava. U ovom kontekstu, razlika u svojstvima zona definirana je isključivo dubinom, uz pretpostavku da je gustoća konstantna.



Slika 2.2 Shematski prikaz Snell-ovog zakona na prijelazu izobate za dvije zrake vala u zoni utjecaja dna

**Difrakcija**, poznata i kao ogib, predstavlja deformaciju valova na ravnom dnu koja se javlja kada se pred dio valnog polja postavi vertikalna prepreka, poput lukobrana. To rezultira bočnim

rasprostiranjem energije duž grebena vala, kako ispred tako i iza prepreke. Posljedica je širenje i zakretanje valova u području iza prepreke, uz istovremeno smanjenje valne visine. Difrakcija se najčešće javlja u kombinaciji s refrakcijom.

**Refleksija** predstavlja deformaciju vala koji nailazi na vertikalnu ili nagnutu prepreku, što rezultira totalnim ili parcijalnim reflektiranjem vala, ovisno o koeficijentu refleksije  $K_{refl}$ .

$$K_{refl} = \frac{H_r}{H_i}$$

2

$K_{refl}$  – koeficijent refleksije

$H_r$  – reflektirajuća visina vala

$H_i$  – incidentna visina vala

Za vertikalno i nepropusno prepreke,  $K_{refl}$  je približno jednak 1, dok je za prepreke ili dno s malim nagibom  $K_{refl}$  puno manji od 1.

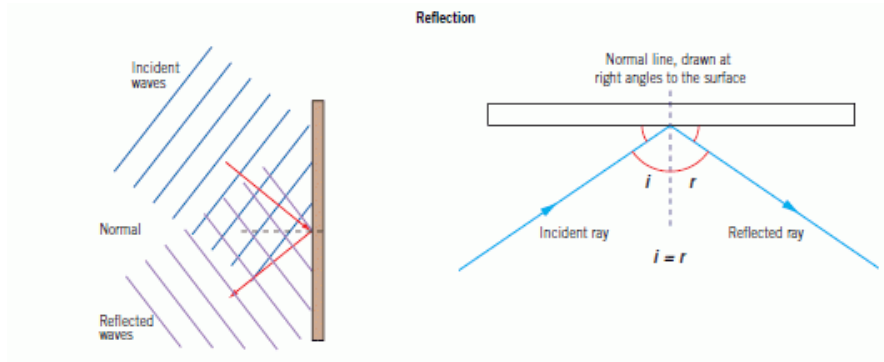
Lom vala je mehanizam transformacije vala u zoni utjecaja morskog dna. Iako se obično javlja u srednjem dubokom i plitkom moru, moguć je i u dubokom moru, što ga svrstava u kategoriju s refleksijom i difrakcijom. Pri nailasku vala na područje s manjom dubinom, val usporava, a brzina čestice na grebenu vala ne smanjuje se proporcionalno progresivnoj brzini vala, što dovodi do loma vala. Ključni uvjet za izbjegavanje loma vala jest da je brzina čestice na grebenu manja ili jednaka progresivnoj brzini vala.

Transmisija predstavlja valnu deformaciju koja nastaje kada se valna energija djelomično propušta ispod ili iznad prepreke, koja je djelomično izdignuta iznad dna ili potopljena, ili kroz prepreku koja je u nekom postotku izbušena otvorima.

Lom vala i transmisija nisu obuhvaćeni u ovom radu.

### 2.3. Refleksija

Deformacija vala koji nailazi na vertikalnu ili nagnutu prepreku može rezultirati potpunom ili djelomičnom refleksijom, ovisno o koeficijentu refleksije  $K_{\text{refl}}$ . Refleksija se javlja čim dno nije potpuno horizontalno, no za vjetrovne valove kraćih perioda ta refleksija je uglavnom zanemariva na tipičnim obalnim nagibima. Svaka podmorska nepravilnost, poput hridi ili podmorskih konstrukcija, uzrokovat će refleksiju određene količine valne energije. Ova refleksija često djeluje nakon svih prethodnih transformacija valova i ima kombinirani učinak sa samim lomom vala. Na konstrukcijama se refleksija često pojavljuje zajedno s transmisijom, ovisno o propusnosti same konstrukcije.



Slika 2. 3 Refleksija

Valovi normalno usmjereni prema čvrstim okomitim granicama reflektiraju se tako da reflektirani val ima istu fazu, ali suprotan smjer i otprilike istu amplitudu kao upadni val. Ovo ispunjava uvjet da je horizontalna brzina uvijek nula, što rezultira stvaranjem stojnog vala.

## Stojni valovi

Jednadžba stojnog vala može se dobiti zbrajanjem upadnog i reflektiranog vala:

$$s = H_s \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

3

gdje je  $H_s = H_i$  ( valna visina incidentnog vala) =  $H_r$ (valna visina reflektiranog vala),  $L$  je valna duljina,  $T$  je period vala,  $x$  i  $t$  su prostorna i vremenska koordinata.

Na čvorištima nema vertikalnog gibanja, dok se na točkama najveće oscilacije izmjenjuju vrhovi i doline.

Na čvorištima nema vertikalnog gibanja, dok se na točkama najveće oscilacije izmjenjuju vrhovi i doline. Veliki valovi u plitkoj vodi mogu uzrokovati spektakularne sudare vrhova, formirajući plimni fenomen poznat kao klapotis.

## Klapotis Gaufre

Kada je upadni val pod kutom  $\Theta$  u odnosu na normalu, reflektirani val će biti pod kutom  $\Theta$  na suprotnoj strani. Ovo stvara složeni dijamantni uzorak vrhova otoka koji se kreću paralelno s granicom, poznat kao klapotis gaufre. Ova pojava može uzrokovati značajnu eroziju i transport sedimenta.

**Koeficijent refleksije  $K_{refl}$**  definiran je kao omjer visine reflektiranog vala prema visini upadnog vala:

- Betonski morski zidovi:  $K_{refl} = 0.7 - 1.0$
- Kameni lukobrani:  $K_{refl} = 0.2 - 0.7$
- Plaže:  $K_{refl} = 0.05 - 0.2$

Reflektirana energija vala proporcionalna je kvadratu koeficijenta refleksije  $K_{refl}^2$ .

**Iribarrenov broj** koristi se za izračunavanje koeficijenta refleksije:

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H/L_p}}$$

4

gdje je  $\xi$  oznaka za Iribarrenov broj,  $\beta$  je kut nagiba,  $H$  je visina vala i  $L_0$  je duljina dubokovodnog vala.

$$K_r = 0.125 + 0.7\sqrt{\xi}$$

5

Općenita formula za visinu reflektiranog vala koristi koeficijent refleksije  $K_{refl}$  kako bi se izračunala visina vala nakon refleksije. Temelji se na pretpostavci da je refleksija vala linearna i da se očuvanje energije primjenjuje na reflektirane valove. Koeficijent refleksije predstavlja omjer visine reflektiranog vala prema visini incidentnog vala te se određuje eksperimentalno ili numerički uzimajući u obzir karakteristike vala i površine prepreke

## 2.4. Uplićavanje

Direktna funkcija smanjenja dubine počinje djelovati čim val uđe u prijelaznu zonu (srednje more, kada je omjer dubine vode  $D$  i valne duljine  $L$  manji od  $1/2$ ), i traje sve do potpunog urušavanja ili loma vala pri dodiru s obalom.



Slika 2. 4 Uplićavanje valova zajedno sa refleksijom

Kada val pod kutom od nula stupnjeva nailazi na obalnu crtu, cjelokupna valna energija prenosi se prema obali, bez horizontalnog toka energije (u smjeru y-osi). Ovo znači da nema promjene energije u smjeru valne propagacije. Ovaj fenomen opisuje se jednadžbom očuvanja protoka energije, gdje je protok energije (snaga) vala konstantan bez obzira na udaljenost grebena vala od obale.

$$Ec_g = \underbrace{n}_{n=c_{g0}/c} \cdot cE = konst. \quad \longrightarrow \quad \frac{P}{P_0} = 1 = \frac{Ec_g}{Ec_{g0}}$$

$n=c_{g0}/c$  - omjer brzine grupe valova i brzine jednog vala

6

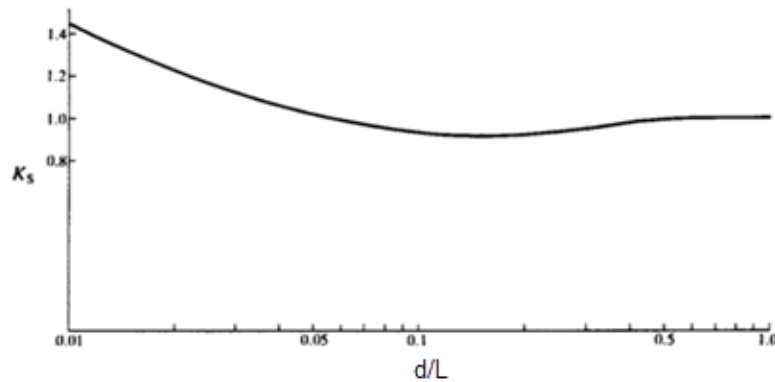
U općem slučaju H na bilo kojoj dubini moguće je dobiti iz:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0}{n} \frac{C_0}{C}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{1}{\tanh kd}} = \frac{H}{H'_0} = K_s$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd) \quad L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) = \frac{gT}{\omega} \tanh(kd)$$

7

**Koeficijent uplićavanja** (označen kao  $K_s$ ) definira se kao omjer valne visine  $H_0$  za upadni kut zrake vala pod normalom na obalu od nula stupnjeva. U zoni dubokog mora, gdje dno nema značajan utjecaj na valne parametre, koeficijent uplićavanja uzima jediničnu vrijednost. Koeficijent uplićavanja opada sa smanjenjem relativne dubine do vrijednosti od 0.91, a zatim raste do beskonačnosti kako dubina mora teži nuli.



Slika 2. 5 Odnos relativne dubine ( $d/L$ ) i koeficijenta uplićavanja ( $K_s$ ).

## 2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja refleksije

Refleksija valova igra ključnu ulogu u različitim inženjerskim i prirodnim kontekstima. Važno je razumjeti kako se valovi reflektiraju od različitih obala, hridi ili konstrukcija jer to može značajno utjecati na **stabilnost obala, zaštitu obalnih infrastruktura od erozije**, kao i na dizajn morskih struktura kao što su lukobrani, morski zidovi i dokovi.

Pravilna procjena utjecaja refleksije nužna je u planiranju i projektiranju obalne zaštite i infrastrukture. Na primjer, kod izgradnje morskih zidova ili lukobrana, važno je predvidjeti koliko će se valna energija reflektirati natrag prema moru jer to može utjecati na **stabilnost i dugovječnost građevina**. Visokokvalitetna procjena refleksije također pomaže u optimizaciji dizajna konstrukcija kako bi se smanjili potencijalni rizici od šteta ili gubitka stabilnosti i funkcionalnosti uslijed djelovanja valova.

U geološkom kontekstu, refleksija valova može biti ključna za razumijevanje **oblikovanja obalnog reljefa i transporta sedimenta**. Studije refleksije pomažu znanstvenicima i inženjerima u analizi promjena obalnih morfologija, što je važno za **održavanje ekološke ravnoteže i zaštite priobalnih ekosustava**.

Stoga, temeljita procjena utjecaja refleksije valova nije samo teorijski izazov već praktična nužnost za održivo upravljanje priobalnim i morskim područjima, osiguravajući njihovu dugoročnu stabilnost i zaštitu.



## 2.6. Primjena i važnost procjene utjecaja uplićavanja

**Uplicavanje valova** predstavlja ključni fenomen u inženjerskim i prirodnim kontekstima koji zahtijeva pažljivu procjenu i razumijevanje. Ovaj proces nastaje kada valovi ulaze u plići dio vode ili kada se susreću s nepravilnostima na obali ili podvodnim strukturama. Razumijevanje uplicavanja valova ključno je za planiranje i projektiranje obalne zaštite te infrastrukture poput luka i pristaništa.

U kontekstu **obalnog inženjerstva**, razumijevanje kako valovi ulaze u plići dio mora ili se prelamaju oko struktura poput hridi ili obalnih konstrukcija omogućuje inženjerima da predvide promjene u energiji valova i njihov utjecaj na obalu. To je osobito važno prilikom gradnje zaštitnih struktura poput gatova ili nasipa kako bi se minimizirali rizici od erozije obale i oštećenja obalnih infrastrukture.

U **geološkom smislu**, uplicavanje valova može utjecati na transport sedimenta i oblikovanje priobalnog reljefa. Studije ovog fenomena pomažu u razumijevanju kakvu interakciju imaju valovi s obalom i okolnim podvodnim strukturama te pružaju uvid u dinamiku prirodnih procesa na obalnim područjima.

Stoga, detaljno razumijevanje uplicavanja valova ključno je za održivo upravljanje obalnim područjima, pridonoseći dugoročnoj stabilnosti i zaštiti priobalnog okoliša te podržavajući razvoj održivih inženjerskih rješenja za zaštitu obala i infrastrukture.

### 3. FIZIKALNI MODEL ZA REFLEKSIJU I UPLIĆAVANJE

#### 3.1. Osnove fizikalnih modela



*Slika 3.1 Bazen za fizikalni model*

Fizikalni modeli su smanjeni prikazi stvarnih sustava koji se koriste za proučavanje specifičnih fenomena u kontroliranim uvjetima. U kontekstu analize morskih valova, fizikalni modeli omogućuju istraživanje refleksije i uplićavanja valova kada se susreću s obalom. Ovi modeli pomažu u razumijevanju složenih interakcija između valova i obalnih struktura, što je od ključne važnosti za inženjerske i okolišne studije.

Izrada fizikalnog modela temelji se na nekoliko ključnih principa. Prvi je geometrijska sličnost, što znači da modeli moraju zadržati proporcionalne dimenzije u odnosu na stvarni sustav. Drugi princip je dinamička sličnost, koja osigurava da su sile koje djeluju u modelu proporcionalne silama u stvarnom sustavu. To uključuje sličnost u pogledu valne visine, perioda i brzine. Treći princip je materijalna sličnost, pri čemu materijali korišteni u modelu trebaju imati slična svojstva kao materijali u stvarnom okruženju, posebno u pogledu težine i elastičnosti.

Provođenje eksperimenata započinje pripremom modela, postavljanjem modela obale u bazen za testiranje te osiguravanjem stabilnosti modela i pravilne kalibracije senzora. Zatim se koristeći

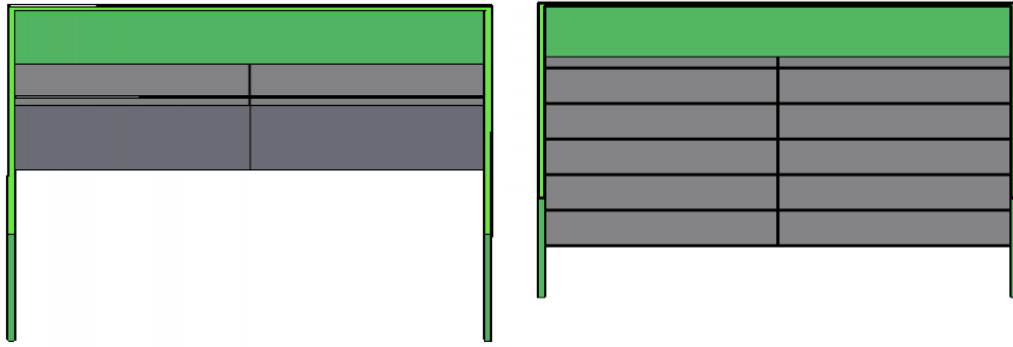
valni generator stvaraju valovi s različitim karakteristikama, pri čemu se svaki eksperiment ponavlja nekoliko puta kako bi se osigurala ponovljivost rezultata. Elektro-otporni senzor bilježi promjenu napona uzrokovanu promjenom razine vode u različitim točkama, posebno u područjima gdje se očekuje refleksija i uplićavanje, a podaci se bilježe za daljnju analizu. Na osnovu vremenskog zapisa razine vode u bazenu (u točki koja odgovara stanju dubokog mora), FFT (engl. fast fourier transformation) metodom je izračunat spektar vala iz kojeg se odredio pripadajući period za frekvenciju kojoj odgovara najveća snaga spektra (korelirano s amplitudom vala). Početna visina vala je određena zero-up metodom iz spomenutog vremenskog prikaza promjene razine vode.

Analiza podataka uključuje vizualizaciju, gdje se kreiraju grafovi i dijagrami koji prikazuju visinu valova u različitim točkama. Ovi grafovi se uspoređuju s rezultatima numeričkih modela i grafo-analitičkih metoda. Usporedba rezultata omogućuje identifikaciju odstupanja i analizu mogućih razloga za ta odstupanja. Na temelju analize podataka donose se zaključci o učinkovitosti fizikalnog modela u repliciranju stvarnih uvjeta, te se diskutira o prednostima i ograničenjima korištenja fizikalnih modela u odnosu na druge metode.

### 3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela

Za izradu fizikalnog modela i provođenje eksperimenata korišteni su različiti materijali i uređaji koji su ključni za preciznu simulaciju refleksije i uplićavanja valova na obali. Svaki materijal i uređaj ima specifičnu ulogu u postizanju točnih i ponovljivih rezultata.

Makete obale nacrtane su u Autocad-u (Slika 3.), nakon čega su izrađene pomoću 3D printera (Slika 3.). 3D printer omogućava izradu preciznih i složenih geometrijskih oblika koji repliciraju stvarne obalne strukture. Nakon izrade, makete su napunjene cementnom pastom kako bi se postigla potrebna čvrstoća i stabilnost. Punilo je odabrano zbog svojih svojstava poput velike gustoće i otpornosti na vodu, što osigurava da makete ostanu nepromijenjene tijekom eksperimenta i pružaju realne uvjete za interakciju s valovima.



*Slika 3.2 3D modeli obalnih maketa u Autocad-u za fizikalni model ispitivanja refleksije i uplićavanja*



*Slika 3.3 Isprintani 3D modeli*

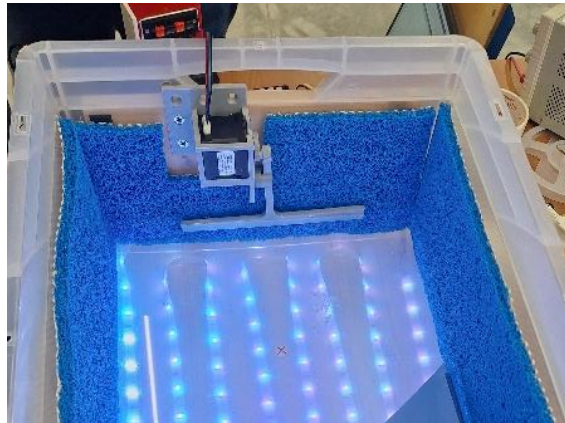
Za generiranje valova korištena je, također 3D isprintana, lopatica koju pokreće mali elektromotor. Elektromotor omogućava kontrolirano i kontinuirano stvaranje valova s različitim karakteristikama, kao što su visina i period. Korištenjem elektromotora osigurava se konzistentnost eksperimentalnih uvjeta, što je ključno za usporedbu rezultata između različitih eksperimenata.

Plastična kutija dimenzija 40x60 cm služila je kao bazen za testiranje. Ova kutija pruža dovoljno prostora za postavljanje modela obale i generiranje valova. Plastika je odabrana zbog svoje

vodootpornosti i pristupačnosti, što omogućava jednostavno postavljanje i prilagodbu eksperimentalnog postava.

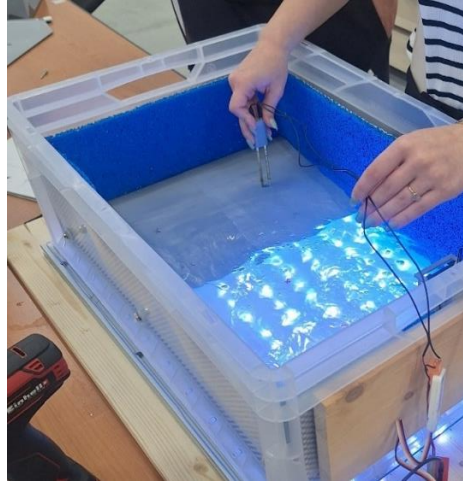
Unutrašnjost bazena okružena je spužvom kako bi se smanjilo reflektiranje valova od zidova bazena. Spužva apsorbira energiju valova, čime se smanjuje njihova refleksija i omogućava preciznije mjerenje valova. Ovo osigurava da izmjereni podaci točnije odražavaju interakciju valova s modelom obale, a ne interferenciju od zidova bazena.

LED svjetla postavljena ispod kutije osigurala su odgovarajuću iluminaciju za vizualno praćenje eksperimenta i snimanje rezultata. LED svjetla pružaju ravnomjernu i intenzivnu svjetlost koja omogućava jasno promatranje valova i njihove interakcije s modelom obale.



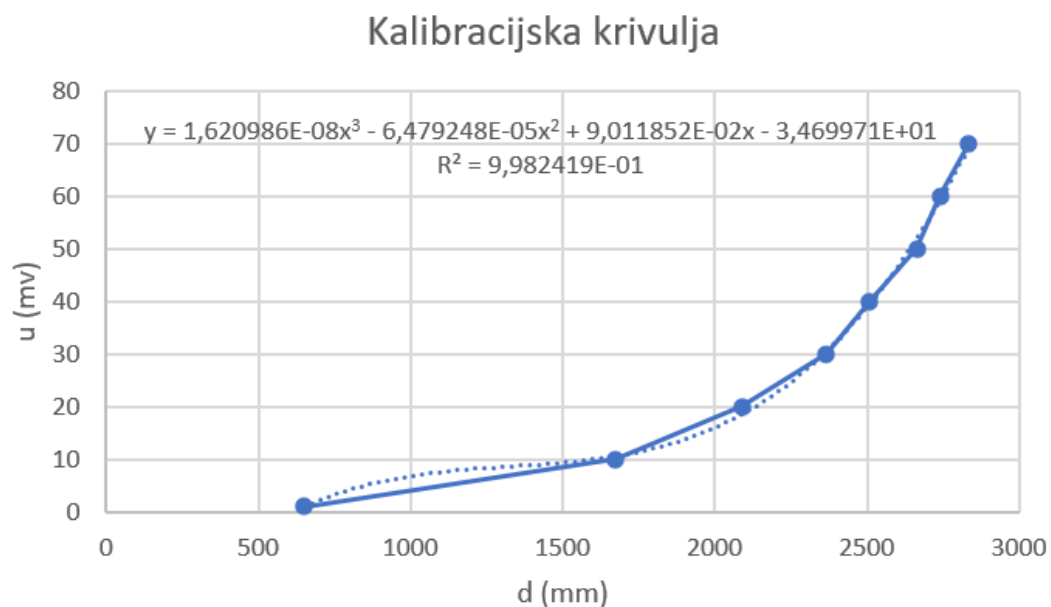
*Slika 3.4 Prikaz bazena s korištenom lopaticom, spužvom, elektromotorom i LED svjetlima*

Za indirektno mjerenje visine valova korištena je elektro-otporni senzor na bazi dvije elektrode koji precizno detektira promjenu pada napona uslijed promjene razine vode u bazenu (primjer mjerenja na Slici 3.9). Kako bi se dobila direktna veza između navedenog pada napona i promjene razine vode, izvršen je postupak kalibracije na način da je u poznatoj mirnoj posudi za različite razine vode mjeren pad napona.



Slika 3.5 Prikaz mjerenja razine vode pomoću elektro-otpornog senzora

Zatim se izvršila korelacija izmjerenog pada napona ( $u$  (milivolti)) i vizualno mjerene dubine vode ( $d$  (milimetri)) da bi se izračunala kalibracijska krivulja (**Pogreška! Izvor reference nije pronađen.**). Jednom ostvarena kalibracijska krivulja je dala direktno vezu za pretvorbu mjenog pada napona u dubinu vode.



Slika 3.3 Kalibracijska krivulja

Na osnovu tako izmjerenih podataka o razini vode za svaki od eksperimenata, određen je period iz spektra vala (npr. Slika 3.12 a)), te je za početnu visinu vala uzeta srednja vrijednost dobivena zero-up metodom iz vremenske serije podataka o razini vode (npr. Slika 3.12 b)).

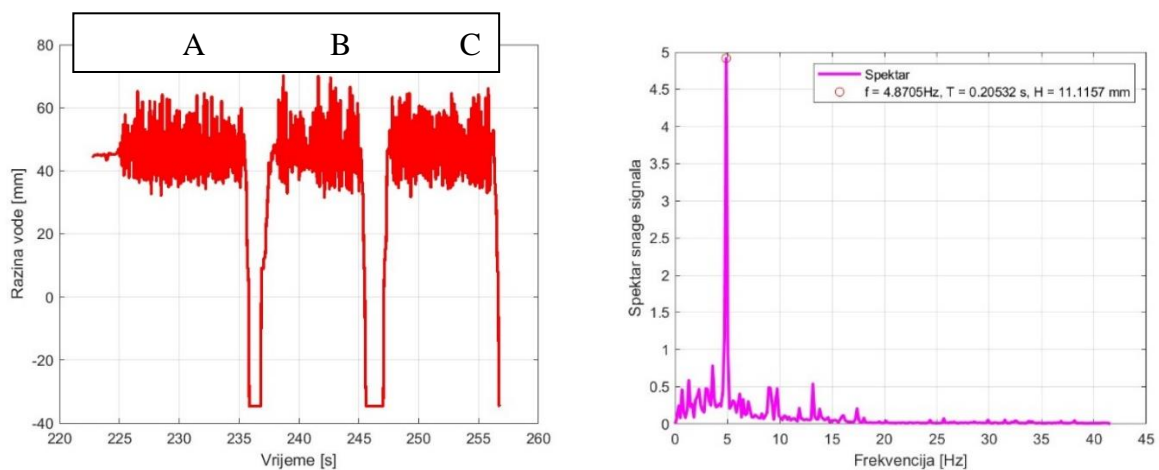
Ovi materijali i uređaji zajedno čine cjelovit sustav koji omogućava preciznu i ponovljivu simulaciju difrakcije i refleksije valova na obali, pružajući vrijedne podatke za daljnju analizu i usporedbu s numeričkim modelima.

### 3.3. Provedeni eksperiment za refleksiju i uplićavanje



Slika 3.4 Refleksija

Za svaku pojedinu valnu transformaciju, odnosno za refleksiju i za uplićavanje provedena su tri eksperimenta s tri različita podatka o frekvenciji rada elektromotora, tj. perioda okretaja elektromotora. Za primjer refleksije izmjerene su visine vala na šest različitih točaka (A, B, C) za različite periode okretaja  $T_{\text{motora}}$  0,17, 0,2 i 0,25 s.

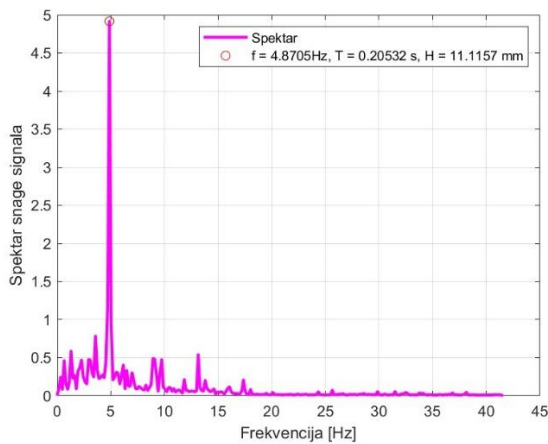


Slika 3.8 Eksperiment 1  $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$  za refleksiju

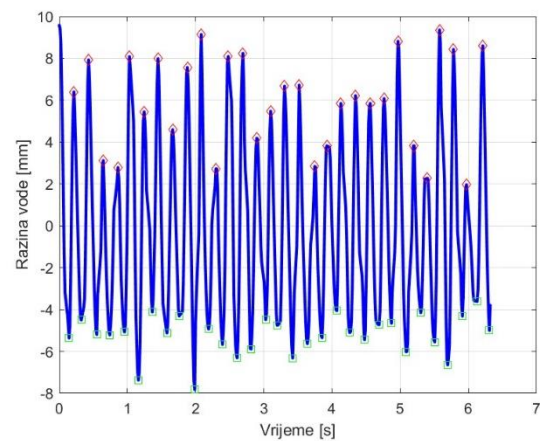


Podaci su uzeti iz točke A i analizirani su kako bi se dobili ključni parametri dubokovodnog vala. Spektralnom analizom signala (Slika 3.), određena je dominantna frekvencija vala  $f = 4.8705$  Hz., period vala je izračunat kao  $\frac{1}{f} = T = 0.20532$  s, a visina vala  $H$  procijenjena kao srednja vrijednost iz zapisa (zero-up metodom) i iznosi 11.1157 mm. Ove analize su ključne za razumijevanje ponašanja vala u kontroliranim uvjetima bazena.

a)

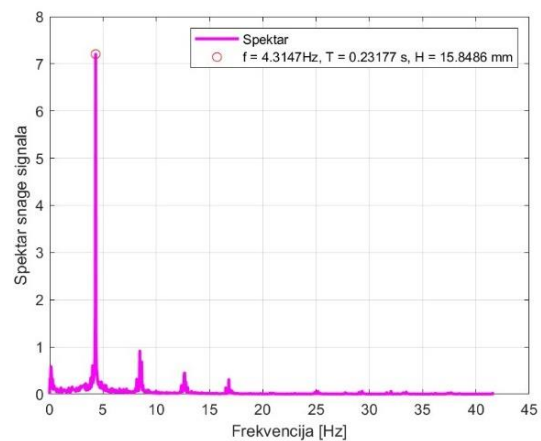
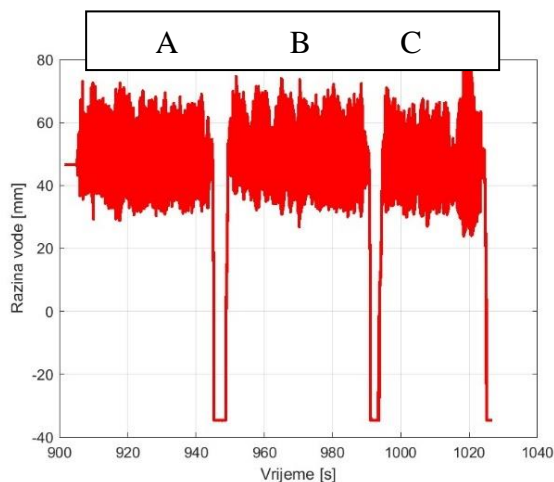


b)



Slika 3.9 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17s$  a) Spektar b) Prebrojani valovi zero-up metodom

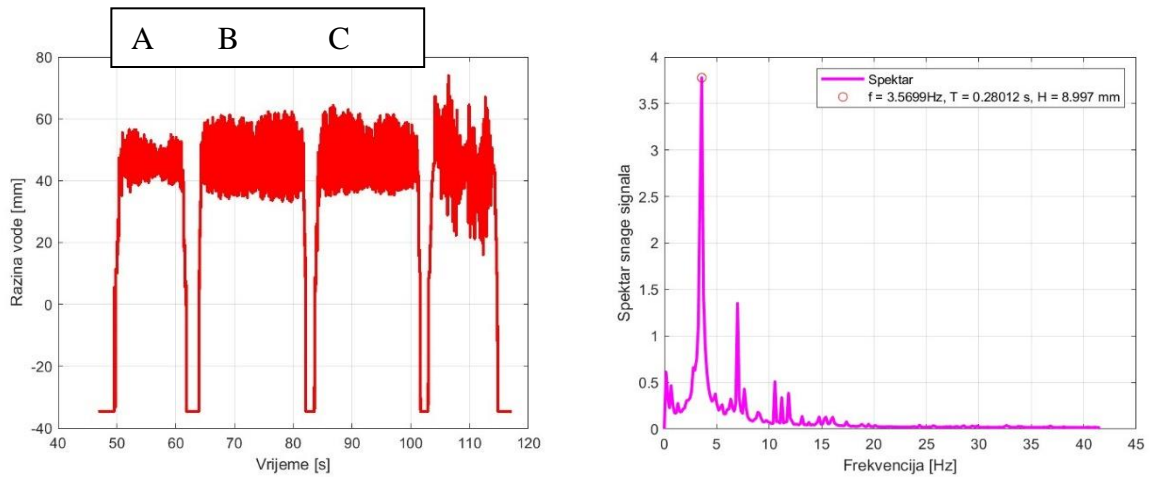
U drugom eksperimentu gdje je period okretaja motora  $T_{motora} = 0.2$  s, spektralnom analizom i zero-up metodom dobiveno je :  $f = 4.3147$  Hz,  $T = 0.23177$  s i  $H = 15.8486$  mm (Slika 3.).



Slika 3.10 Eksperiment 2  $T_{motora}=0.2$  s za refleksiju

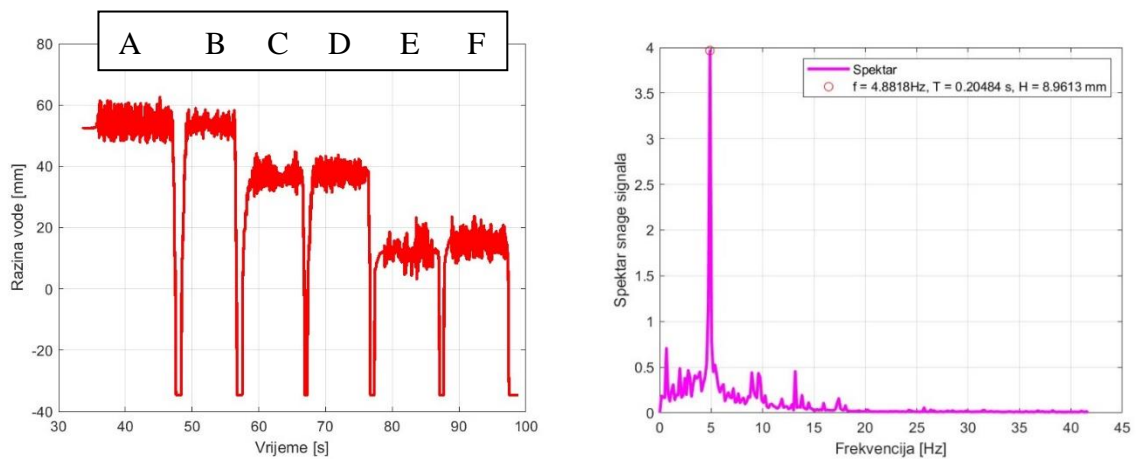


Treća analiza pokazala je sljedeće rezultate:  $f = 3.5761 \text{ Hz}$  ,  $T = 0.27963 \text{ s}$  i  $H = 11.7431 \text{ mm}$  (Slika 3.)

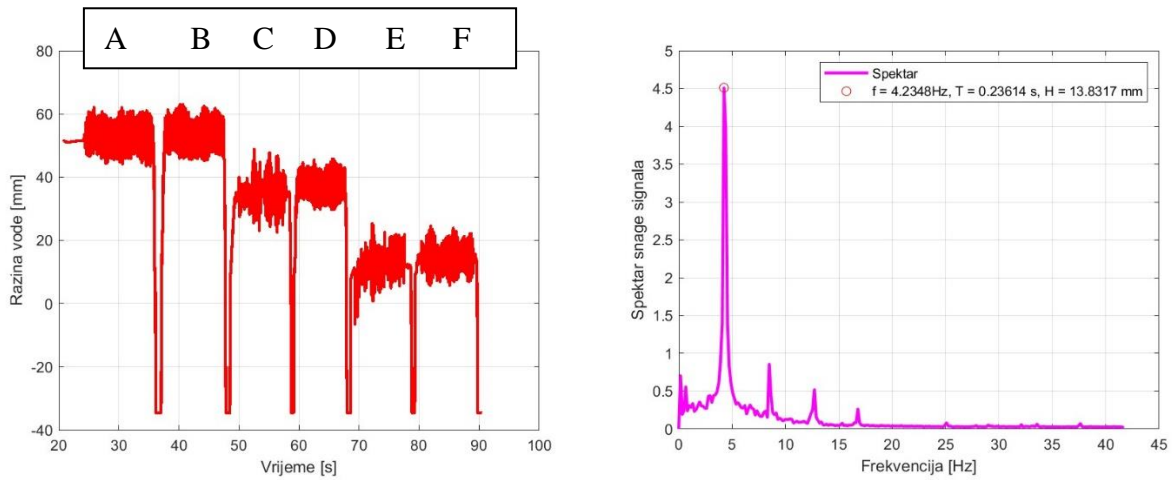
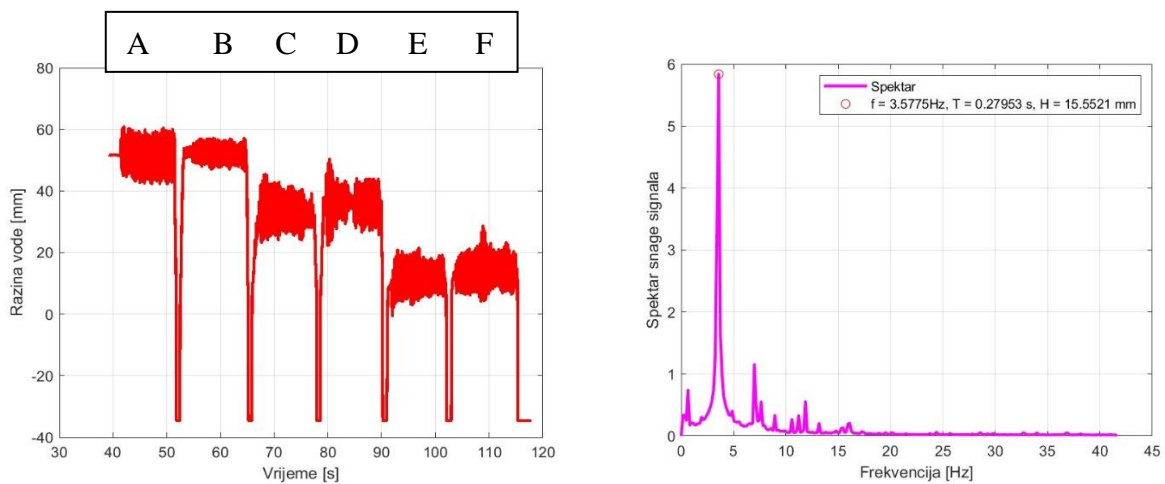


Slika 3.5 Eksperiment 3  $T_{motora}=0.25 \text{ s}$

Za uplićavanje je izveden isti postupak određivanja spektra da bi se dobili ključni parametri vala.



Slika 3.6 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17 \text{ s}$  za uplićavanje

Slika 3.7 Eksperiment 2  $T_{motora}=0.2s$ Slika 3.14 Eksperiment 3  $T_{motora}=0.25s$ 

### 3.4. Ograničenja fizikalnog modela

Korištenje fizikalnih modela za simulaciju morskih valova i obalnih struktura nosi sa sobom određena ograničenja koja treba uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata. Ta ograničenja proizlaze iz razlike između modela i stvarnog svijeta te kompleksnosti morskih i obalnih procesa. U nastavku su navedeni neki od problema na koje smo naišli tijekom izrade i korištenja fizikalnog modela.

### **Nedovoljna duljina bazena**

Plastični bazen korišten za simulaciju nije bio dovoljno dug da bi se valovi mogli potpuno razviti. U stvarnim uvjetima, valovi imaju dovoljno prostora da se formiraju i razvijaju, dok je u ograničenom prostoru bazena taj proces skraćen i ne odražava stvarne morske valove. To ograničenje utječe na preciznost rezultata, jer se valovi ne mogu razviti na isti način kao u prirodnom okruženju.

### **Optimalna razina vode**

Pronalazak optimalne razine vode bio je ključan kako bi se valovi uopće mogli stvoriti. Ako razina vode nije odgovarajuća, valovi ne mogu doseći potrebnu visinu i energiju, što utječe na preciznost simulacije. Ovaj problem ukazuje na važnost pažljivog kalibriranja uvjeta u fizikalnom modelu kako bi se osigurala što vjernija reprodukcija stvarnih uvjeta.

### **Montaža lopatice za stvaranje valova**

Lopatica koja je pomoću motora stvarala valove bila je montirana preduboko, što je uzrokovalo prevelik otpor vode i učestalo ispadanje lopatice. Potrebno je bilo postaviti lopaticu tako da ne zaranja cijela, kako bi se smanjio otpor i osigurala stabilnost uređaja. Ovo ograničenje ističe važnost precizne montaže i podešavanja komponenata modela kako bi se postigla stabilnost i točnost simulacije.

### **Refleksija valova od stijenki bazena**

Stijenke bazena su stvarale veliku refleksiju valova, što je ometalo točnost simulacije. Refleksija valova može stvoriti interferenciju koja mijenja karakteristike valova u bazenu. Da bismo smanjili ovaj efekt, stijenke bazena smo obložili spužvom koja apsorbira energiju valova i smanjuje refleksiju. Ovaj problem naglašava potrebu za minimiziranjem umjetnih utjecaja unutar modela koji mogu iskriviti rezultate.

### **Problemi s uzgonom i stabilnošću obalne strukture**

3D printana obala ispunjena betonom isplivala je zbog uzgona vode u bazenu. Kako bi obalna struktura ostala stabilna, morali smo je dodatno opteretiti utezima. Ovaj problem ukazuje na

izazove vezane uz uzgon i stabilnost struktura u simulacijama, te potrebu za pažljivim dizajniranjem i testiranjem modela kako bi se osigurala njihova stabilnost.

## **Zaključak**

Korištenje fizikalnih modela za simulaciju morskih valova i obalnih struktura je korisno, ali nosi sa sobom određena ograničenja. Razlike između modela i stvarnog svijeta te kompleksnost morskih i obalnih procesa zahtijevaju pažljivo kalibriranje i prilagodbu modela kako bi se postigla što vjernija reprodukcija stvarnih uvjeta. Problemi poput nedovoljne duljine bazena, potrebe za optimalnom razinom vode, montaže lopatice, refleksije valova od stijenki bazena te uzgona i stabilnosti obalne strukture, ističu izazove s kojima se suočavamo pri korištenju fizikalnih modela. Ove izazove treba uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata kako bi se osigurala što točnija predviđanja i razumijevanje morskih i obalnih procesa.

## **4. NUMERIČKI I MODEL TRANSFORMACIJA VALNOG POLJA**

### **4.1. Osnove numeričkog modela**

Stvaranje numeričkog modela za analizu transformacije valnog polja na različitim vrstama obala u MATLAB-u zahtijeva pažljivo planiranje i implementaciju. U ovom radu je korišten numerički model isprogramiran u MATLAB-u, gdje se diferencijalna jednačba zrake vala rješava metodom numeričke integracije (mješoviti postupak) na području diskretiziranom mrežom konačnih trokutastih elemenata.

Ključni aspekti uključuju definiranje prostorne domene modela kroz podjelu prostora u smjerovima  $x$  i  $y$ , što omogućuje numeričko rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi koje koje opisuju zraku vala. Također se uzimaju u obzir rubni uvjeti koji simuliraju interakciju valova s obalom ili drugim preprekama, te početni uvjeti koji uključuju visinu vala u dubokom moru, period, kut nailaska vala i broj zraka koje se žele simulirati.

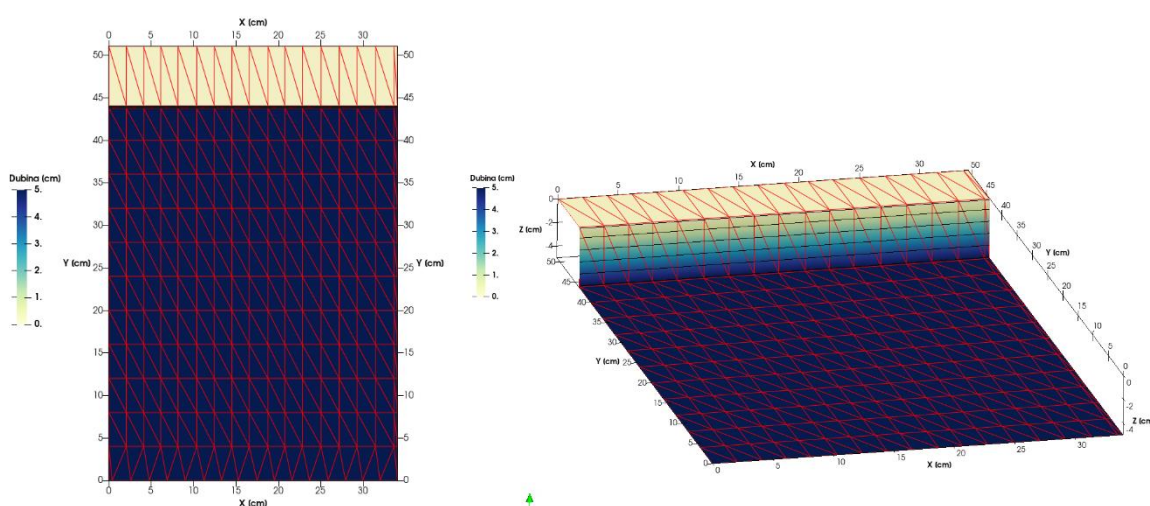
Numeričko rješavanje često se provodi korištenjem konačnih razlika, konačnih elemenata ili sličnih tehnika prilagođenih za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Rezultati modela

se vizualiziraju kako bi se bolje razumjela transformacija valnog polja, uključujući visinu i oblik valova u određenom vremenskom intervalu.

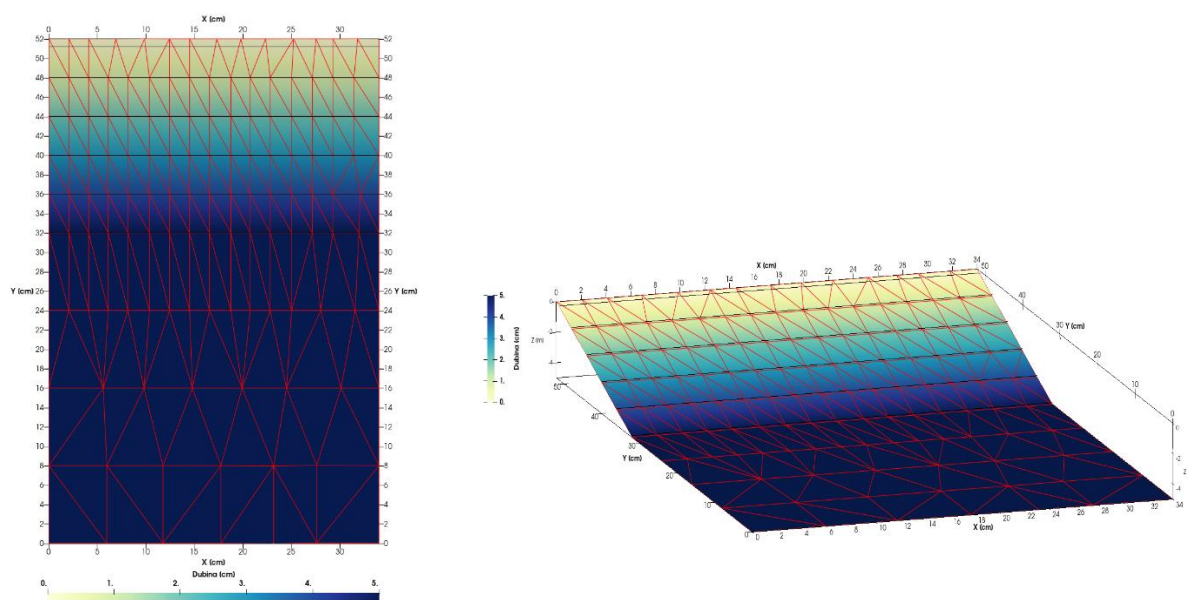
Analiza dobivenih rezultata omogućuje razumijevanje utjecaja različitih parametara, kao što su oblik obale i visina vala, na formiranje valnih polja. Ovi modeli su od velike važnosti za inženjerske studije koje se bave zaštitom obala, hidroelektranama, sigurnošću plovidbe i drugim područjima gdje je predviđanje ponašanja valova u različitim okolišnim uvjetima ključno.

## 4.2. Postavke numeričkog modela za refleksiju i uplićavanje

Za izradu plana geometrije modela simulacije fenomena refleksije i uplićavanja koristi se mreža konačnih elemenata, gdje je morska površina prekrivena trokutastim elementima. Čvorovi elemenata leže na zadanim izobatama, a mreža je progušćena blizu obale zbog očekivanih značajnih transformacija vala. Za proračun refleksije koristi se mreža s 442 aktivnih elemenata i 252 čvora, dok mreža za uplićavanje ima 251 elementa i 138 čvora. Ulazni podaci uključuju geometriju područja, batimetriju te parametre vala u dubokom moru, kao što su značajna visina i pripadajući period vala. Diskretizacija obuhvaća i kopnene elemente koji se kasnije isključuju iz proračuna.



Slika 4.8 Mreža konačnih elemenata za refleksiju



Slika 4.2 Mreža konačnih elemenata za uplićavanje

Nakon što je adekvatno generirana mreža konačnih elemenata iz unesene geometrije (batimetrijska podloga), nužno je unijeti početne uvijete u obliku visine vala i perioda, koji su dobiveni gore opisanim postupkom iz rezultata mjerenja eksperimenata fizikalnim modelom (Tablica 4.1).

Tablica 4.1 Ulazni podaci - Uplićavanje

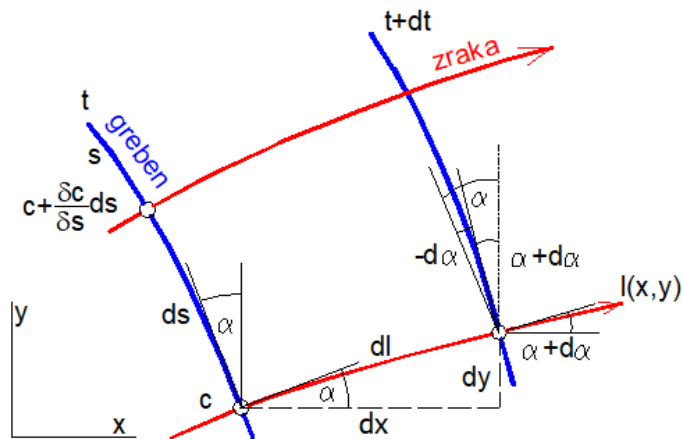
N	H (mm)	T (s)	T <sub>motora</sub> (S)
1	8.9613	0.20484	0.17
2	13.8317	0.23614	0.2
3	15.5521	0.27953	0.25

Tablica 4.2 Ulazni podaci - Refleksija

N	H (mm)	T (s)	T <sub>motora</sub> (S)
1	11,1157	0,20532	0.17
2	15,8486	0,23177	0.2
3	11,7431	0,27963	0.25

Tijekom simulacije, sustav prati kako se valovi šire kroz definiranu domenu tijekom vremena. Podaci o visini vala, brzini širenja i drugim parametrima se prikupljaju i analiziraju kako bi se razumjele refleksija i uplićavanje i njihov utjecaj na različite dijelove prostorne domene.

U ovom radu radi se o dubokom moru, gdje dno ne utječe na promjenu parametara vala, što znači da su parametri vala konstantne veličine označene s indeksom "0". Brzina vala također ne ovisi o dubini mora, već je konstantna i određena periodom vala. Zbog ovih karakteristika, valovi u dubokom moru su predvidljivi, a zrake valova su pravci jer sve točke duž grebena vala imaju istu brzinu širenja.



Slika 4.9 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru

### Jednadžba zrake vala u dubokom moru

Uzima se da je brzina točke vala  $c = c_0 = f(T) = \text{const}$ . Promjena položaja točke vala u vremenu  $dt$  se može iskazati idućim jednadžbama:

$$dl = c_0 \cdot dt$$

8

$$dx = c_0 \cdot \cos\alpha \cdot dt$$

9

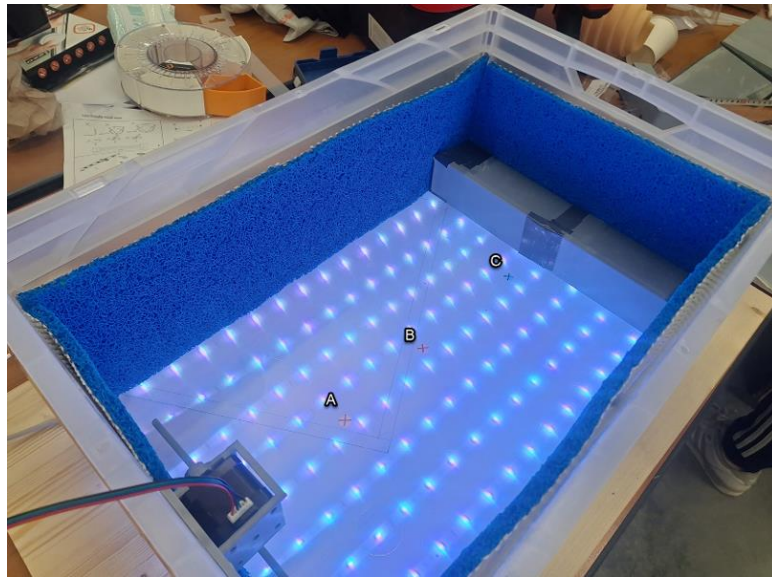
$$dy = c_0 \cdot \sin\alpha \cdot dt$$

10

## 5. REZULTATI I USPOREDBA

### 5.1. Refleksija

U laboratoriju su za refleksiju provedena tri ispitivanja različitih perioda  $T = 0.20532, 0.23177, 0.27963$  (s) i  $T_{\text{motora}} = 0.17, 0.2$  i  $0.25$  (s), za svako ispitivanje izmjerene su visine valova  $H$  u tri različite točke (Slika 5.).

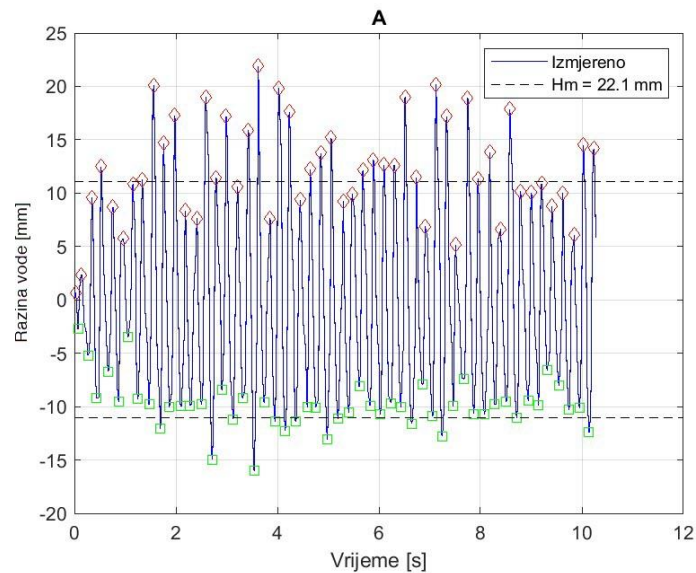


Slika 5.10 Točke mjerenja  $H$  za refleksiju

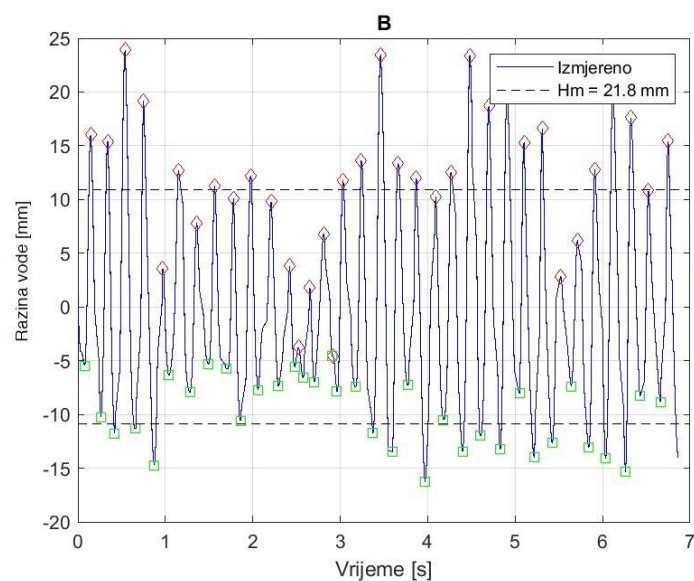


## EKSPERIMENT 1

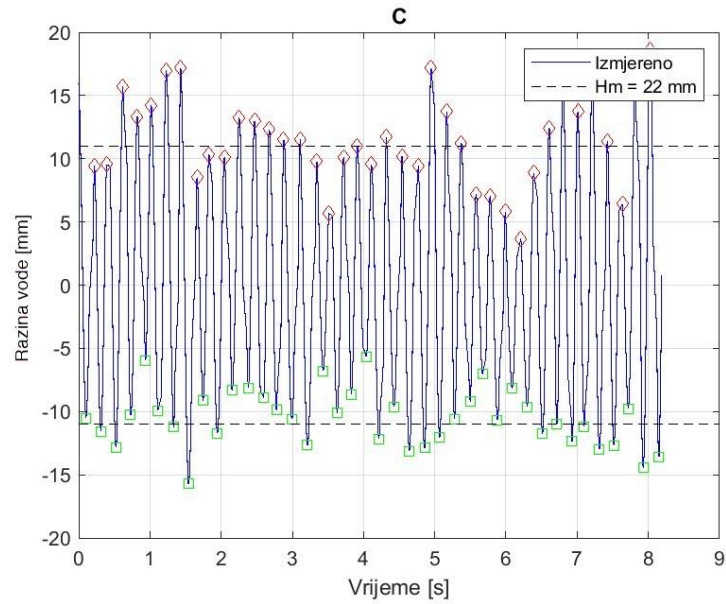
Prvi test u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.20532$  s (dobivenog analizom spektra vala u poglavlju 3.3). Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.2 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki A za eksperiment refleksije



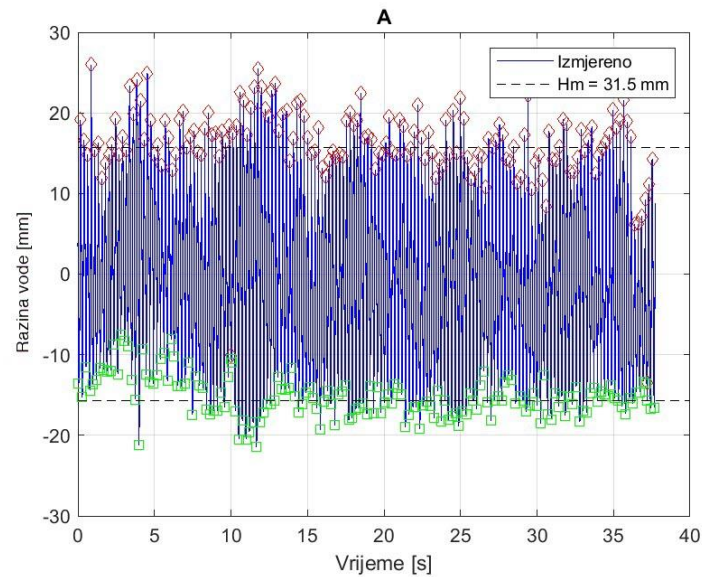
Slika 5.11 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije



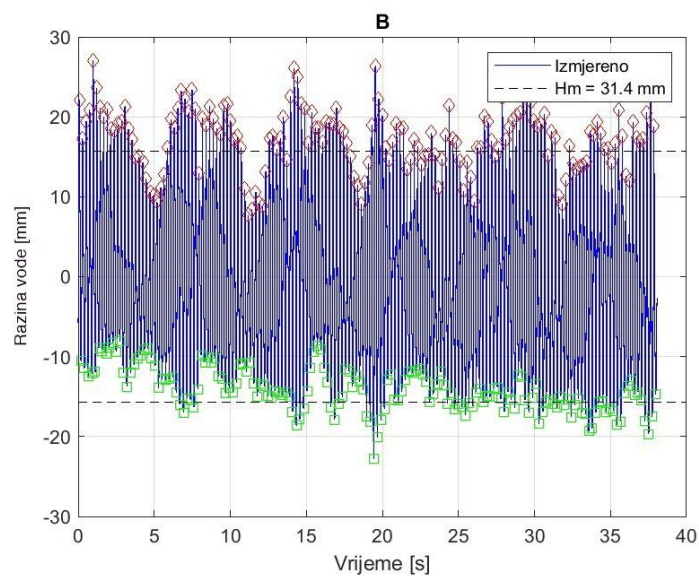
Slika 5.4 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije

**EKSPERIMENT 2**

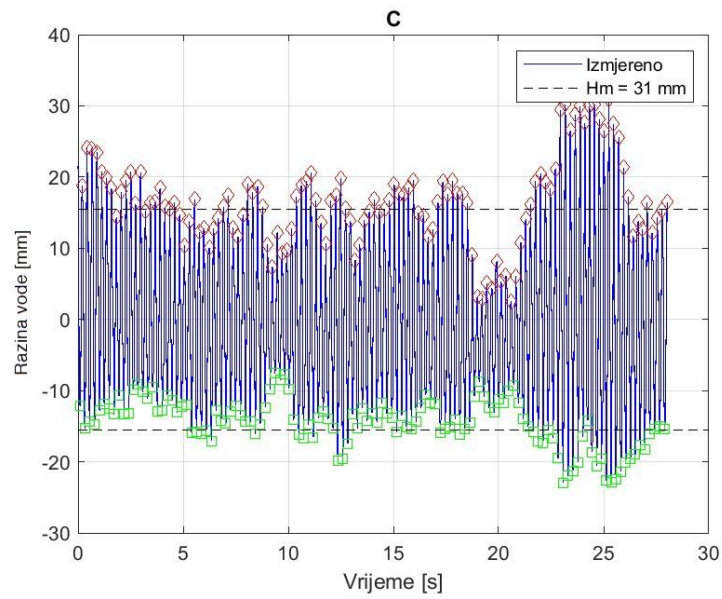
Za drugi test period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.23177$  s (dobivenog analizom spektra vala u poglavlju 3.3). Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.5 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki A za eksperiment refleksije



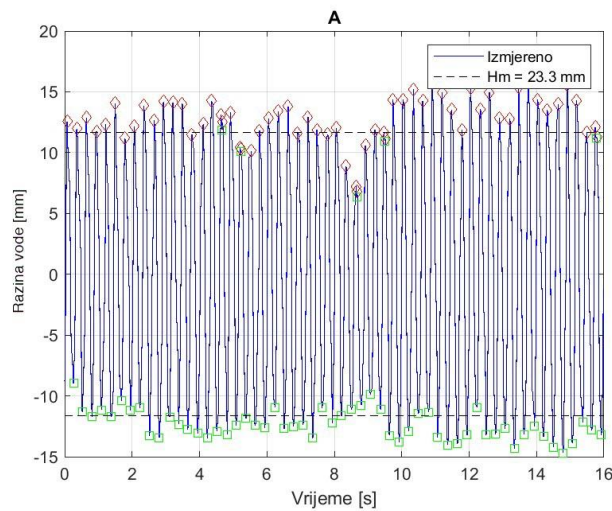
Slika 5.12 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije



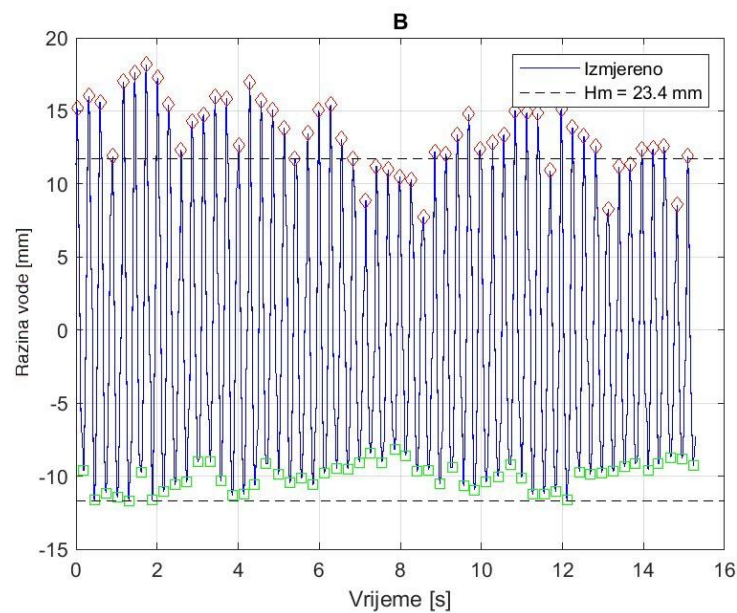
Slika 5.7 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije

**EKSPERIMENT 3**

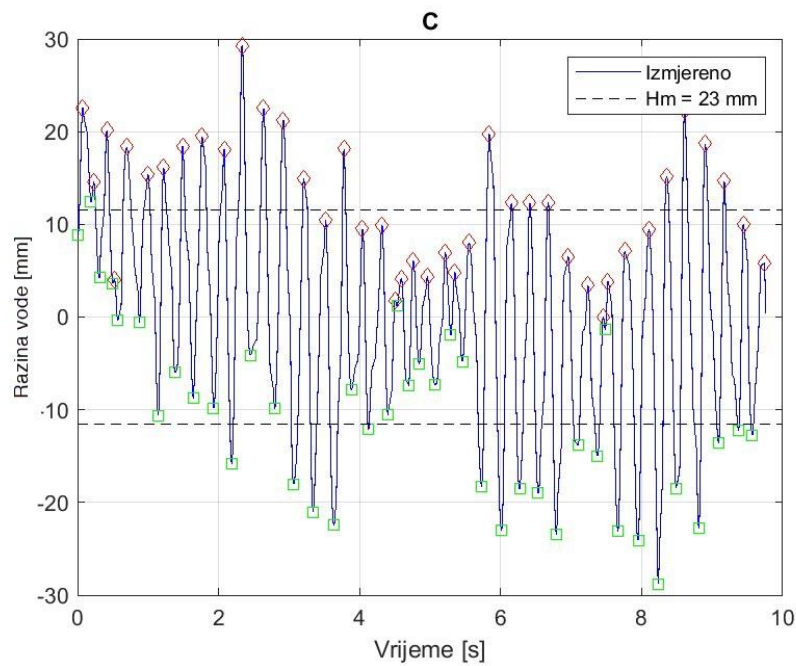
U trećem testu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.27963$  s (dobivenog analizom spektra vala u poglavlju 3.3). Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.13 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki A za eksperiment refleksije



Slika 5.9 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije

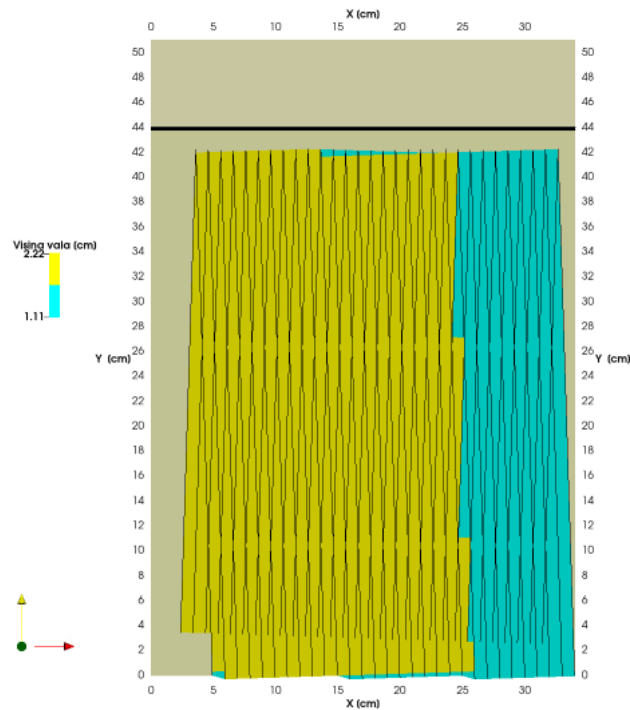


*Slika 5.10 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije*

Numerički model je dao rezultate prikazane u nastavku. Slučaj refleksije je imao specifičnu situaciju da je efektivno zbog kratkoće bazena stanje klapotisa bilo prisutno u većini valnog polja (dvostruka vrijednost početne visine vala).

**EKSPERIMENT 1**

Prvi test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.1157$  cm, odnosno  $H_0 = 11,12$  mm (Slika 5. ).

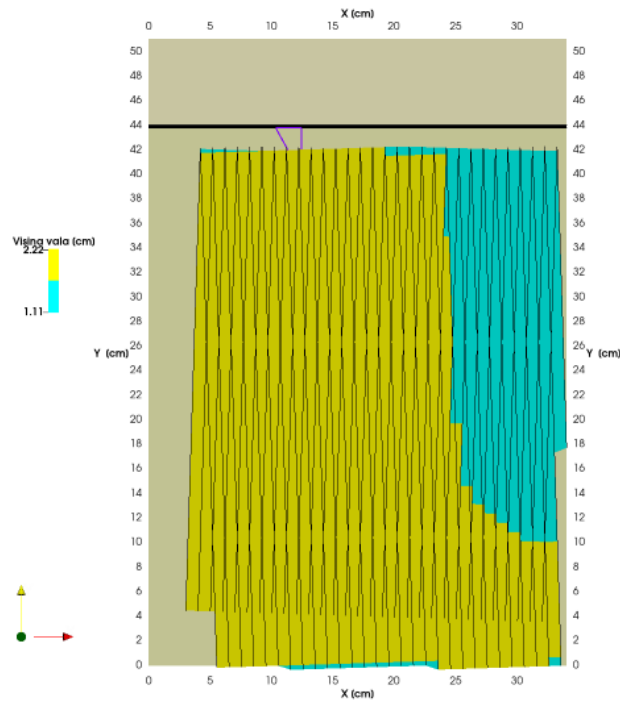


*Slika 5.11 Eksperiment 1, numerički model*

Visine vala u svim točkama su iste jer je isti  $K_{refl}$  i iznose  $H = 2.22$  cm, tj.  $H = 22.2$  mm, što odgovara dvostrukom iznosu početne visine vala. Plavo obojani dio je imao situaciju da nije došlo do potpune konstruktivne interferencije vala i ostala je samo vrijednost od 1.11 cm, odnosno početna visina vala.

**EKSPERIMENT 2**

Drugi test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.58486$  cm, odnosno  $H_0 = 15.85$  mm (Slika 5.).



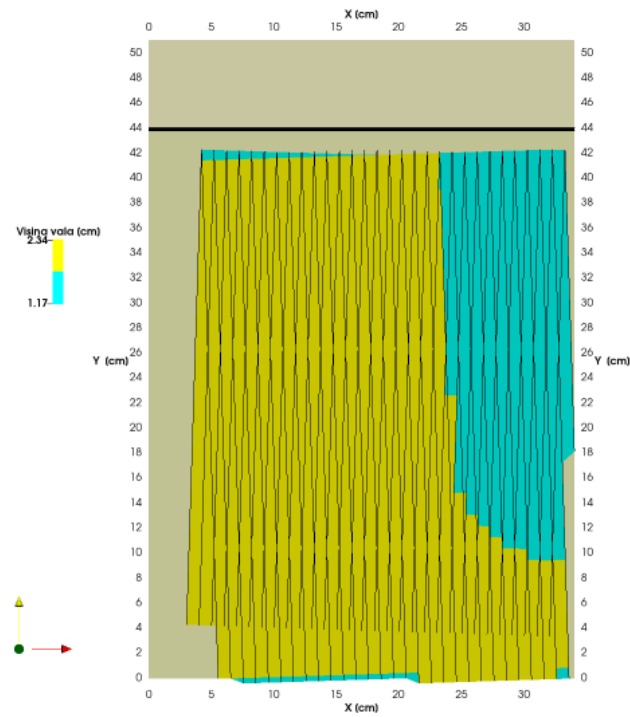
*Slika 5.12 Eksperiment 2, numerički model*

Visine vala u svim točkama su iste i iznose  $H = 3.17$  cm, tj.  $H = 31.7$  mm.



**EKSPERIMENT 3**

Treći test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.17431$  cm, odnosno  $H_0 = 11.74$  mm (Slika 5.).

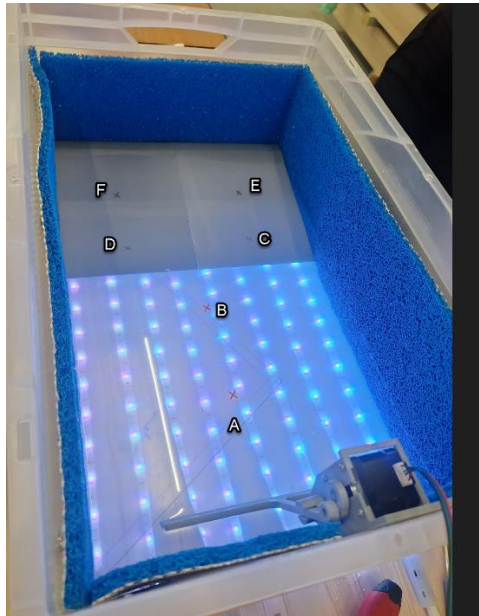


*Slika 5.13 Eksperiment 1, numerički model*

Dobivene su visine vala za sve točke  $H = 2.34$  cm, tj.  $H = 23.4$  mm.

## 5.2. Uplićavanje

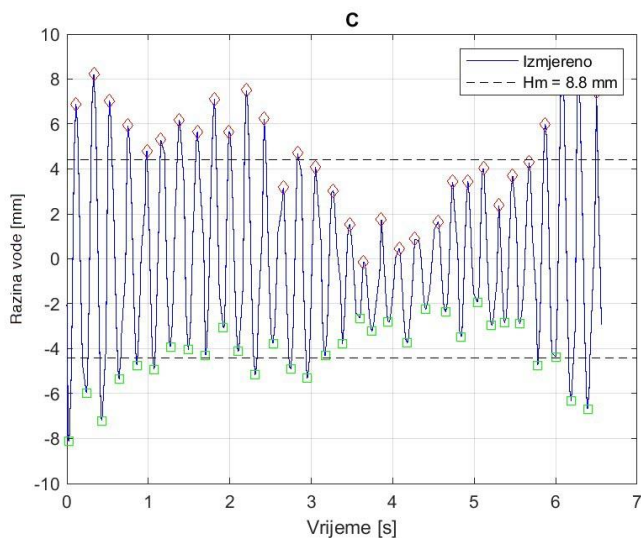
U laboratoriju su za uplićavanje provedena tri ispitivanja različitih perioda  $T = 0.20484, 0.23614, 0.27953$  (s) i  $T_{\text{motora}} = 0.17, 0.2$  i  $0.25$ , za svako ispitivanje indirektno su izmjerene visine valova  $H$  u tri različite točke (Slika 5.).



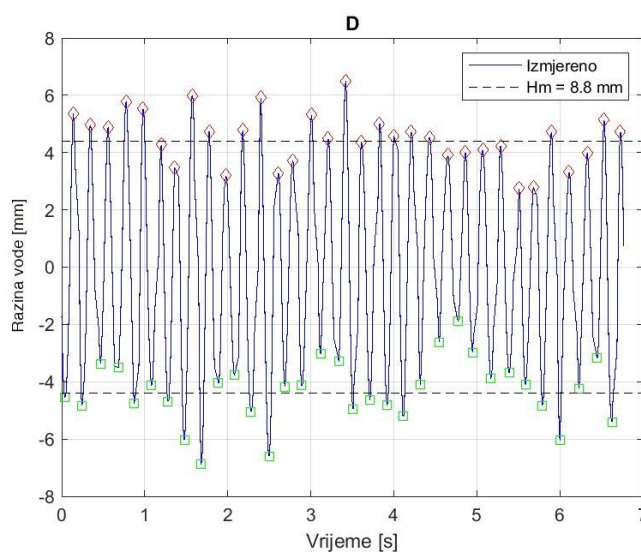
Slika 5.14 Točke mjerenja  $H$  za uplićavanje

## EKSPERIMENT 1

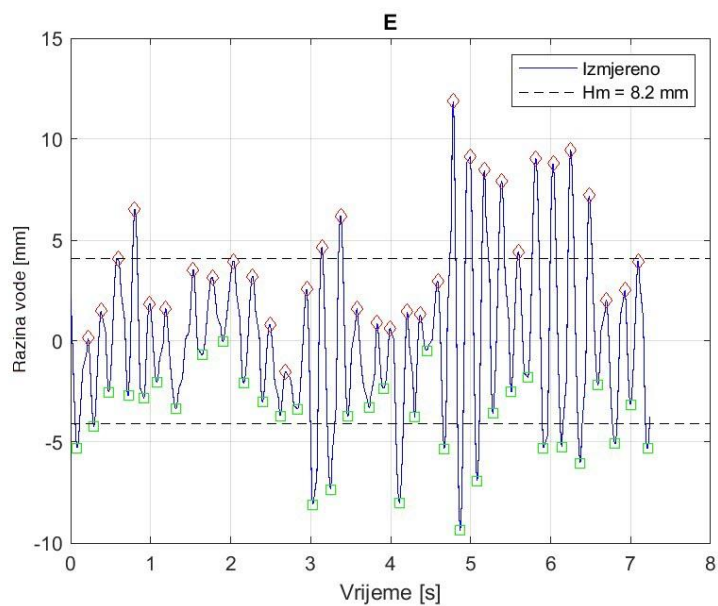
Prvi test u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i odgovarajućim periodom dubokovodnog vala  $T = 0.20484$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



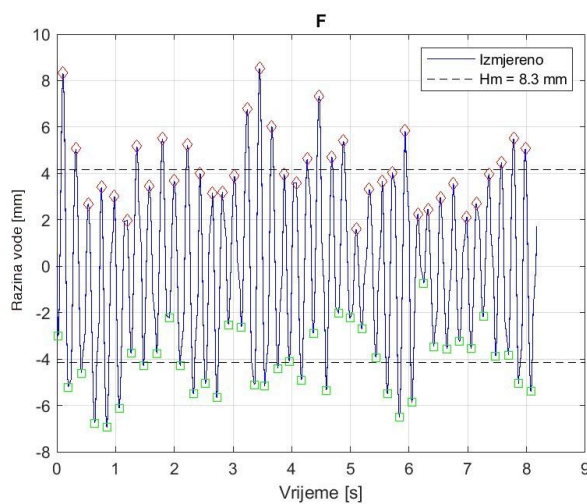
Slika 5.15 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja



Slika 5.16 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja



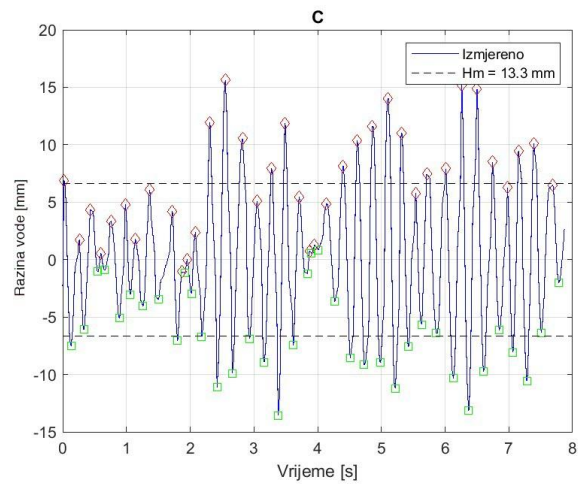
Slika 5.17 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja



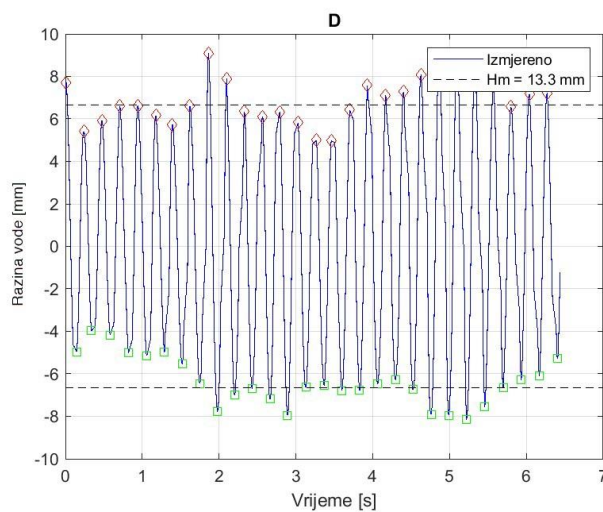
Slika 5.18 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja

## EKSPERIMENT 2

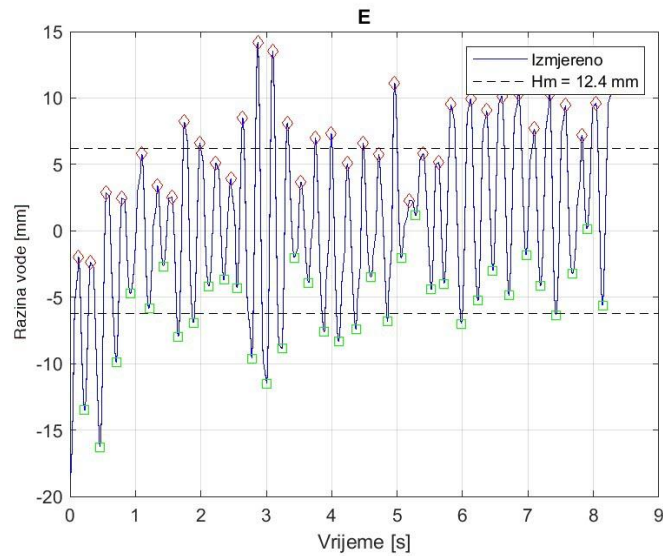
Za drugi test period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.23614$  s (dobivenog analizom spektra vala u poglavlju 3.3) Rezultati su prikazani u nastavku.



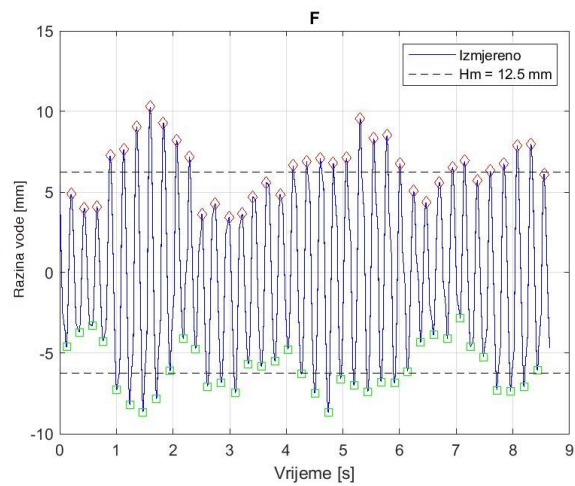
Slika 5.19 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja



Slika 5.20 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki D za eksperiment uplićavanja



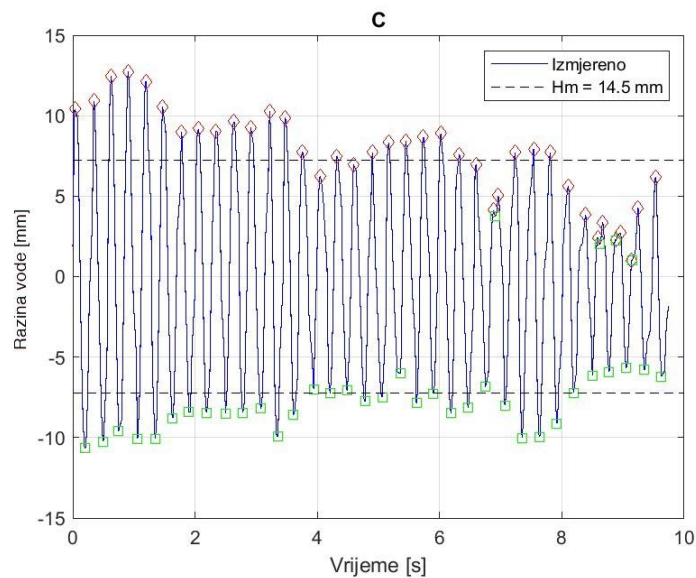
Slika 5.21 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki E za eksperiment uplićavanja



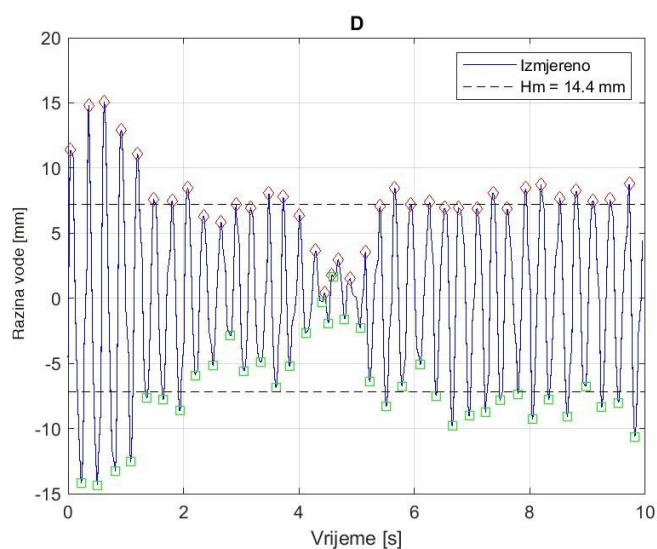
Slika 5.22 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja

### EKSPERIMENT 3

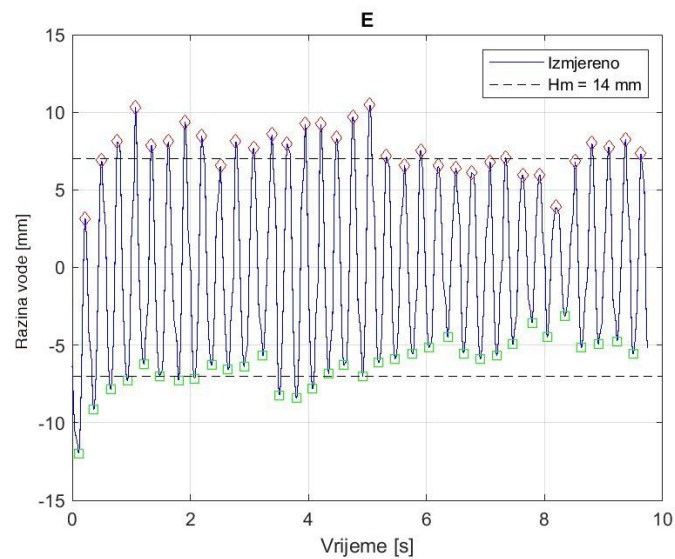
U trećem testu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i period  $T = 0.27953$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



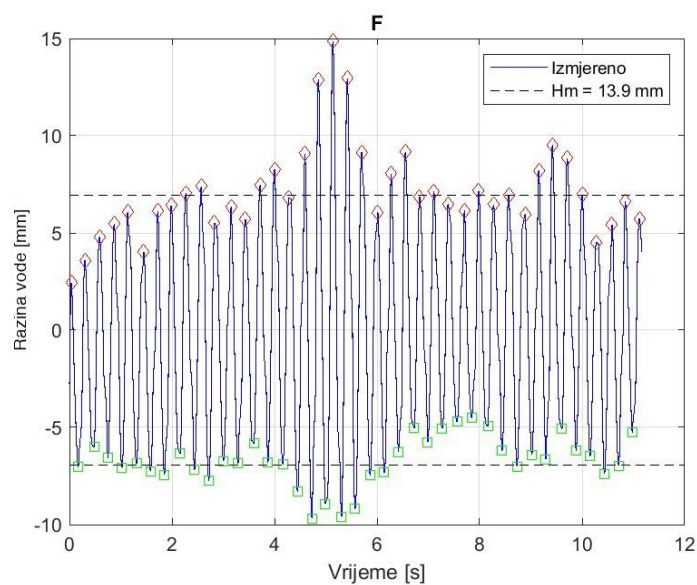
Slika 5.23 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja



Slika 5.14 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki D za eksperiment uplićavanja



Slika 5.25 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki E za eksperiment uplićavanja

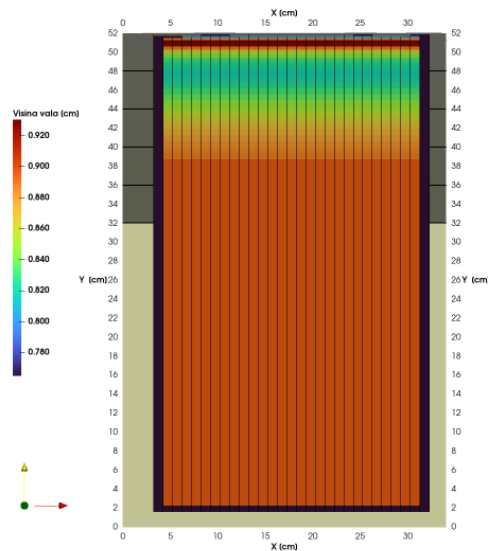


Slika 5.26 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki F za eksperiment uplićavanja



## EKSPERIMENT 1

Prvi test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 0.89613$  cm, odnosno  $H_0 = 8.96$  mm (Slika 5. ).



Slika 5.27 Eksperiment 1, numerički model

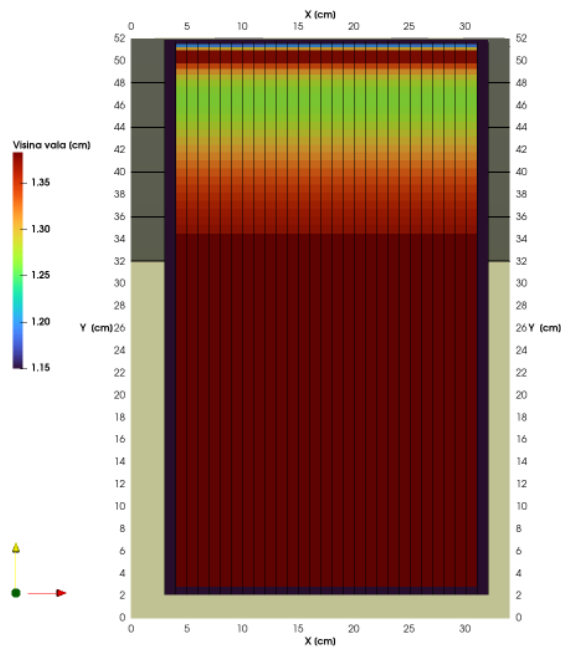
Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5.

TOČKE	H (cm)
C	0,89613
D	0,89613
E	0,851369
F	0,8444

Slika 5.28 Eksperiment 1, visine vala H

## EKSPERIMENT 2

Drugi test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.38317$  cm, odnosno  $H_0 = 13.83$  mm (Slika 5.).



Slika 5.29 Eksperiment 2, numerički model

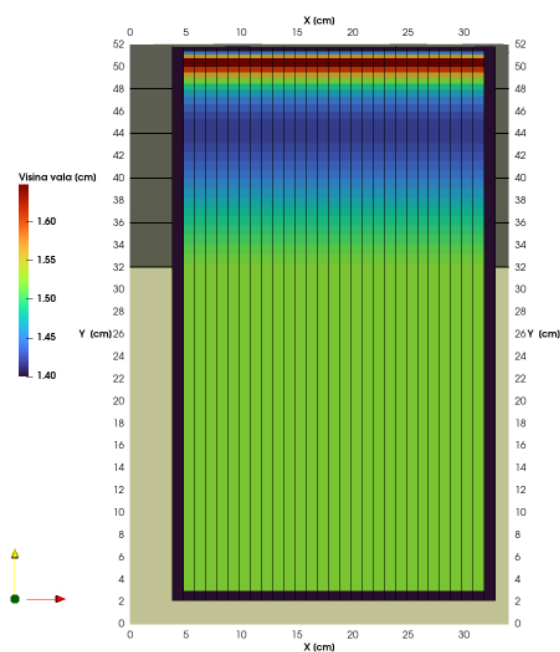
Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5..

TOČKE	H (cm)
C	1,35742
D	1,36192
E	1,2785
F	1,27144

Slika 5.30 Eksperiment 2, visine vala H

### EKSPERIMENT 3

Treći test prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.55521$  cm, odnosno  $H_0 = 15.55$  mm (Slika 5.).



Slika 5.31 Eksperiment 3, numerički model

Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5..

TOČKE	H (cm)
C	1,47928
D	1,47928
E	1,4199
F	1,42124

Slika 5.32 Eksperiment 3, visine vala H

Tablica 5.3 Usporedba rezultata uplićavanje

<i>N (test)</i>	<i>Točka mjerenja</i>	<i>Fizikalni model</i>	<i>Numerički model</i>
		<b>H (mm)</b>	<b>H (mm)</b>
1	C	8.80	8.96
	D	8.80	8.96
	E	8.20	8.51
	F	8.30	8.44
2	C	13.30	13.57
	D	13.30	13.62
	E	12.40	12.79
	F	12.50	12.71
3	C	14.50	14.79
	D	14.40	14.79
	E	14.00	14.20
	F	13.90	14.21

Tablica 5.4 Usporedba rezultata refleksije

<i>N (test)</i>	<i>Točka mjerenja</i>	<i>Fizikalni model</i>	<i>Numerički model</i>
		<b>H (mm)</b>	<b>H (mm)</b>
1	A	22.10	22.20
	B	21.80	22.20
	C	22.00	22.20
2	A	31.50	31.70
	B	31.40	31.70
	C	31.00	31.70
3	A	23.30	23.40
	B	23.40	23.40
	C	23.00	23.40

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad temelji se na integraciji fizikalnog i numeričkog modeliranja radi proučavanja refleksije i uplićavanja valnog polja. Rezultati pokazuju visok stupanj podudarnosti između fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija, potvrđujući valjanost korištenih modela i algoritama.

Fizikalni modeli suočavaju se s problemima poput ograničenja u postizanju geometrijske i dinamičke sličnosti te tehničkim ograničenjima opreme. Eksperimenti u kratkom bazenu otežavaju generiranje stabilnog vala, a zidovi bazena izazivaju refleksije koje nisu prisutne u otvorenom moru.

Numerički modeli, iako fleksibilni, također imaju ograničenja. Unatoč ovim izazovima, kombinacija fizikalnih i numeričkih pristupa omogućila je sveobuhvatno razumijevanje valnih procesa.

Zaključno, oba pristupa imaju svoja ograničenja, ali i komplementarne prednosti. Fizikalni eksperimenti pružaju empirijske podatke i direktno mjerenje, dok numeričke simulacije omogućuju varijacije parametara i uvjeta. Kombinacija ovih metoda omogućuje preciznije modeliranje i bolje razumijevanje valnih procesa, što je ključno za optimizaciju dizajna pomorskih građevina.

Procjena točnosti pristupa ukazuje da kombinacija fizikalnih i numeričkih modela pruža najtočnije rezultate. Samostalno, numerički modeli pokazali su veću fleksibilnost i preciznost u variranju uvjeta, dok fizikalni modeli pružaju empirijske podatke nužne za validaciju numeričkih simulacija. Stoga, integrirani pristup predstavlja najbolju opciju za precizno predviđanje ponašanja valova u različitim uvjetima.

## 7. POPIS TABLICA I SLIKA

Slika 2.1 Osnovni parametri vala (Pršić M., web skipta: Plovni putevi i luke, ZG).....	7
Slika 2.2 Shematski prikaz Snell-ovog zakona na prijelazu izobate za dvije zrake vala u zoni utjecaja dna.....	9
Slika 2. 3 Refleksija.....	11
$s = Hs \cos(2\pi xL) \cos(2\pi tT)$ .....	12
3.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
4.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
5.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
Slika 2. 4 Uplićavanje valova zajedno sa refleksijom.....	13
6.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
7.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
Slika 2. 5 Odnos relativne dubine (d/L) i koeficijenta uplićavanja ( $K_s$ ). .....	15
Slika 3.1 Bazen za fizikalni model .....	17
Slika 3.2 3D modeli obalnih maketa u Autocad-u za fizikalni model ispitivanja refleksije i uplićavanja.....	19
Slika 3.3 Isprintani 3D modeli .....	19
Slika 3.4 Prikaz bazena s korištenom lopaticom, spužvom, elektromotorom i LED svjetlima ...	20
Slika 3.5 Prikaz mjerenja razine vode pomoću elektro-otpornog senzora.....	21
Slika 3.6 Kalibracijska krivulja.....	21
Slika 3.7 Refleksija.....	22
Slika 3.8 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$ za refleksiju .....	22
a).....	23
b).....	23
Slika 3.9 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$ a) Spektar b) Prebrojani valovi zero-up metodom .....	23
Slika 3.10 Eksperiment 2 $T_{\text{motora}}=0.2\text{ s}$ za refleksiju .....	23
Slika 3.11 Eksperiment 3 $T_{\text{motora}}=0.25\text{ s}$ .....	24
Slika 3.12 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$ za uplićavanje.....	24
Slika 3.13 Eksperiment 2 $T_{\text{motora}}=0.2\text{s}$ .....	25
Slika 3.14 Eksperiment 3 $T_{\text{motora}}=0.25\text{s}$ .....	25
Slika 4.1 Mreža konačnih elemenata za refleksiju.....	28

---

Slika 4.2 Mreža konačnih elemenata za uplićavanje.....	29
Slika 4.3 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru .....	30
Slika 5.1 Točke mjerenja H za refleksiju .....	31
Slika 5.3 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije.....	32
Slika 5.4 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije.....	33
Slika 5.5 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki A za eksperiment refleksije.....	34
Slika 5.6 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije.....	34
Slika 5.7 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije.....	35
Slika 5.8 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki A za eksperiment refleksije.....	36
Slika 5.9 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki B za eksperiment refleksije.....	36
Slika 5.10 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment refleksije .....	37
Slika 5.11 Eksperiment 1, numerički model .....	38
Slika 5.12 Eksperiment 2, numerički model .....	39
Slika 5.13 Eksperiment 1, numerički model .....	40
Slika 5.14 Točke mjerenja H za uplićavanje.....	41
Slika 5.15 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	42
Slika 5.16 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	42
Slika 5.17 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	43
Slika 5.18 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	43
Slika 5.19 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	44

---

Slika 5.20 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki D za eksperiment uplićavanja.....	44
Slika 5.21 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki E za eksperiment uplićavanja.....	45
Slika 5.22 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	45
Slika 5.23 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki C za eksperiment uplićavanja.....	46
Slika 5.25 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki E za eksperiment uplićavanja.....	47
Slika 5.26 Vremenski zapis oscilacije razine vode i procijenjena srednja vrijednost visine vala (zero-up metodom) na Točki F za eksperiment uplićavanja.....	47
Slika 5.27 Eksperiment 1, numerički model.....	48
Slika 5.28 Eksperiment 1, visine vala H.....	48
Slika 5.29 Eksperiment 2, numerički model.....	49
Slika 5.30 Eksperiment 2, visine vala H.....	49
Slika 5.31 Eksperiment 3, numerički model.....	50
Slika 5.32 Eksperiment 3, visine vala H.....	50
Tablica 4.1 Ulazni podaci - Uplicavanje.....	29
Tablica 4.2 Ulazni podaci - Refleksija.....	29
Tablica 5.3 Usporedba rezultata uplicavanje.....	51
Tablica 5.4 Usporedba rezultata refleksije.....	51



## 8.LITERATURA

- [1] Srzić, V. , Galešić, M. (2020.), Predavanja i vježbe iz kolegija Pomorske građevine, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
- [2] (2019.), Elaborat vjetrovalne klime i studija valovanja – Luka Stinice, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
- [3] Dominic Reeve, Andrew Chadwick and Christopher Fleming (2004.) Coastal Engineering; Processes, theory and design practice
- [4] Coastal Engineering Research Center (CERC), Shore protection manual (volume 1), (1984.)
- [5] Pršić M., web skipta: Plovni putevi i luke, ZG, (2011.)
- [6] IB Recap, “ Waves | DP Physics”  
<https://ibrecap.com/DP/Waves>
- [7] Revision science, “Wave behaviour“  
<https://revisionscience.com/gcse-revision/physics/waves/wave-behaviour>

