

# Usporedba numeričkog i fizikalnog modela difrakcije i refleksije valnog polja

---

Norac-Kljajo, Irena

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:123:217749>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

# **ZAVRŠNI RAD**

**Irena Norac-Kljajo**

**Split, 2024.**

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

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

**Završni rad**

**Split, 2024.**

## Usporedba numeričkog i fizikalnog modela difrakcije i refleksije valnog polja

### **Sažetak:**

Ovaj rad istražuje refleksiju i difrakciju valova kroz dva pristupa: fizikalni model i numerički model u MATLAB-u. Fizikalni model koristi plastičnu kutiju (34 x 54 cm), LED-ice, spužvu za smanjenje refleksije valova od stijenki kutije, 3D isprintane modele obale, električni motor za stvaranje valova i digitalni mjerač razine vode. Eksperimenti su provedeni s različitim preprekama i modelima obale, pri čemu se indirektno mjerila visina i period valova. Numerički model u MATLAB-u izračunava plan refrakcije, uplićavanje i refleksiju uz zadavanje koeficijenta refleksije u obalnoj zoni. Na temelju rezultata numeričkog modela, difrakcija je naknadno proračunata grafo-analitičkom metodom. Cilj rada je usporediti rezultate fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija te analizirati njihovu točnost i efikasnost. Rezultati pokazuju visoku podudarnost, uz razmatranje odstupanja zbog eksperimentalnih ograničenja i numeričkih aproksimacija. Zaključno, ovaj rad ukazuje na prednosti i izazove oba pristupa te pruža potencijalne smjernice za buduća istraživanja.

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

## Comparison of numerical and physical models of wave field diffraction and reflection

### **Abstract:**

This thesis investigates the reflection and diffraction of waves through two approaches: a physical model and a numerical model using MATLAB. The physical model uses a plastic box (34 x 54 cm), LEDs, a sponge for reducing the reflection, 3D printed coastal models, an electric motor for wave generation, and a digital water level sensor. Experiments were conducted with various obstacles and coastal models, indirectly measuring the height and the period of the waves. The numerical model in MATLAB calculates refraction patterns, shoaling, and reflection by assigning a reflection coefficient in the coastal zone. Based on the results of the numerical model, diffraction was subsequently calculated using a graph-analytical method. The aim of the thesis is to compare the results of physical experiments and numerical simulations and to analyze their accuracy and efficiency. The results show high correspondence, considering deviations due to experimental limitations and numerical approximations. In conclusion, this thesis highlights the advantages and challenges of both approaches and provides potential guidelines for future research.

**Keywords:** reflection, diffraction, physical model, numerical model, graph-analytical method, 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: Irena Norac-Kljajo  
MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083229578  
KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**  
PREDMET: Pomorske građevine

**ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

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

Opis zadatka: Ovaj rad će se fokusirati na analizu difrakcije i refleksije 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 difrakciju i refleksiju.
- 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 difrakcije i refleksije.
- 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:

Doc.dr.sc. Morena Galešić Divić



Komentor Završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Vladimir Divić



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	6
2. OPIS VALNE TRANSFORMACIJE DIFRAKCIJE I REFLEKSIJE .....	7
2.1. Općenito o morskim valovima i njihovom nastanku .....	7
2.2. Transformacije valnog polja.....	8
2.3. Difrakcija.....	11
2.4. Refleksija.....	13
2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja difrakcije i refleksije.....	15
3. FIZIKALNI MODEL ZA DIFRAKCIJU I REFLEKSIJU .....	17
3.1. Osnove fizikalnih modela.....	17
3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela.....	18
3.3. Provedeni eksperiment za difrakciju i refleksiju.....	22
3.4. Ograničenja fizikalnog modela .....	25
4. NUMERIČKI I GRAFO-ANALITIČKI MODEL TRANSFORMACIJA VALNOG POLJA	27
4.1. Osnove numeričkog modela.....	27
4.2. Postavke numeričkog modela za refleksiju i podloge za difrakciju.....	28
5. REZULTATI I USPOREDBA.....	33
5.1. Difrakcija.....	33
5.2. Refleksija.....	43
6. ZAKLJUČAK .....	51
7. POPIS TABLICA I SLIKA.....	52
8. LITERATURA.....	54

## **1.UVOD**

Cilj ovog završnog rada je istražiti refleksiju i difrakciju valnog polja usporedbom fizikalnog i numeričkog modeliranja. Posebna pažnja posvećena je analizi transformacije valnog polja u realnim i simuliranim uvjetima, s ciljem unapređenja 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, 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.

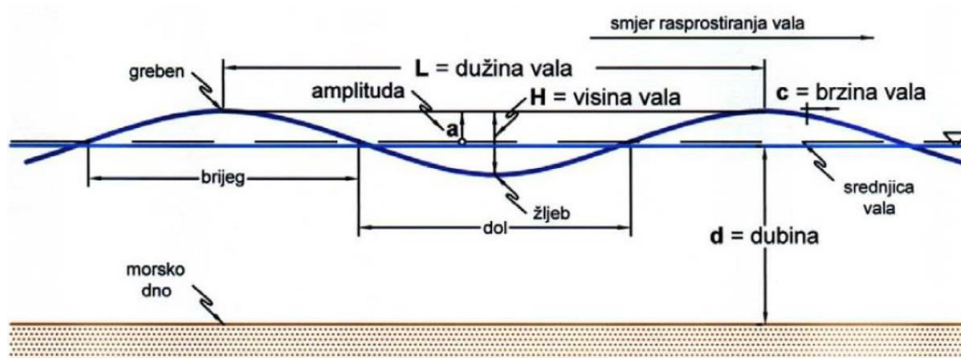
Ovaj rad je proveo eksperimentalno i numeričko istraživanje kako bi se detaljno proučili refleksija i difrakcija valnog polja. Postignut je visok stupanj podudarnosti između rezultata fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija, što potvrđuje valjanost i primjenjivost predloženih modela u razumijevanju 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 DIFRAKCIJE I REFLEKSIJE

### 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 kutom od nula stupnjeva. Koeficijent uplićavanja  $K_s$  je mjera koja se koristi za opisivanje deformacije valova na nagnutom dnu ili pri promjeni dubine.

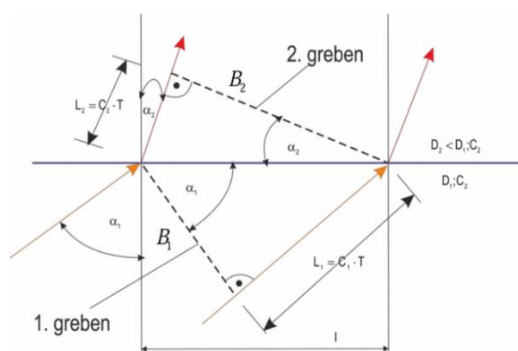
$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 c_0}{n c}} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} = K_s \quad 1$$

$H_0$  – 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 promjenu kuta 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 primjeru dvije valne zrake i promjene dubine

**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 u zoni utjecaja dna 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. Transmisija nije obuhvaćena u ovom radu.

Lom vala i transmisija nisu obuhvaćeni u ovom radu.

s

### 2.3. Difrakcija

Difrakcija valova, kao ključni fenomen u fizici valova, predstavlja proces savijanja valova kada naiđu na prepreke ili prolaze kroz otvore. Ovaj fenomen proizlazi iz Huygensovog principa, prema kojem svaka točka na valnoj fronti djeluje kao izvor sekundarnih sfernih valova. Kada valovi susretnu prepreku ili otvor, ti sekundarni valovi se šire u svim smjerovima, a nova valna fronta formira se kombinacijom svih tih valova.

U morskom okolišu, difrakcija valova često se promatra kada valovi nailaze na različite prepreke poput lukobrana, pristaništa ili prolaze kroz uske prolaze između otoka ili grebena. Kada valovi prolaze kroz ove prepreke, dolazi do njihovog savijanja i širenja oko njih, što rezultira stvaranjem valnih oblika iza prepreka. Ova pojava može biti ključna u kontekstu obalnog inženjerstva i sigurnosti na moru, jer može utjecati na stabilnost obala, navigaciju plovila i eroziju obale.

Difrakcija valova često djeluje u kombinaciji s drugim procesima, poput refrakcije, što dodatno obogaćuje razumijevanje ponašanja valova u različitim okolišima. Prepreke koje uzrokuju difrakciju obično su postavljene pod određenim kutem u odnosu na smjer valova, a njihova geometrija i materijal mogu dodatno utjecati na interakciju valova s preprekom.

Teorijski pristup difrakciji valova obuhvaća složene matematičke modele i proračune, koji se temelje na sljedećim pretpostavkama:

1. Voda se smatra idealnim fluidom.
2. Valovi se opisuju malim amplitudama i linearnom teorijom valova.
3. Gibanje čestica vode je irrotaciono i opisano potencijalnom funkcijom koja zadovoljava Laplace-ovu jednadžbu.
4. Dubina vode iza prepreke se smatra konstantnom.

Ovi proračuni mogu biti vrlo zahtjevni, ali pružaju vrijedne uvide u ponašanje valova u različitim uvjetima. Nomogrami prema Wiegelu (1962) omogućavaju procjenu koeficijenta difrakcije  $K_D$ , čime se omogućuje predviđanje valne visine u području akvatorija u zoni sjene prepreke (Shore protection manual (volume 1), Coastal Engineering Research Center (CERC), 1984.). Ovaj koeficijent pomnožen s valnom visinom incidentnog vala pruža vrijedne informacije o očekivanoj valnoj visini iza prepreke.



$$H = H_0 K_D$$

3

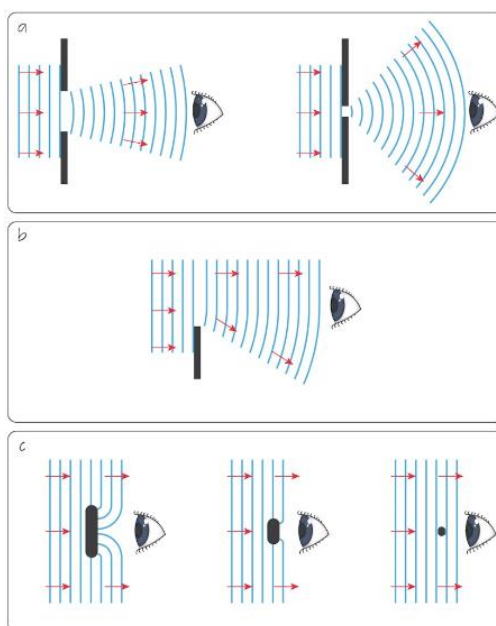
gdje je  $H_0$  početna visina dubokovodnog vala,  $K_D$  koeficijent difrakcije.

Razlikujemo tri glavna tipa difrakcije valova (Slika 2.3):

a) **Dvostrana difrakcija:** Dvostrana difrakcija se javlja kada valovi prolaze između dviju razmaknutih prepreka. Razmak između prepreka ili njihova širina izražava se u odnosu na valnu duljinu incidentnog vala. Ovaj tip difrakcije često se susreće u situacijama kada su prepreke postavljene u vodi.

b) **Jednostrana difrakcija:** Ovaj tip difrakcije se događa kada valovi prolaze oko jednog kraja prepreke, dok drugi kraj prepreke ostaje u beskonačnosti i nema značajan utjecaj na difrakciju.

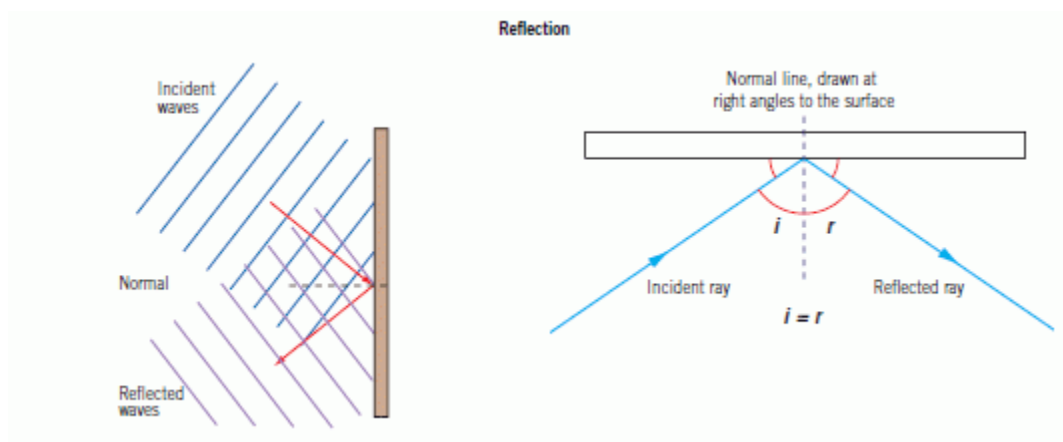
c) **Difrakcija iza ograničene prepreke:** Ovaj tip difrakcije se odnosi na pojavu savijanja valova nakon što prođu kroz otvor ili oko prepreke. Valovi se šire i zakreću iza prepreke, što može rezultirati smanjenjem valne visine i promjenom oblika valova. Ograničena prepreka može biti bilo koji oblik koji djeluje kao zapreka za prolaz valova, poput lukobrana, obala ili drugih građevina u vodi.



Slika 2.3 Tipovi difrakcije valova (Waves | DP Physics - IB Recap, n.d.)

## 2.4. 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 2.4 Refleksija (*revisionscience-wave-behaviour*)

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:

$$\eta_s = H_s \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad 4$$

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.

**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:

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H/L_0}} \quad 5$$

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

$$K_{refl} = 0.125 + 0.7\sqrt{\xi} \quad 6$$

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

$$H = H_0 K_{refl} \quad 7$$

gdje je  $H_0$  početna visina dubokovodnog vala,  $K_{refl}$  je koeficijent refleksije.

## 2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja difrakcije i refleksije

**Obalno inženjerstvo** obuhvaća širok spektar aktivnosti usmjerenih na zaštitu obalnih područja, održavanje sigurnosti pomorske infrastrukture te očuvanje okoliša. Difrakcija valova, kao ključni fenomen u fizici valova, igra značajnu ulogu u ovoj disciplini. Jedan od ključnih aspekata obalnog inženjerstva je zaštita obale od erozije. Razumijevanje difrakcije valova omogućuje inženjerima da planiraju i implementiraju učinkovite mjere zaštite, poput izgradnje valobrana ili gatova, kako bi se smanjila erozija obalnih područja. Također, difrakcija valova ima važnost u dizajniranju luka i pristaništa, gdje utječe na sigurnost plovidbe i održivost pomorske infrastrukture. Održavanje postojeće pomorske infrastrukture, poput redovitog nadzora i prilagodbe lukobrana ili pomorskih platformi, također zahtijeva razumijevanje difrakcije valova.

Dodatno, difrakcija valova ima implikacije i za projekte koji koriste obnovljive izvore energije poput energije valova. Identificiranje lokacija s optimalnim uvjetima za prikupljanje energije valova zahtijeva poznavanje raspodjele energije valova uz obalu. U cjelini, razumijevanje difrakcije valova ključno je za razvoj održivih rješenja u obalnom inženjerstvu. To omogućuje inženjerima da stvore sigurne, funkcionalne i otporne obalne infrastrukture koja štiti obale, održava sigurnost plovidbe i promiče održivost okoliša.

Difrakcija valova ima ključnu ulogu u navigaciji i **sigurnosti na moru**. Ovaj fenomen može značajno utjecati na plovidbu brodova, mijenjajući smjer i jačinu valova u uskim morskim prolazima i područjima s obalama. Razumijevanje difrakcije omogućuje pomorcima planiranje sigurnih plovidbenih ruta i prilagodbu akcija radi smanjenja rizika od nautičkih nesreća. Također, difrakcija valova ima implikacije za stabilnost brodova u teškim vremenskim uvjetima te igra važnu ulogu u operacijama spašavanja i hitnim intervencijama na moru.

Difrakcija valova ima značajan utjecaj na lokacije za prikupljanje **energije valova**. Razumijevanje ovog fenomena omogućuje identifikaciju optimalnih mjesta za postavljanje uređaja za prikupljanje energije, što je ključno za efikasnu proizvodnju obnovljive energije iz valova.

U **geofizičkim istraživanjima**, difrakcija valova igra ključnu ulogu u proučavanju unutrašnje strukture Zemlje. Kroz ovaj fenomen, valovi se savijaju oko prepreka ili se šire kroz otvore, omogućavajući geofizičarima da steknu uvid u slojeve i formacije ispod površine Zemlje.

Difrakcija valova pruža dragocjene uvide u ponašanje valova i njihovu interakciju s okolinom, što je ključno za različite discipline i istraživačka područja. To omogućuje razvoj održivijih rješenja za izazove u pomorskom okruženju. 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 infrastrukture 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 uslijed 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**.

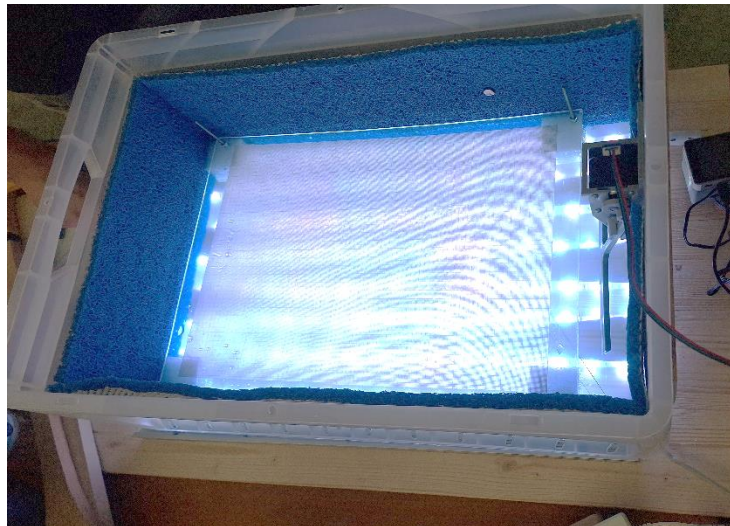
Difrakcija i refleksija često se pojavljuju zajedno u interakciji valova s obalnim konstrukcijama i nepravilnim batimetrijama. Kada valovi udare u lukobran ili druge oblike obalnih konstrukcija, dolazi do refleksije valova natrag prema moru. Istodobno, difrakcija se događa kada valovi prolaze kroz ili oko rubova tih struktura, šireći energiju vala u različitim smjerovima.

Blizu konstrukcije, difrakcija je često dominantna. Valovi se šire iza objekta, smanjujući intenzitet vala i redistribuirajući energiju. Dalje od objekta, refleksija postaje važnija jer se reflektirani valovi miješaju s dolaznim valovima, stvarajući složene obrasce interferencije.

Ova kombinacija difrakcije i refleksije ima značajan utjecaj na dizajn i planiranje obalnih konstrukcija. Koriste se složeni modeli za predviđanje kako će valovi reagirati u prisutnosti tih struktura kako bi se osigurala njihova stabilnost i funkcionalnost te minimizirala erozija i drugi negativni utjecaji na obalu.

### 3.FIZIKALNI MODEL ZA DIFRAKCIJU I REFLEKSIJU

#### 3.1. Osnove fizikalnih modela



*Slika 3.5 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 difrakcije i refleksije 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

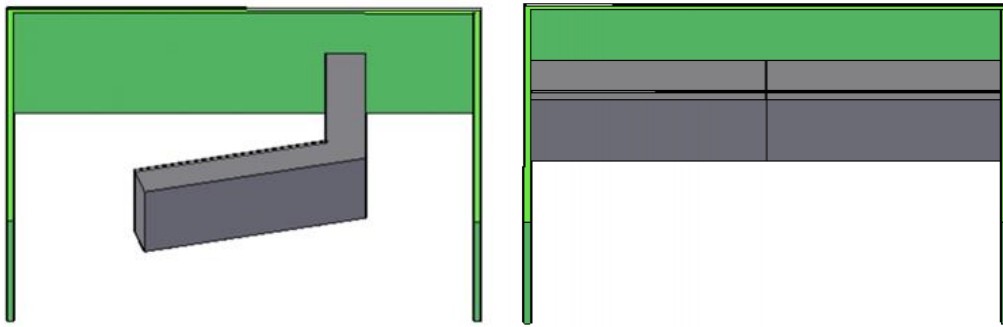
valni generator stvaraju valovi s različitim karakteristikama, pri čemu se svaki eksperiment ponavlja nekoliko puta kako bi se osigurala ponovljivost rezultata. Elektro-otporni senzor bilježi promjenu napona uzrokovanu promjenom razine vode u različitim točkama, posebno u područjima gdje se očekuje difrakcija i refleksija, 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.

Na osnovu opisane analize, kreirani su dijagrami koji prikazuju oscilaciju razine vode u različitim točkama, te srednja visina vala dobivena zero-up metodom iz tog zapisa. Ovi podaci o visinama vala 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.

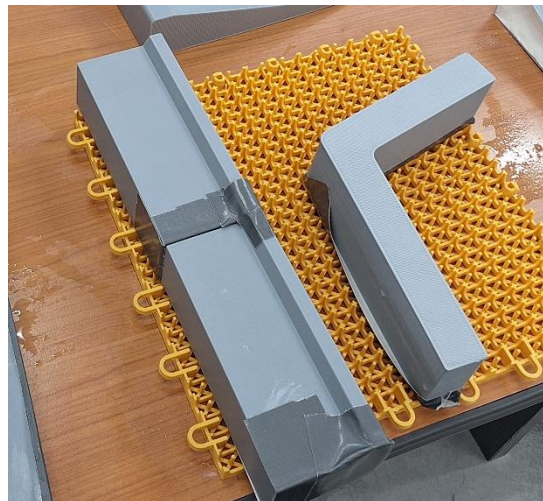
### 3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela

Za izradu fizikalnog modela i provođenje eksperimenata korišteni su različiti materijali i uređaji koji su ključni za precizno simuliranje stanja u prirodi, odnosno konstrukciji od interesa. Svaki materijal i uređaj ima specifičnu ulogu u postizanju točnih i ponovljivih rezultata.

Makete obale nacrtane su u Autocad-u (Slika 3.6), nakon čega su izrađene pomoću 3D printera (Slika 3.7). 3D printer omogućava izradu preciznih i složenih geometrijskih oblika koji repliciraju stvarne obalne strukture. Nakon izrade, makete su napunjene betonom kako bi se postigla potrebna čvrstoća i stabilnost. Beton je odabran 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 3.6 3D prikaz modela obale u Autocad-u*



*Slika 3.7 3D isprintani modeli obale*

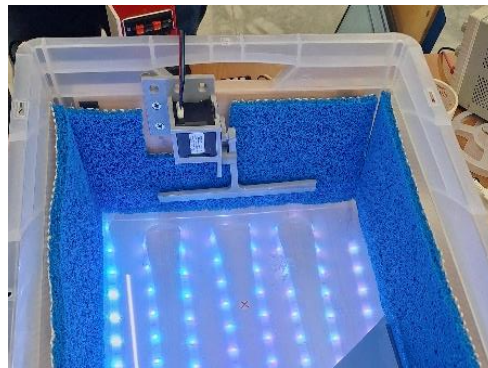
Za generiranje valova korištena je jedna, također 3D isprintana, lopatica koju pokreće mali elektromotor. Elektromotor omogućava kontrolirano i kontinuirano stvaranje valova s različitim karakteristikama, kao što su visina i period. Korištenjem elektromotora osigurava se konzistentnost eksperimentalnih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

Plastična kutija dimenzija 40x60 cm služila je kao bazen za testiranje. Plastika je odabrana zbog svoje vodootpornosti i pristupačnosti, što omogućava jednostavno postavljanje i prilagodbu eksperimentalnog postava.



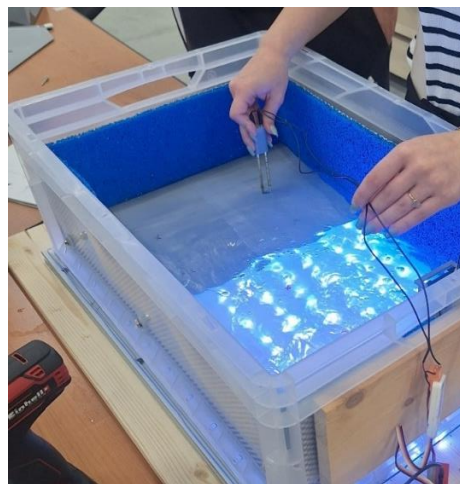
Unutrašnjost bazena okružena je spužvom kako bi se smanjilo reflektiranje valova od zidova bazena. Spužva apsorbira energiju valova, čime se smanjuje njihova refleksija i omogućava preciznije mjerenje valova. Ovo osigurava da izmjereni podaci točnije odražavaju interakciju valova s modelom obale, a ne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



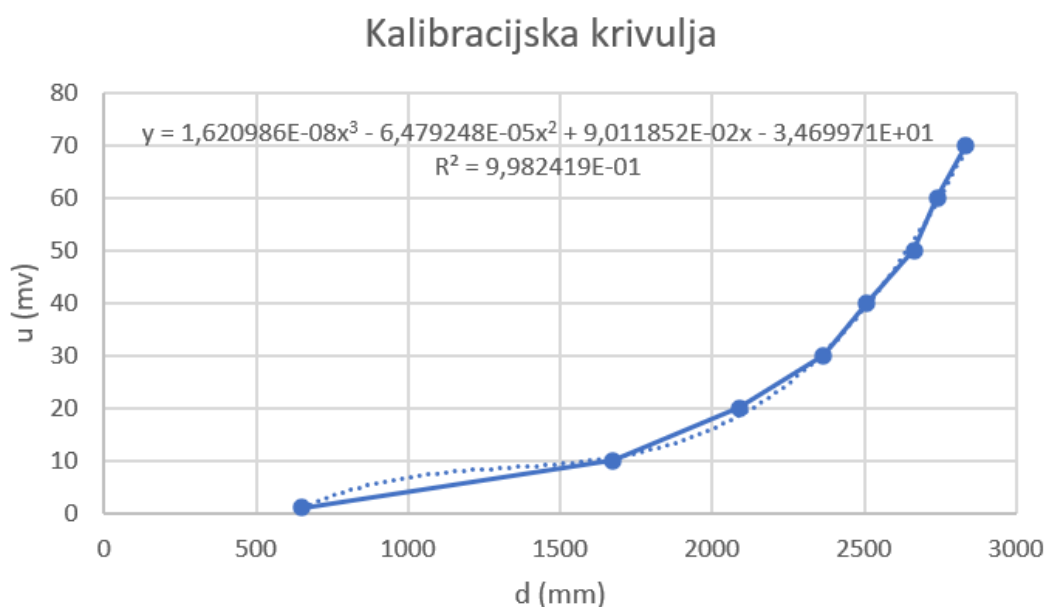
*Slika 3.8 Prikaz bazena s korištenom lopaticom, spužvom, elektromotorom i LED svijetlima*

Za 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 mjerena pad napona.



*Slika 3.9 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 (Slika 3.10). Jednom ostvarena kalibracijska krivulja je dala direktno vezu za pretvorbu mjenog pada napona u dubinu vode.

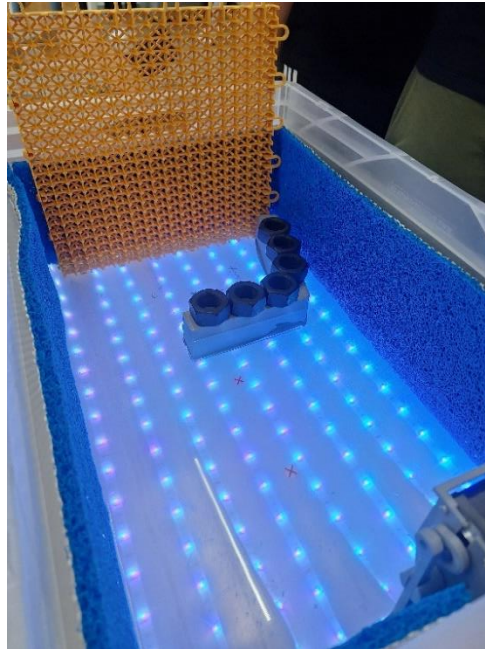


*Slika 3.10 Kalibracijska krivulja*

Na osnovu tako izmjerenih podataka o razini vode za svaki od eksperimenata, određen je period iz spektra vala (npr. Slika 3.13 a)), te je za početnu visinu vala uzeta srednja vrijednost dobivena zero-up metodom iz vremenske serije podataka o razini vode (npr. Slika 3.13 b)).

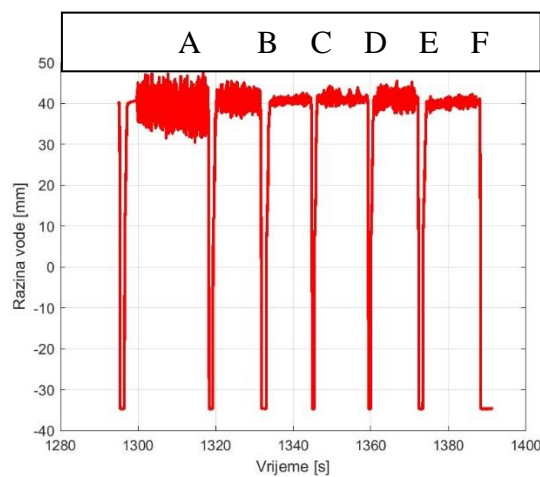
Ovi materijali i uređaji zajedno čine cjelovit sustav koji omogućava preciznu i ponovljivu simulaciju difrakcije i refleksije valova na obali, pružajući vrijedne podatke za daljnju analizu i usporedbu s numeričkim modelima.

### 3.3. Provedeni eksperiment za difrakciju i refleksiju



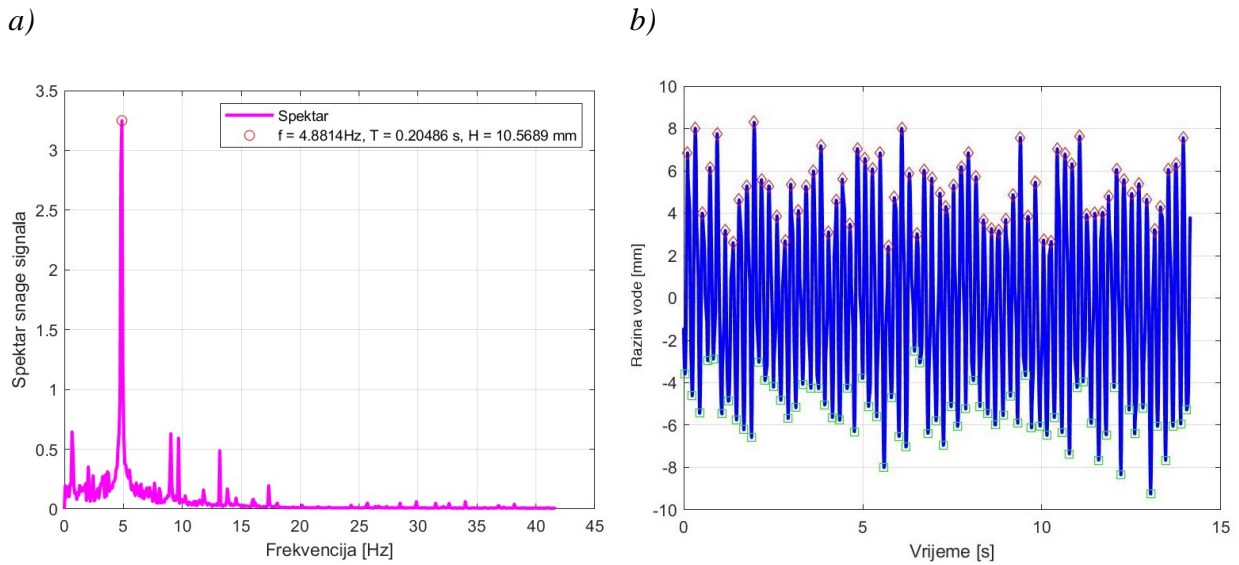
Slika 3.11 Postavke fizikalnog modela za simulaciju difrakcije

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



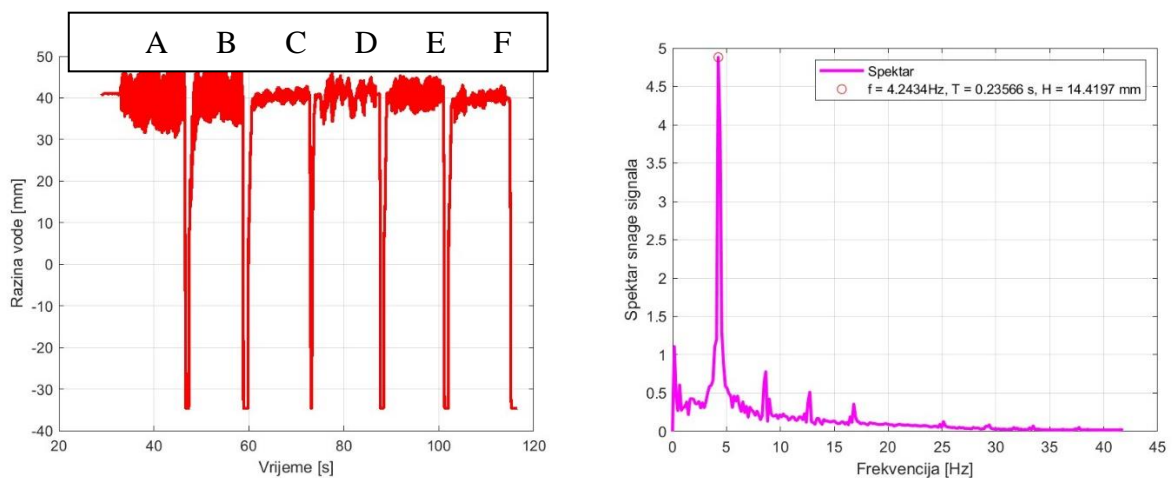
Slika 3.12 Eksperiment 1  $T_{\text{motora}}=0.17$

Podaci su uzeti iz točke A i analizirani su kako bi se dobili ključni parametri dubokovodnog vala. Spektralnom analizom signala (Slika 3.13), određena je dominantna frekvencija vala  $f = 4.8814$  Hz., a period vala je izračunat kao  $\frac{1}{f} = T = 0.20486$  s, a visina vala  $H$  procijenjena kao srednja vrijednost iz zapisa (zero-up metoda) na 10.5689 mm. Ove analize su ključne za razumijevanje ponašanja vala u kontroliranim uvjetima bazena.



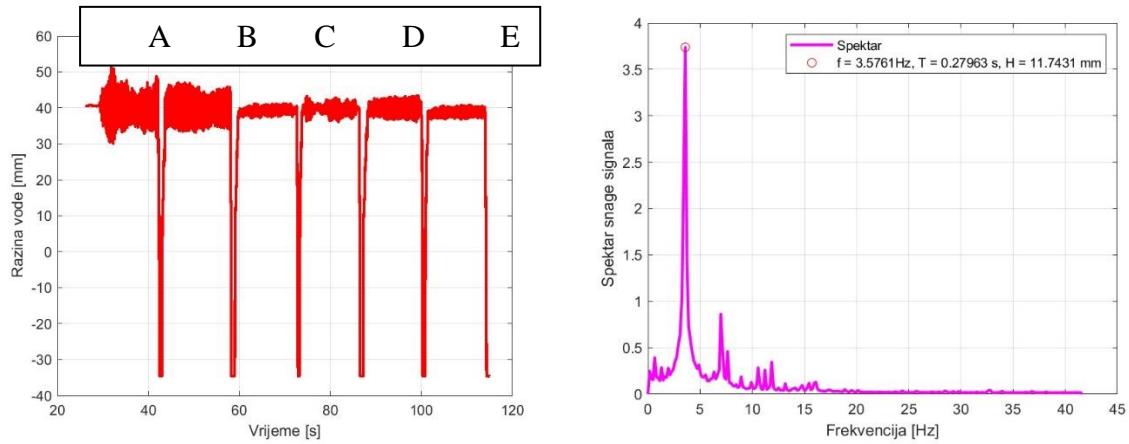
Slika 3.13 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17s$  a) Spektar b) Prebrojani valovi zero-up metodom

U drugom eksperimentu gdje je period okretaja motora  $T_{motora} = 0.2$  s, spektralnom analizom i zero-up metodom dobiveno je:  $f = 4.2434$  Hz,  $T = 0.23566$  s i  $H = 14.4197$  mm (Slika 3.14).



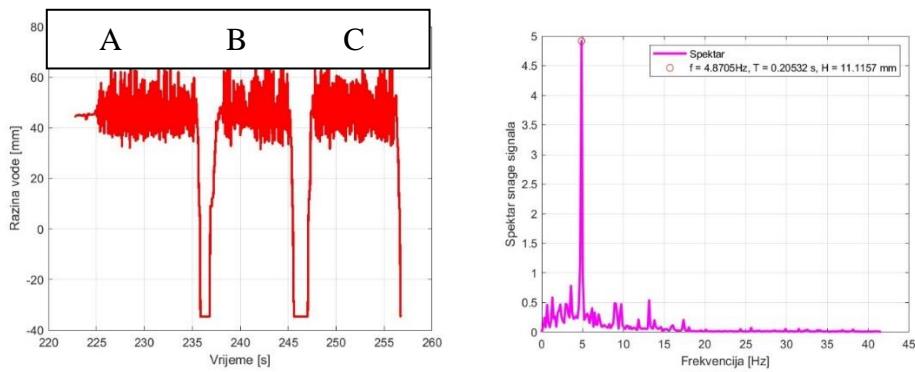
Slika 3.14 Eksperiment 2  $T_{motora}=0.2s$

Treća analiza pokazala je sljedeće rezultate:  $f = 3.5761 \text{ Hz}$ ,  $T = 0.27963 \text{ s}$  i  $H = 11.7431 \text{ mm}$  (Slika 3.15)

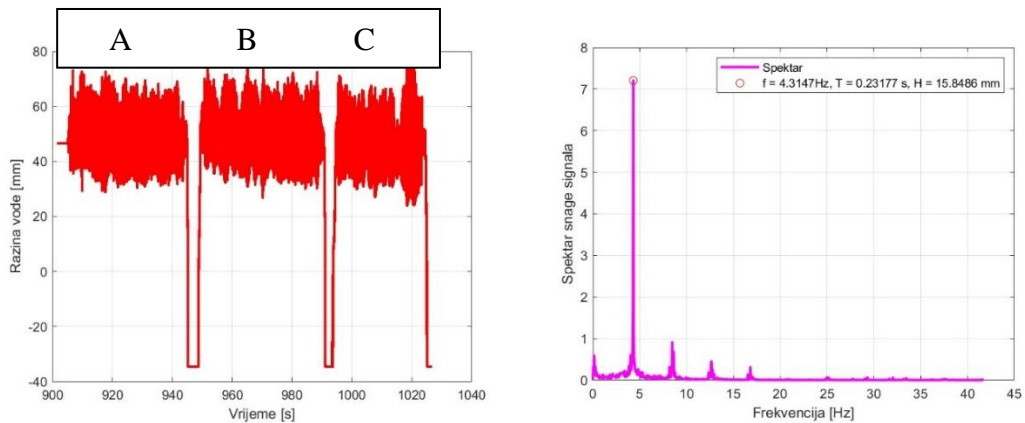


Slika 3.15 Eksperiment 3  $T_{motora}=0.25s$

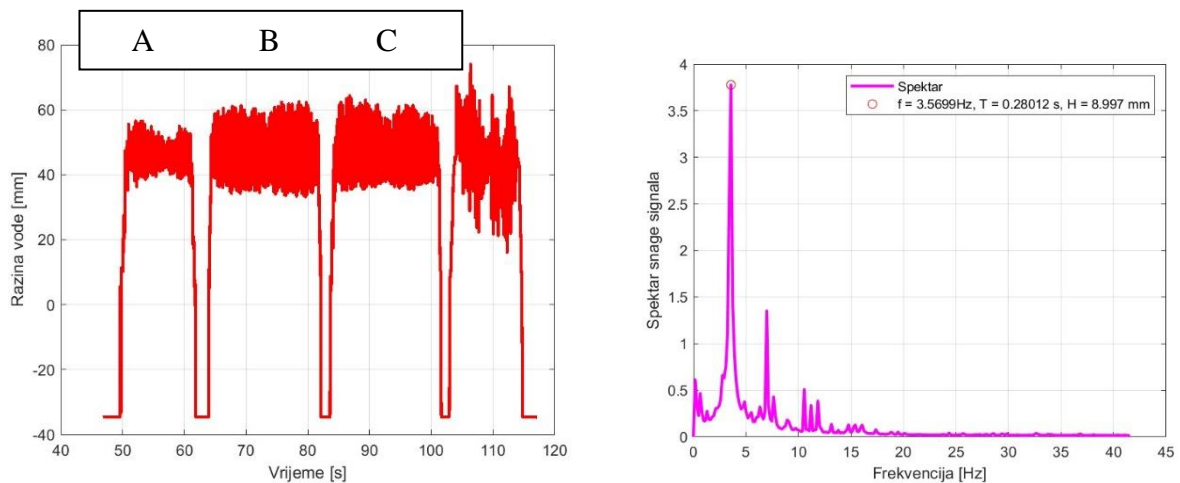
Za refleksiju je izveden isti postupak da bi se dobili ključni parametri vala.



Slika 3.16 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17s$



Slika 3.17 Eksperiment 2  $T_{motora}=0.2s$

Slika 3.18 Test 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 koji su se pojavili 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 razviju, dok je u ograničenom prostoru bazena taj proces skraćen i ne odražava stvarne morske valove. To ograničenje utječe na mogućnosti interpretacije 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. Premala dubina je ograničavala nastanak adekvatne mjerljive visine vala, te je bila pod izraženim utjecajem trenja s dnom bazena. Prevelika dubina je sprječavala dovoljnu osjetljivost na promjene dubine (u slučajevima simulacije uplićavanja i refrakcije). Ako razina vode nije odgovarajuća, valovi ne mogu doseći potrebnu visinu i energiju, što utječe na kvalitetu 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 bila pokretana elektromotorom, bila je montirana relativno preduboko, što je uzrokovalo prevelik otpor vode i učestalo ispadanje lopatice u slučajevima veće brzine okretaja. Previsoko postavljanje bi sukladno navedenom preslabo zahvaćalo u stupac vode i samo površinski prskalo, čime nije bilo moguće postići stabilni periodički val. 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 na stijenkama 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.

Zaključno, 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 dubinom 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 GRAFO-ANALITIČKI MODEL TRANSFORMACIJA VALNOG POLJA

### 4.1. Osnove numeričkog modela

Stvaranje numeričkog modela za analizu transformacije valnog polja na različitim vrstama obala zahtijeva pažljivo planiranje i implementaciju. U ovom radu je korišten numerički model isprogramiran u MATLAB-u, gdje se diferencijalna jednačina 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 jednačina 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 jednačina. 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.

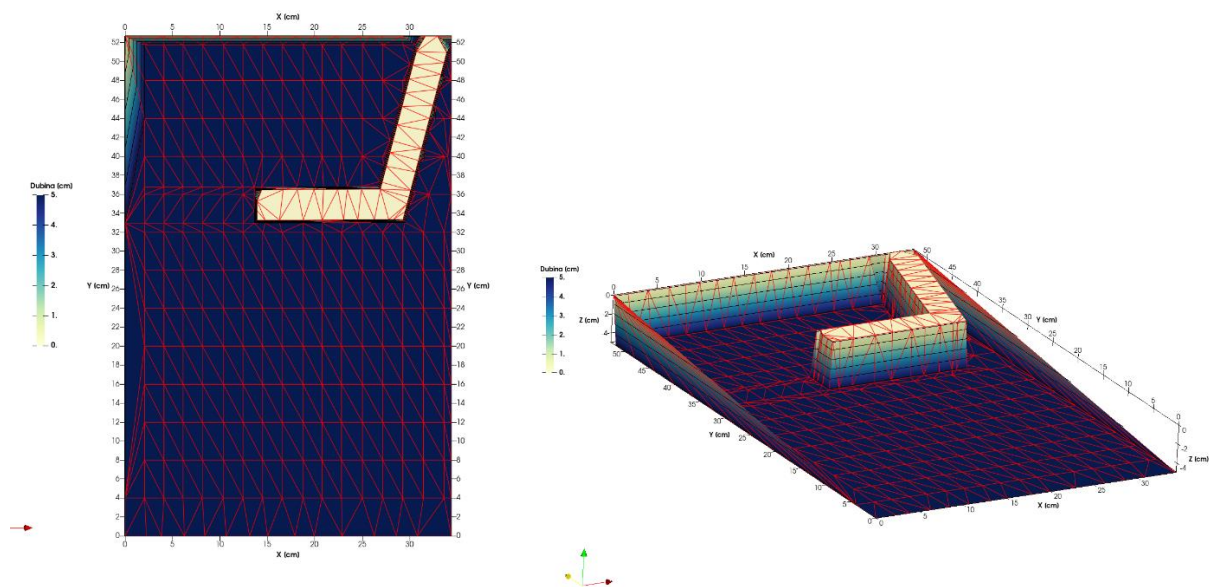
Zbog ograničenja numeričkog modela, za difrakciju i računanje koeficijenta difrakcije koristila se grafo-analitička metoda preko Wiegel dijagrama (Shore protection manual (volume 1), Coastal Engineering Research Center (CERC), 1984.). Numerički modeli često imaju ograničenja u preciznosti simulacije složenih pojava poput difrakcije, posebno kada se radi o nelinearnim efektima i složenim rubnim uvjetima. Difrakcija je posebno složena pojava jer se na obalnim konstrukcijama najčešće javlja u kombinaciji s refleksijom (i potencijalno transmisijom),



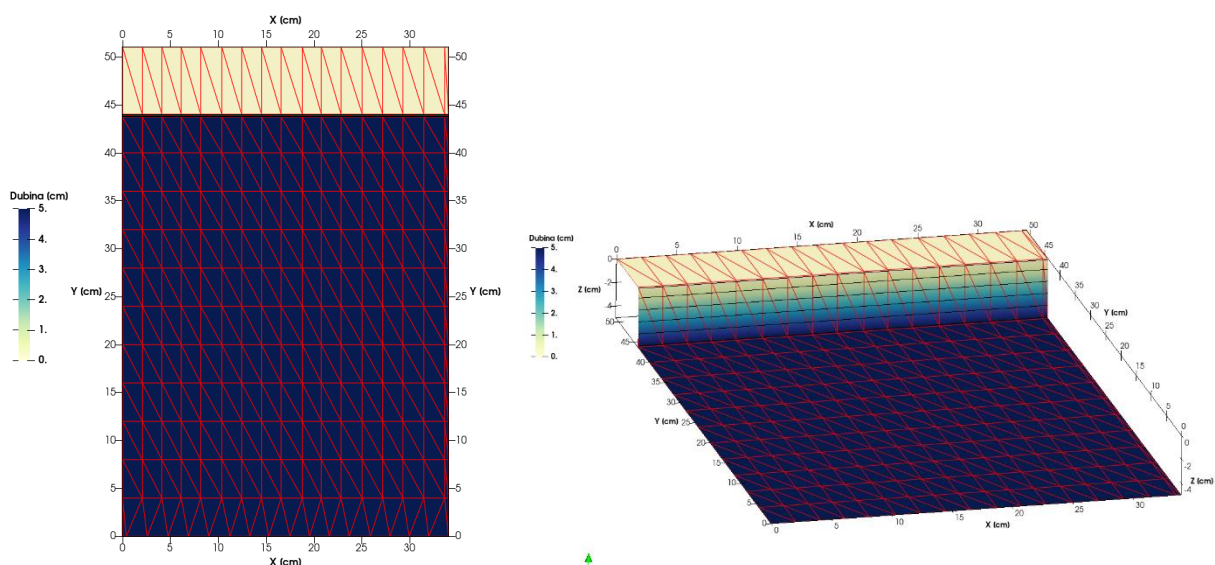
uplićavanjem, refrakcijom i lomom vala. Korištenjem Wiegel dijagrama, omogućeno je vizualno i analitičko praćenje promjena u valovima, što je olakšalo preciznije izračunavanje koeficijenta difrakcije i bolje razumijevanje ponašanja valova iza prepreka.

## 4.2. Postavke numeričkog modela za refleksiju i podloge za difrakciju

Za izradu geometrije modela simulacije refleksije i podloge za difrakciju 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 difrakcije koristi se mreža s 708 aktivnih elemenata i 373 čvora, dok mreža za refleksiju, zbog nešto složenije geometrije, ima 442 elementa i 252 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 4.19 Mreža konačnih elemenata za difrakciju



Slika 4.20 Mreža konačnih elemenata za refleksiju

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 - Difrakcija

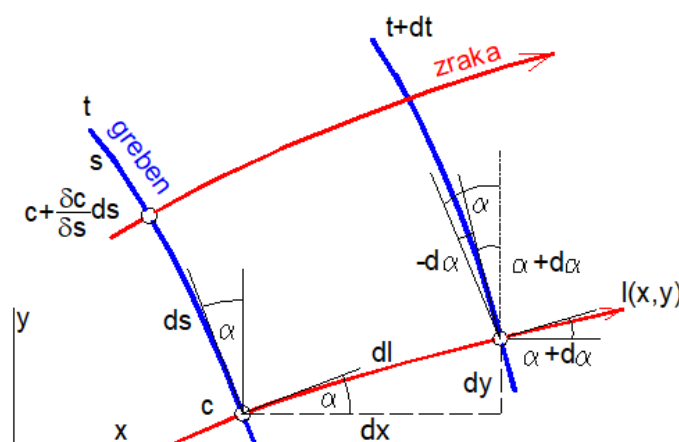
<b>N</b>	<b>H (mm)</b>	<b>T (s)</b>	<b>T<sub>motora</sub>(s)</b>
1	10.5689	0.20486	0.17
2	14.4197	0.23566	0.2
3	12.297	0.27993	0.25

Tablica 4.2 Ulazni podaci - Refleksija

<b>N</b>	<b>H (mm)</b>	<b>T (s)</b>	<b>T<sub>motora</sub>(s)</b>
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 te dobila podloga za difrakciju u različitim dijelovima 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 4.21 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru

### Jednadžbe 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:

$$dl = c_0 \cdot dt \quad 8$$

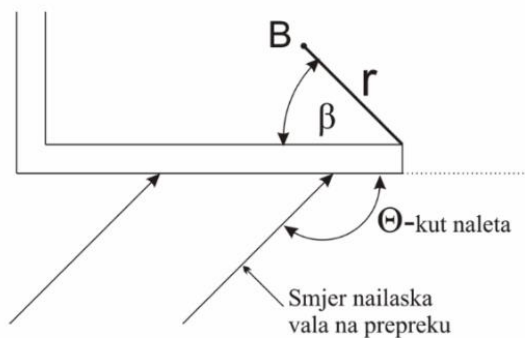
$$dx = c_0 \cdot \cos\alpha \cdot dt \quad 9$$

$$dy = c_0 \cdot \sin\alpha \cdot dt \quad 10$$

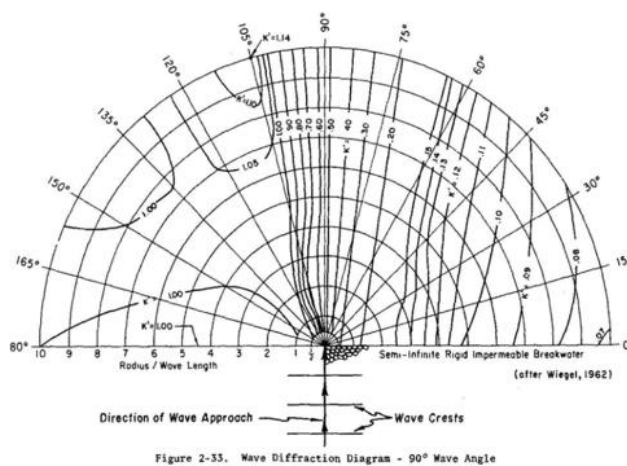
U ovom radu nije se posebno obrađivala refrakcija za koju je karakteristična promjena kuta nailaskom u zonu utjecaja dna, pa je proračun bio baziran na dio refleksije iz modela, a nadalje je Utjecaj difrakcije određen korištenjem Wiegelovih nomograma.

Koeficijenti difrakcije očitani su se iz nomograma prema sljedećim koracima:

1. Prvo se odredi kut incidentnog vala, što je kut koji zraka vala zatvara s osi prepreke, gledano s suprotne strane prepreke.
2. Zatim se odredi relativna udaljenost  $\frac{r}{L}$  do lokacije u zoni sjene gdje se želi ocijeniti koeficijent difrakcije.
3. Nakon toga, definira se kut položaja točke u kojoj se traži procjena valne visine u odnosu na os prepreke.
4. Konačno, iz nomograma (Slika 4.23) se očita koeficijent difrakcije  $K_D$  pomoću ta tri parametra.



Slika 4.22 Određivanje  $K_D$



Slika 4.23 Nomogram za kut naleta  $\theta = 90^\circ$

Dobiveni su sljedeći podaci:

Tablica 4.3 Određivanje koeficijenta difrakcije -  $K_d$

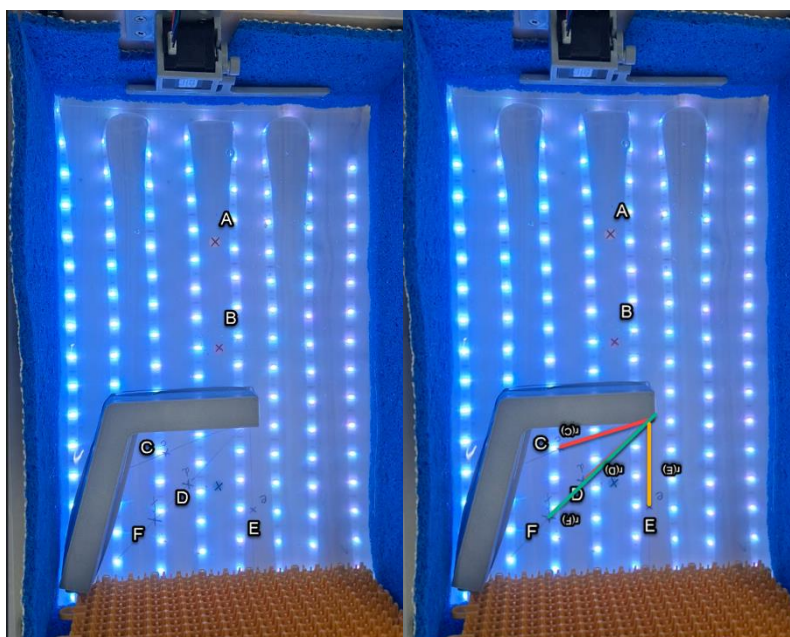
L1 (cm)	6,552	6,552	6,552	6,552
L2 (cm)	8,671	8,671	8,671	8,671
L3 (cm)	12,235	12,235	12,235	12,235
r/L1	1,526	1,526	1,526	2,289
r/L2	1,153	1,153	1,153	1,730
r/L3	0,817	0,817	0,817	1,226
KD1	0,19	0,24	0,5	0,19

Visine vala koje nailaze na model lukobrana dobivene su iz numeričkog modela, a zatim je za odgovarajuće omjere  $r/L$  određen koeficijent difrakcije (Slike 4.22 i 4.23) prikazan u Tablici 4.3

## 5.REZULTATI I USPOREDBA

### 5.1. Difrakcija

U laboratoriju su za difrakciju provedena tri eksperimenta različitih perioda početnog vala  $T = 0.20484, 0,2319, 0,28545$  (s) prema periodu rada elektromotora ( $T_{\text{motora}} = 0.17, 0.2$  i  $0.25$ ), a za svako ispitivanje indirektno su izmjerene visine valova  $H$  u šest različitih točaka (Slika 5.24).



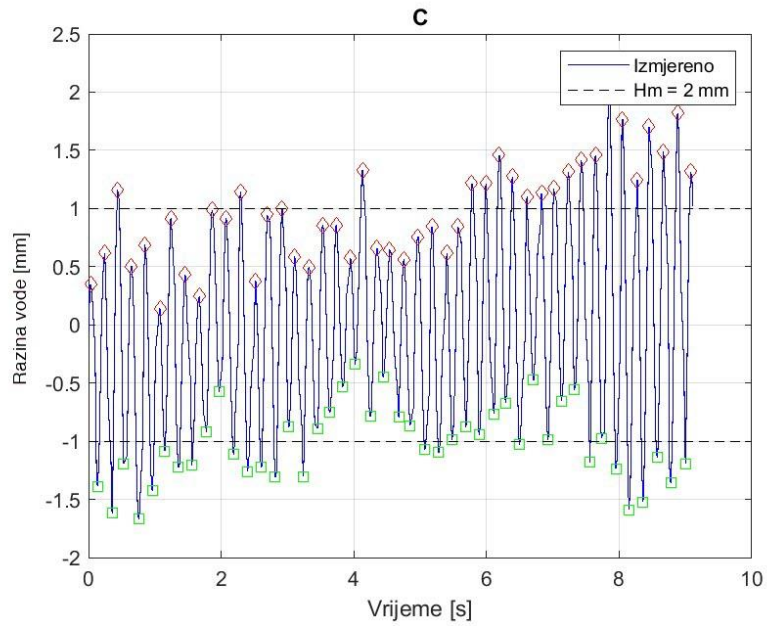
Slika 5.24 Točke mjerenja  $H$  za difrakciju

U točkama A i B izmjerene su iste visine valova i pokazano je da u njima nema difrakcije.

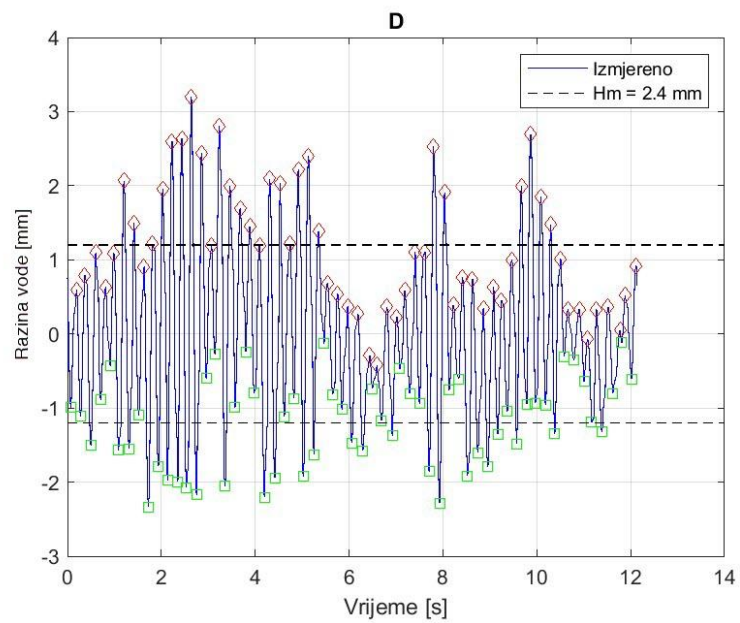
Difrakcija se nikada ne odvija sama; u ovom slučaju, pojavljuje se zajedno s refleksijom. Kada se valovi ogibaju oko lukobrana, istovremeno se dio valova odbija nazad od lukobrana (refleksija).

### EKSPERIMENT 1

Prvi eksperiment u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.20484$ . Rezultati su prikazani u nastavku u obliku vremenskih serija zapisa razine vode (Slike 5.24-5.35).

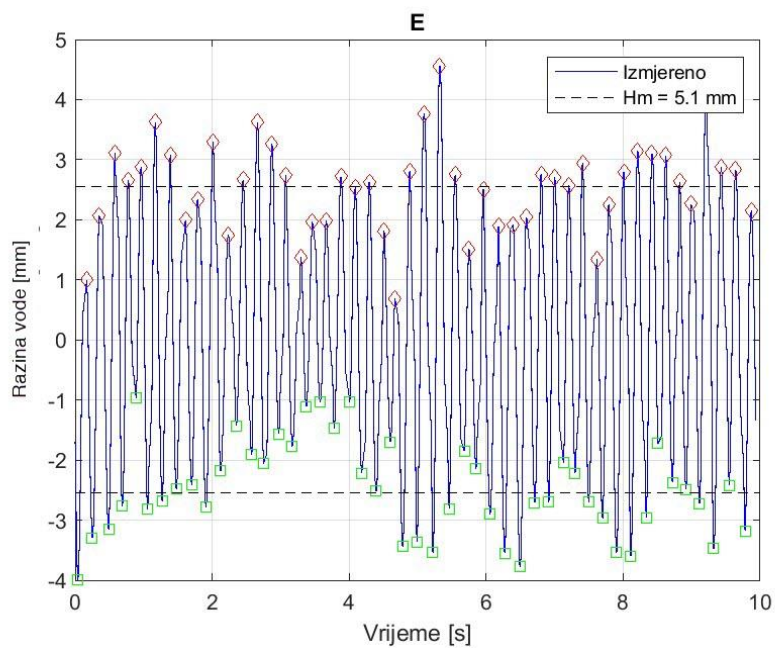


Slika 5.25 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju

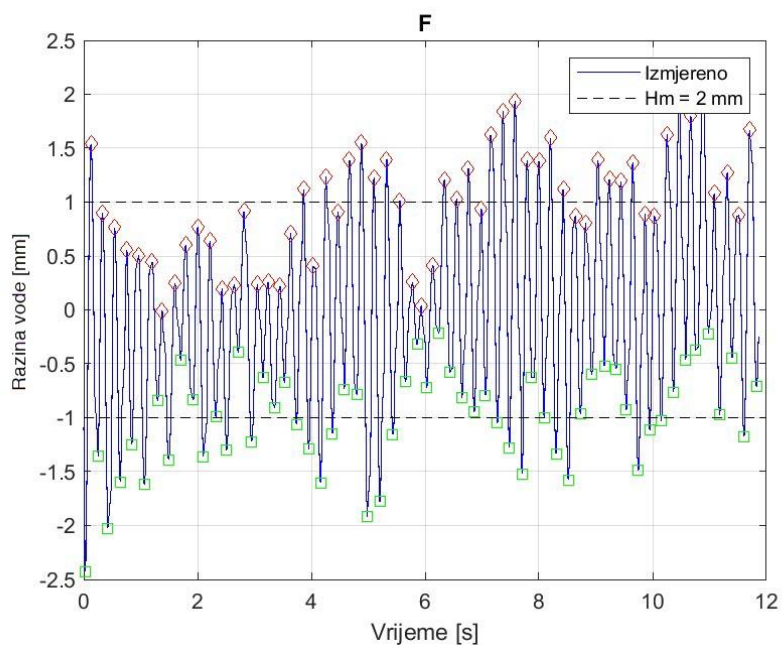


Slika 5.26 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju





Slika 5.27 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju

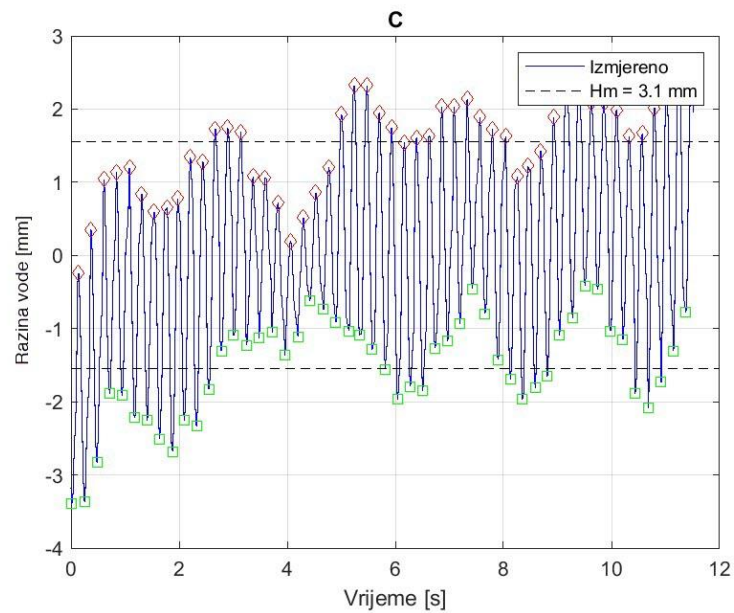


Slika 5.28 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju

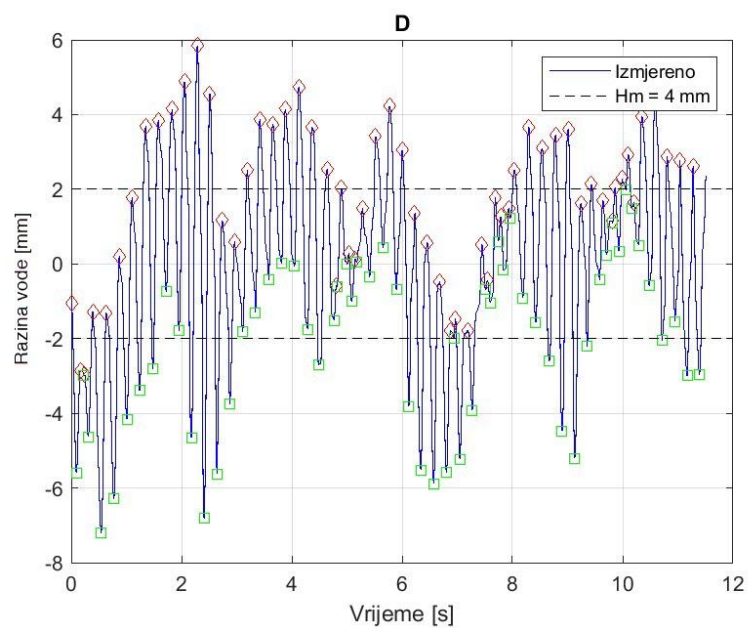


## EKSPERIMENT 2

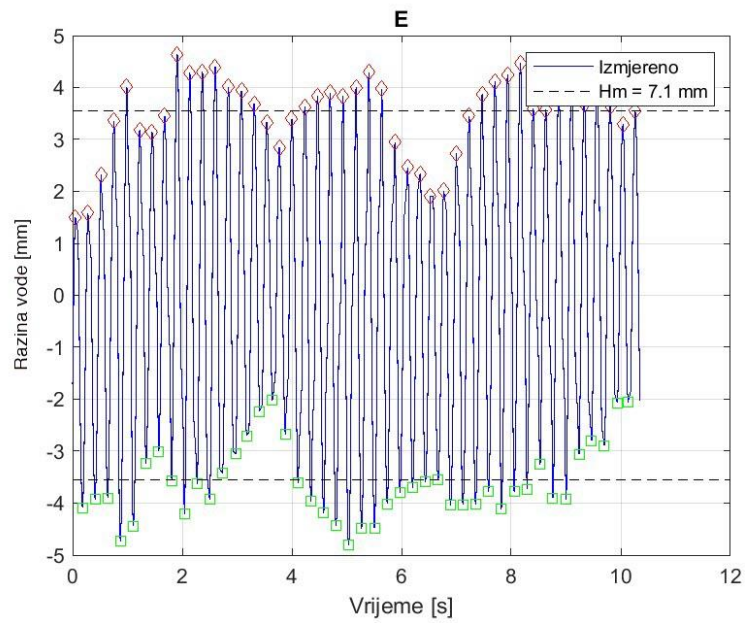
Za drugi eksperiment period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i pripadajući period vala  $T = 0.23566$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



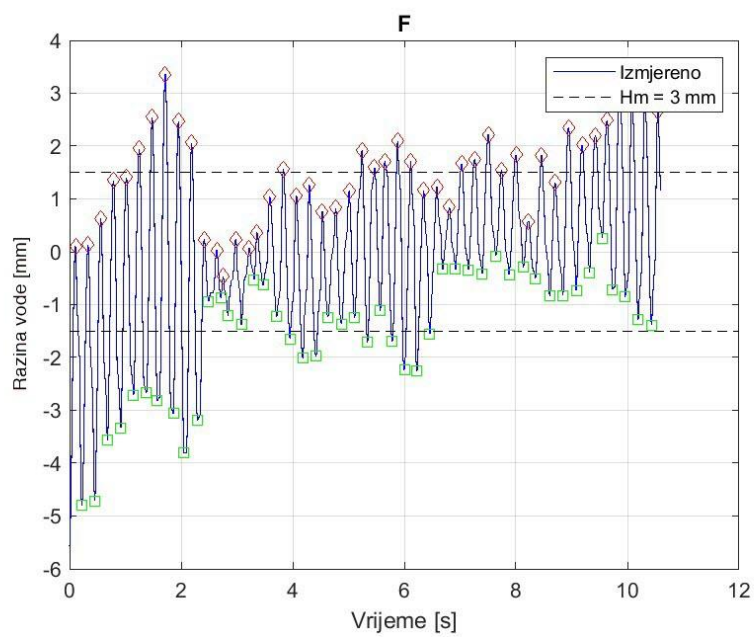
Slika 5.29 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju



Slika 5.30 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju



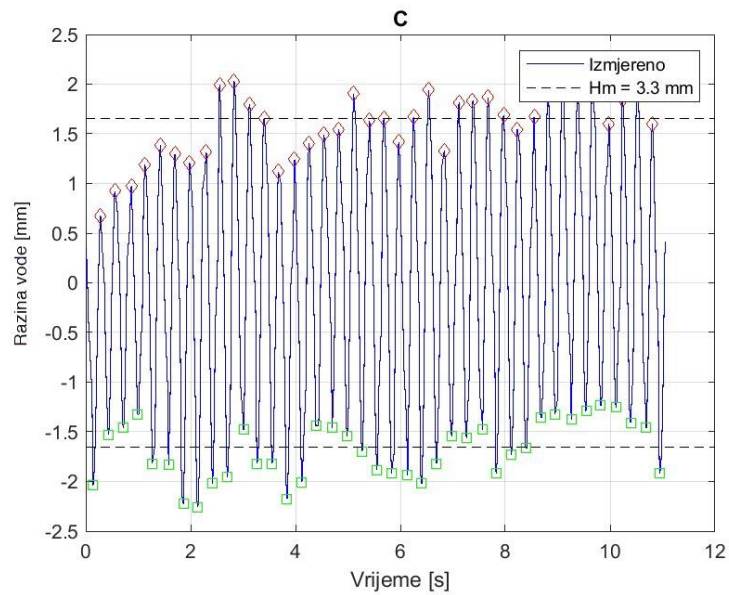
Slika 5.31 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju



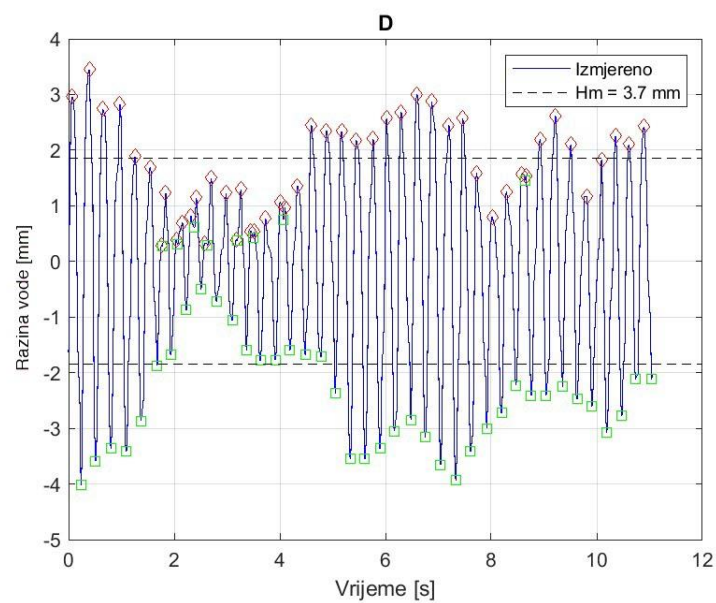
Slika 5.32 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju

**EKSPERIMENT 3**

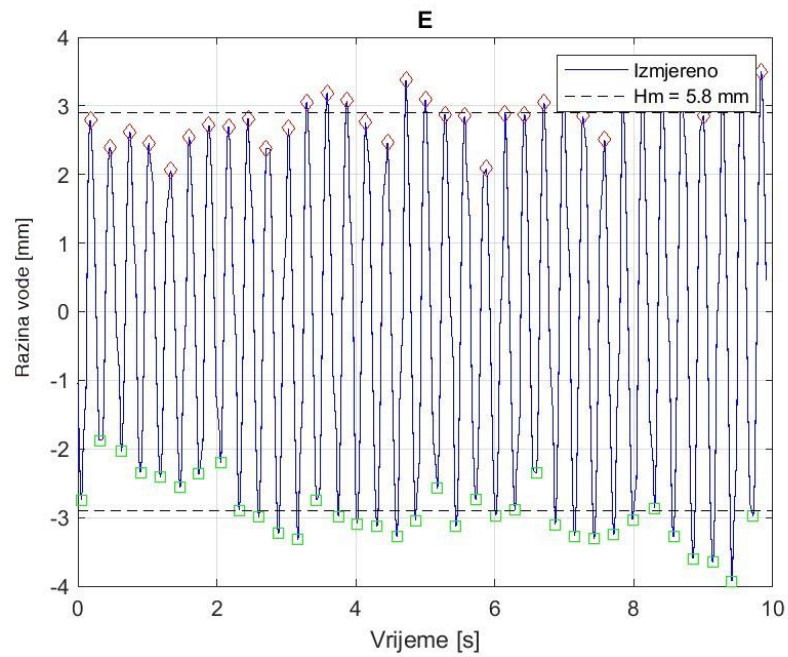
U trećem eksperimentu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i odgovarajući period vala je  $T = 0.7993$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



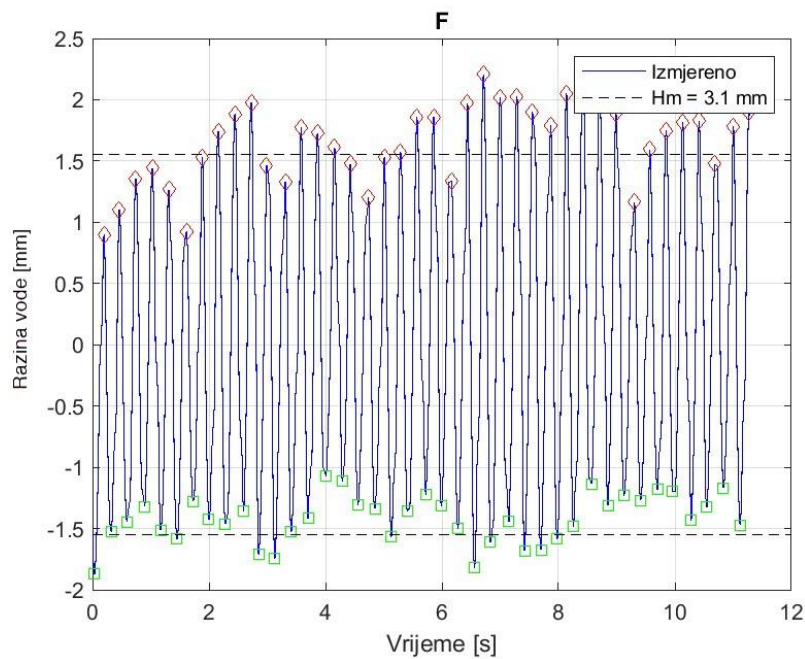
Slika 5.33 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju



Slika 5.34 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju



Slika 5.35 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju

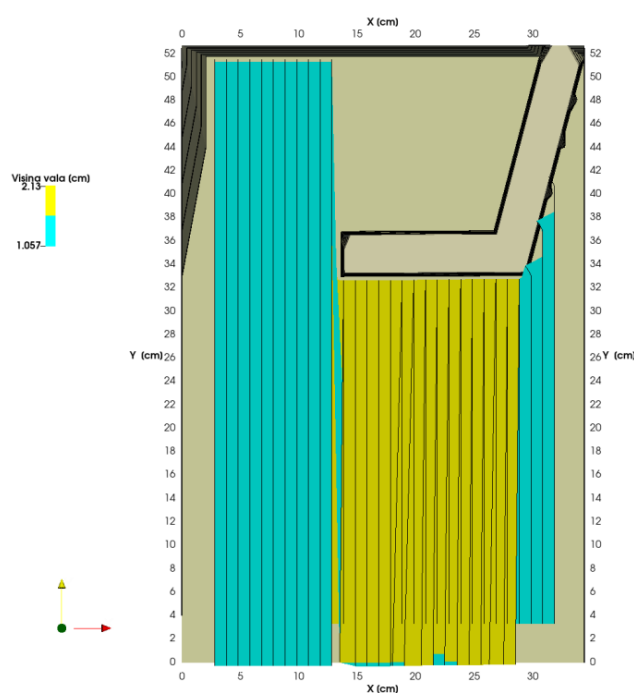


Slika 5.36 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju

Numerički i grafo-analički dio dao je sljedeće rezultate.

## EKSPERIMENT 1

Prvi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.057$  cm, odnosno  $H_0 = 10.57$  mm (Slika 5.37). Koeficijenti difrakcije  $K_d$  su izračunati grafo-analičkom metodom pomoću Wiegel nomograma za kut nailaska od  $90^\circ$  za svaku točku. Visina vala  $H$  je dobivena umnoškom koeficijenta difrakcije  $K_d$  i početne visine vala  $H_0$ , odnosno koristeći jednadžbu (3).



Slika 5.37 Eksperiment 1, numerički model

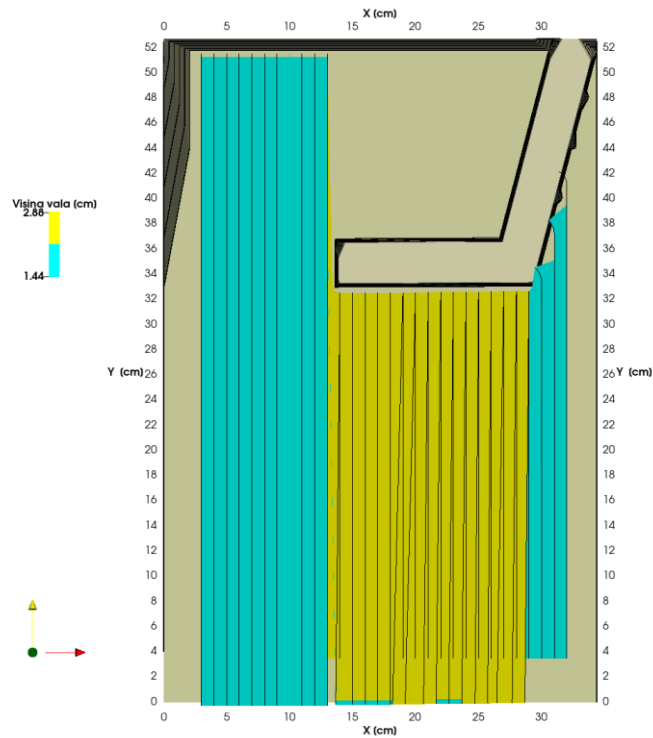
Dobiveni koeficijenti difrakcije u prvom ispitivanju su  $K_{dC} = 0.19$ ,  $K_{dD} = 0.24$ ,  $K_{dE} = 0.5$  i  $K_{dF} = 0.19$ . Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5.38.

C	0,201
D	0,254
E	0,528
F	0,201

Slika 5.38 Eksperiment 1, visine vala  $H$  (cm)

## EKSPERIMENT 2

Drugi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.44197$  cm, odnosno  $H_0 = 14.42$  mm (Slika 5.39).



Slika 5.39 Eksperiment 2, numerički model

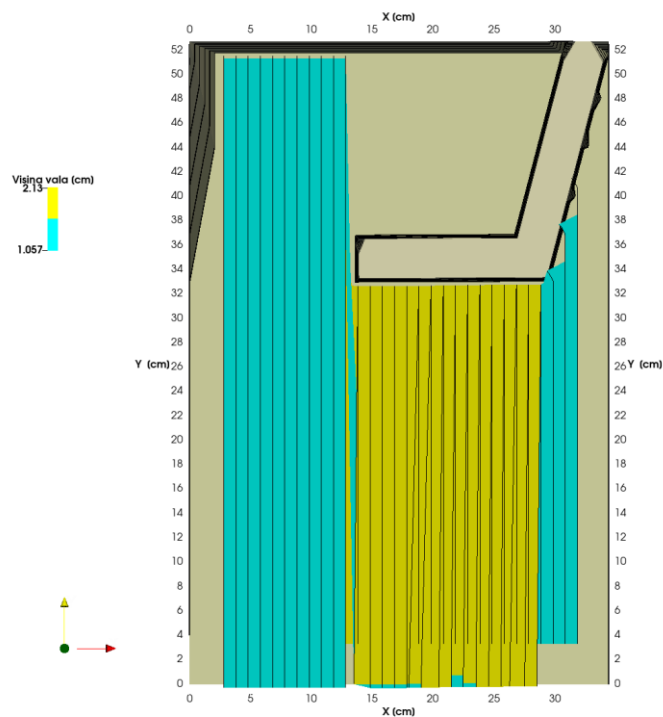
Dobiveni koeficijenti difrakcije u prvom ispitivanju su  $Kd_C = 0.23$ ,  $Kd_D = 0.28$ ,  $Kd_E = 0.5$  i  $Kd_F = 0.21$ . Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5.40.

C	0,332
D	0,404
E	0,721
F	0,303

Slika 5.40 Eksperiment 2, visine vala  $H$  (cm)

### EKSPERIMENT 3

Treći eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.2297$  cm, odnosno  $H_0 = 12.3$  mm (Slika 5.41). Dobiveni koeficijenti difrakcije u prvom ispitivanju su  $Kd_C = 0.27$ ,  $Kd_D = 0.3$ ,  $Kd_E = 0.5$  i  $Kd_F = 0.27$ .



Slika 5.41 Eksperiment 1, numerički model

Visine vala za svaku točku su prikazane na Slika 5.42.

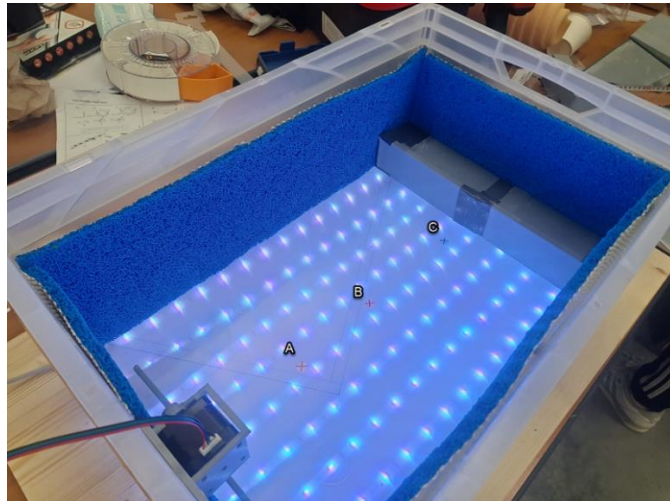
C	0,332
D	0,369
E	0,615
F	0,332

Slika 5.42 Eksperiment 3, visine vala  $H$  (cm)



## 5.2. Refleksija

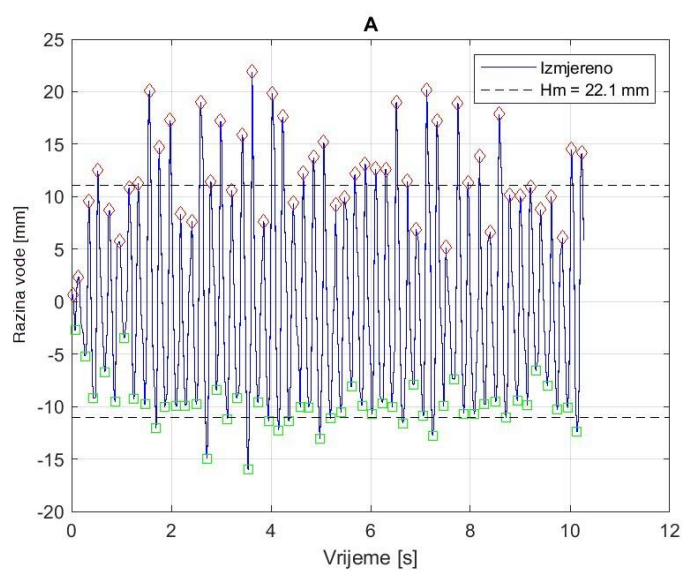
U laboratoriju su za refleksiju provedena tri eksperimenta za valove različitih perioda  $T = 0.20532$ ,  $0.23177$ ,  $0.27963$  (s) i  $T_{\text{motora}} = 0.17$ ,  $0.2$  i  $0.25$  (s), te za svako ispitivanje izmjerene su visine valova  $H$  u tri različite točke (Slika 5.43).



Slika 5.43 Točke mjerenja  $H$  za refleksiju

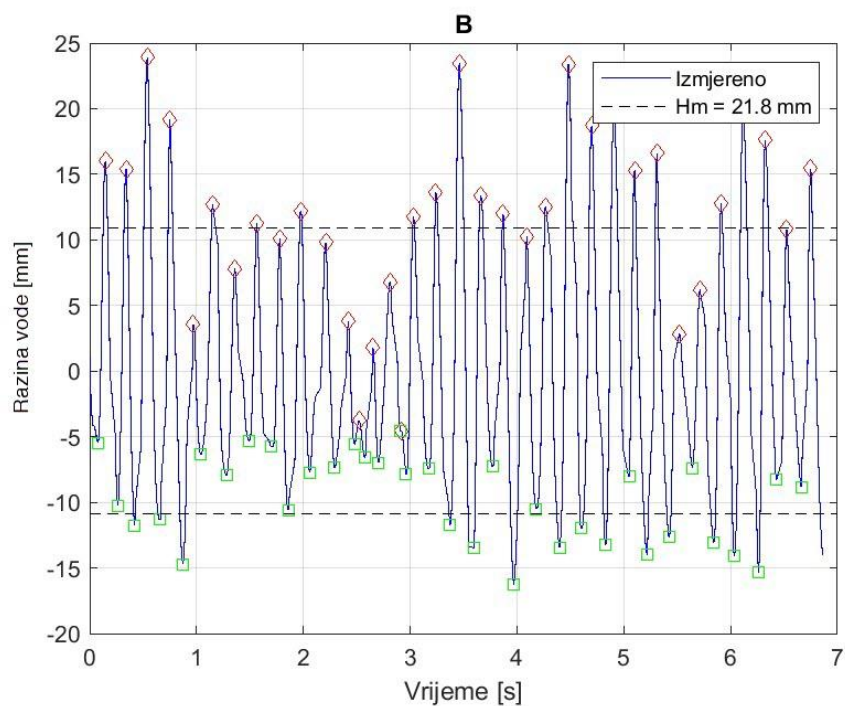
### EKSPERIMENT 1

Prvi eksperiment u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i odgovarajućim periodom vala  $T = 0.20532$ . Rezultati su prikazani u nastavku.

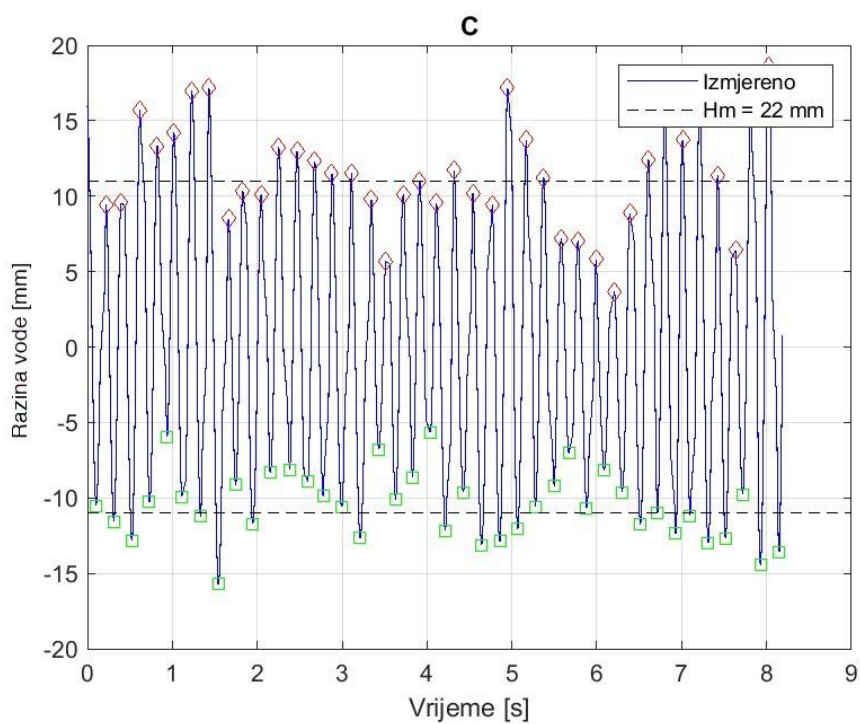


Slika 5.44 Točka A za refleksiju





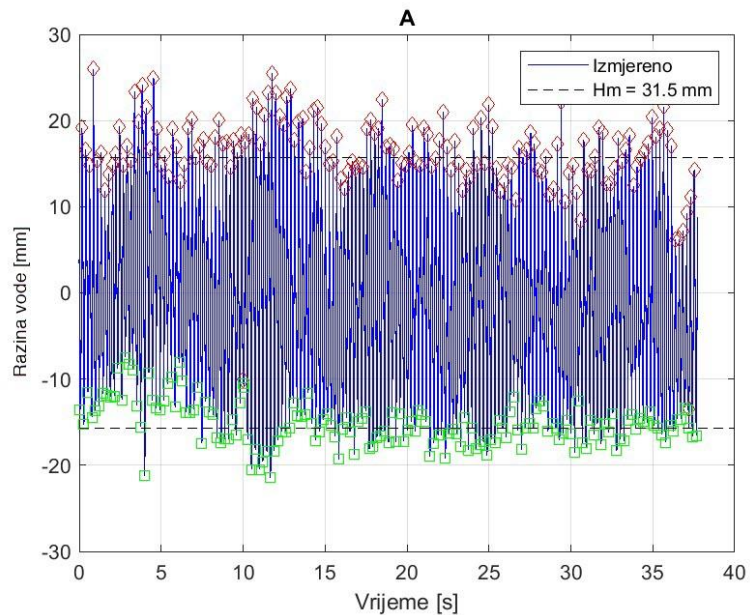
Slika 5.45 Točka B za refleksiju



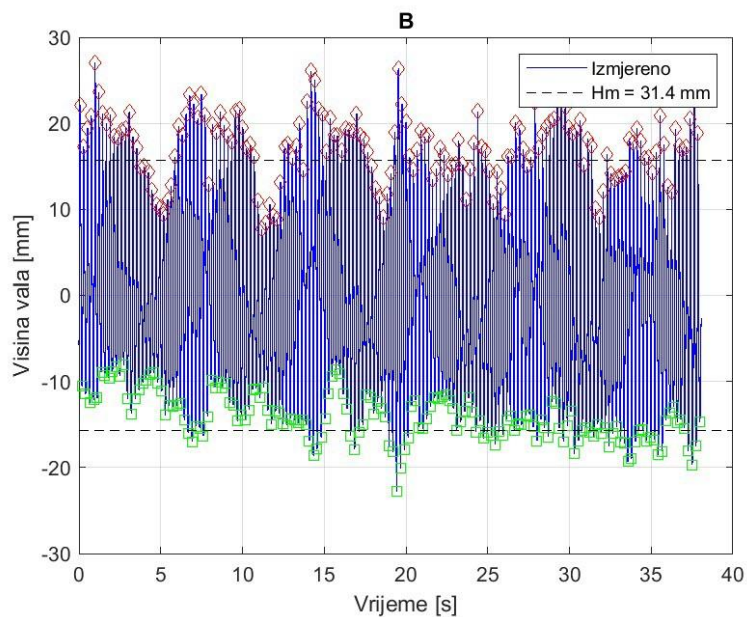
Slika 5.46 Točka C za refleksiju

**EKSPERIMENT 2**

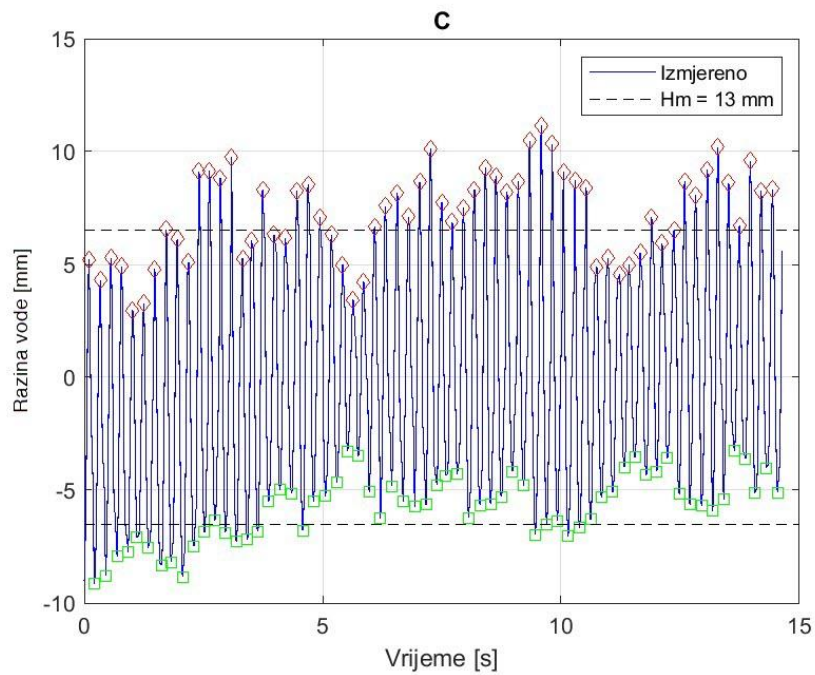
Za drugi eksperiment period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i relevantnim periodom vala  $T = 0.23177$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.47 Točka A za refleksiju



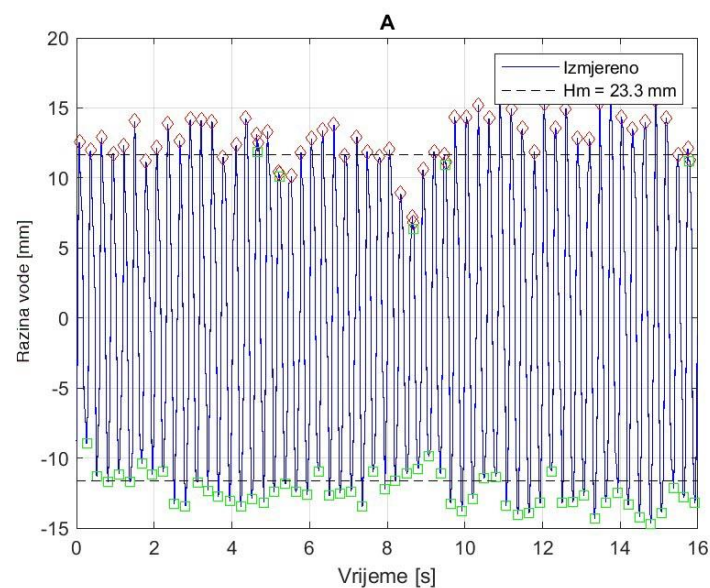
Slika 5.48 Točka B za refleksiju



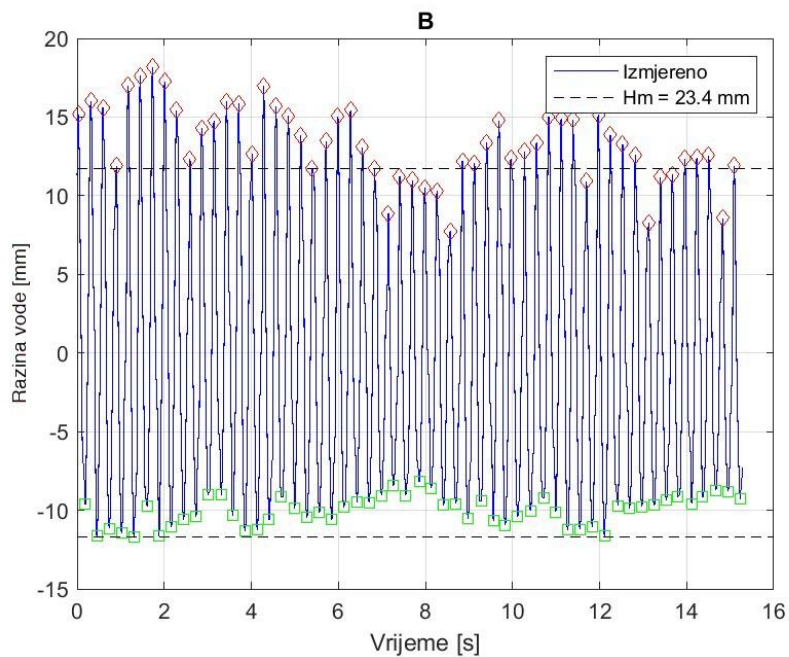
Slika 5.49 Točka C za refleksiju

### EKSPERIMENT 3

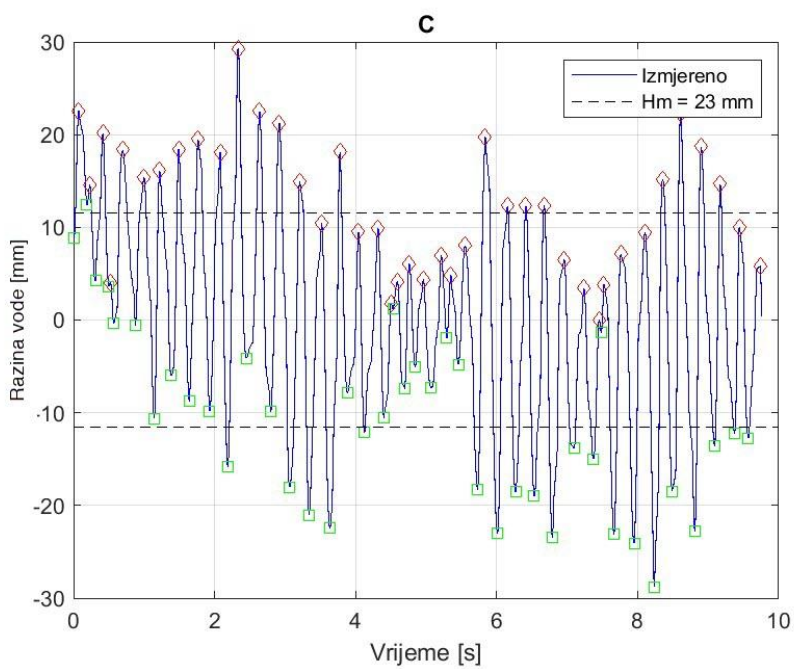
U trećem eksperimentu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i period vala  $T = 0.27963$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.50 Točka A za refleksiju



Slika 5.51 Točka B za refleksiju

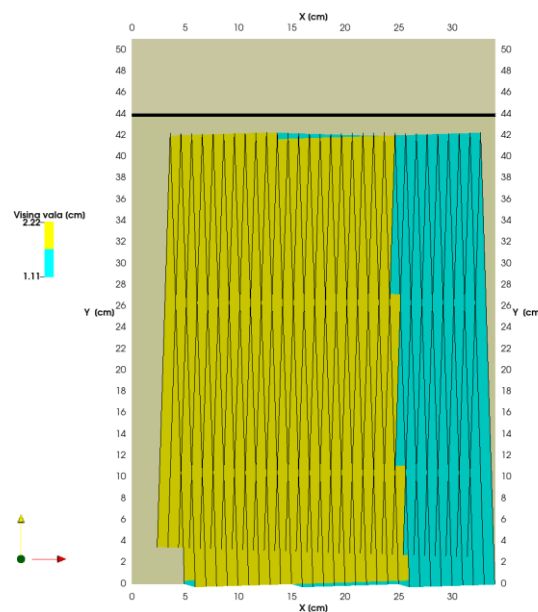


Slika 5.52 Točka C za refleksiju

Numerički i grafo-analitički dio dao je sljedeće rezultate. Visina vala je dobivena umnoškom početne visine vala  $H_0$  i  $K_{\text{refl}}$ , odnosno koristeći jednadžbu (7). Koeficijent refleksije iznosi  $K_{\text{refl}} = 1$  što je najnepovoljnije stanje. Uzevši u obzir značajnu glatkoću i nepropusnost 3D maketa dobiven je preduvjet za potpunu refleksiju.

## EKSPERIMENT 1

Prvi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.1157$  cm, odnosno  $H_0 = 11,12$  mm (Slika 5.53 ).

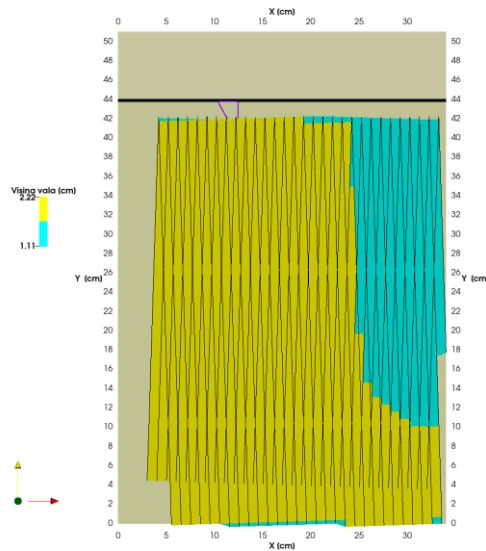


Slika 5.53 Eksperiment 1, numerički model

Visine vala u svim točkama su iste jer je isti  $K_{\text{refl}}$  i iznose  $H = 2.22$  cm, tj.  $H = 22.2$  mm.

## EKSPERIMENT 2

Drugi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.58486$  cm, odnosno  $H_0 = 15.85$  mm (Slika 5.54).

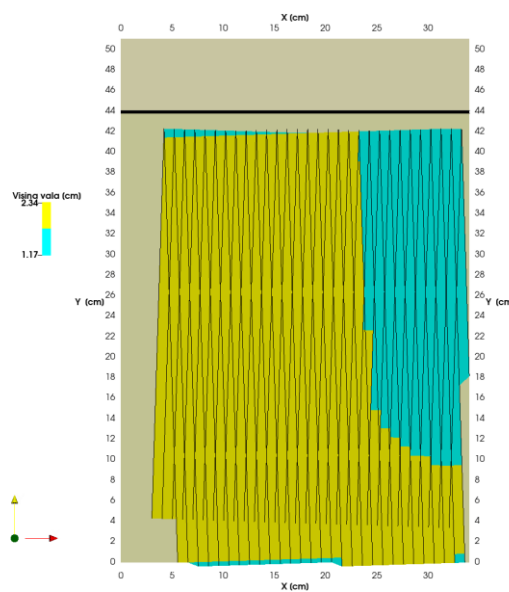


Slika 5.54 Eksperiment 2, numerički model

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

### EKSPERIMENT 3

Treći eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.17431$  cm, odnosno  $H_0 = 11.74$  mm (Slika 5.55).



Slika 5.55 Eksperiment 3, numerički model

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

Tablica 5.4 Usporedba rezultata difrakcije

<i>N (eksperiment)</i>	<i>Točka mjerenja</i>	<i>Fizikalni model</i>	<i>Numerički i grafo-analitički model</i>
		<i>H (mm)</i>	<i>H (mm)</i>
1	C	2.00	2.01
	D	2.40	2.54
	E	5.10	5.28
	F	2.00	2.01
2	C	3.10	3.32
	D	4.00	4.04
	E	7.10	7.21
	F	3.00	3.03
3	C	3.30	3.32
	D	3.70	3.69
	E	5.80	6.15
	F	3.10	3.32

Tablica 5.5 Usporedba rezultata refleksije

<i>N (eksperiment)</i>	<i>Točka mjerenja</i>	<i>Fizikalni model</i>	<i>Numerički model</i>
		<i>H (mm)</i>	<i>H (mm)</i>
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 rad temelji se na usporedbi i svojevrsnoj integraciji fizikalnog i numeričkog modeliranja radi proučavanja refleksije i difrakcije 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 refleksiju koja nije prisutna u otvorenom moru.

Numerički modeli, iako fleksibilni, također imaju ograničenja. Za precizno izračunavanje difrakcije korištena je grafo-analitička metoda zbog složenosti simulacije nelinearnih efekata i rubnih uvjeta. 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 primjeru dvije valne zrake i promjene dubine .9	
Slika 2.3 Tipovi difrakcije valova (Waves   DP Physics - IB Recap, n.d.).....	12
Slika 2.4 Refleksija (revisionscience-wave-behaviour).....	13
Slika 3.5 Bazen za fizikalni model.....	17
Slika 3.6 3D prikaz modela obale u Autocad-u .....	19
Slika 3.7 3D isprintani modeli obale.....	19
Slika 3.8 Prikaz bazena s korištenom lopaticom, spužvom, elektromotorom i LED svjetlima...20	
Slika 3.9 Prikaz mjerenja razine vode pomoću elektro-otpornog senzora.....	20
Slika 3.10 Kalibracijska krivulja.....	21
Slika 3.11 Postavke fizikalnog modela za simulaciju difrakcije.....	22
Slika 3.12 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17$ .....	22
a).....	23
b).....	23
Slika 3.13 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$ a) Spektar b) Prebrojani valovi zero-up metodom.....	23
Slika 3.14 Eksperiment 2 $T_{\text{motora}}=0.2\text{s}$ .....	23
Slika 3.15 Eksperiment 3 $T_{\text{motora}}=0.25\text{s}$ .....	24
Slika 3.16 Eksperiment 1 $T_{\text{motora}}=0.17\text{s}$ .....	24
Slika 3.17 Eksperiment 2 $T_{\text{motora}}=0.2\text{s}$ .....	24
Slika 3.18 Test 3 $T_{\text{motora}}=0.25\text{s}$ .....	25
Slika 4.19 Mreža konačnih elemenata za difrakciju .....	28
Slika 4.20 Mreža konačnih elemenata za refleksiju.....	29
Slika 4.21 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru .....	30
Slika 4.22 Određivanje $K_D$ .....	31
Slika 4.23 Nomogram za kut naleta $\theta = 90^\circ$ .....	31
Slika 5.24 Točke mjerenja H za difrakciju.....	33
Slika 5.25 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju.....	34
Slika 5.26 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju.....	34
Slika 5.27 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju .....	35
Slika 5.28 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju .....	35

Slika 5.29 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju.....	36
Slika 5.30 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju.....	36
Slika 5.31 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju .....	37
Slika 5.32 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju .....	37
Slika 5.33 Vremenski zapis razine vode na točki C za difrakciju.....	38
Slika 5.34 Vremenski zapis razine vode na točki D za difrakciju.....	38
Slika 5.35 Vremenski zapis razine vode na točki E za difrakciju .....	39
Slika 5.36 Vremenski zapis razine vode na točki F za difrakciju .....	39
Slika 5.37 Eksperiment 1, numerički model .....	40
Slika 5.38 Eksperiment 1, visine vala H (cm).....	40
Slika 5.39 Eksperiment 2, numerički model .....	41
Slika 5.40 Eksperiment 2, visine vala H (cm).....	41
Slika 5.41 Eksperiment 1, numerički model .....	42
Slika 5.42 Eksperiment 3, visine vala H (cm).....	42
Slika 5.43 Točke mjerenja H za refleksiju .....	43
Slika 5.44 Točka A za refleksiju .....	43
Slika 5.45 Točka B za refleksiju .....	44
Slika 5.46 Točka C za refleksiju .....	44
Slika 5.47 Točka A za refleksiju .....	45
Slika 5.48 Točka B za refleksiju .....	45
Slika 5.49 Točka C za refleksiju .....	46
Slika 5.50 Točka A za refleksiju .....	46
Slika 5.51 Točka B za refleksiju .....	47
Slika 5.52 Točka C za refleksiju .....	47
Slika 5.53 Eksperiment 1, numerički model .....	48
Slika 5.54 Eksperiment 2, numerički model .....	49
Slika 5.55 Eksperiment 3, numerički model .....	49
Tablica 4.1 Ulazni podaci - Difrakcija .....	29
Tablica 4.2 Ulazni podaci - Refleksija .....	29
Tablica 4.3 Određivanje koeficijenta difrakcije - $K_d$ .....	32
Tablica 5.4 Usporedba rezultata difrakcije .....	50
Tablica 5.5 Usporedba rezultata refleksije .....	50

## **8.LITERATURA**

- [1] Srzić, V. , Galešić, M., Predavanja i vježbe iz kolegija Pomorske građevine, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu (2020.)
- [2] Galešić, M., Elaborat vjetrovalne klime i studija valovanja – Luka Stinice, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, (2019.)
- [3] Reeve D., Chadwick A., Fleming C., Coastal Engineering; Processes, theory and design practice, (2004.)
- [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>