

# Usporedba numeričkog i fizikalnog modela refrakcije i uplićavanja valnog polja

---

Orlić, Ivo

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:123:949534>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*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**

**Ivo Orlić**

**Split, 2024.**

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

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

**Završni rad**

**Split, 2024.**

# Usporedba numeričkog i fizikalnog modela refrakcije i uplićavanja valnog polja

## *Sažetak:*

Ovaj završni rad istražuje fenomene refrakcije i uplićavanja valnog polja kroz dva pristupa: fizikalni i numerički model programiran u MATLAB-u. Fizikalni model koristi pravokutnu plastičnu kutiju dimenzija 34 x 54 cm, LED rasvjetu, spužvu za sprječavanje refleksije valova, mini modele obale napunjene cementnom pastom, električni motor s lopaticom za generiranje valova i digitalni mjerač razine vode. Eksperimenti su provedeni postavljanjem različitih prepreka i modela obale kako bi se proučili fenomeni refrakcije i uplićavanja, pri čemu su se indirektno mjerile visine valova. Numerički model za izračunavanje refrakcije i uplićavanja implementiran je u MATLAB-u, koristeći diskretizaciju prostorne domene pomoću trokutastih konačnih elemenata. Cilj rada je usporediti rezultate dobivene iz fizikalnih eksperimenata s onima iz numeričkih simulacija te analizirati točnost i učinkovitost oba pristupa. Naši rezultati su pokazali visoku razinu podudarnosti između fizikalnog i numeričkog modela, uzimajući u obzir moguća odstupanja zbog eksperimentalnih ograničenja i numeričkih aproksimacija. Zaključno, rad istražuje i ukazuje na prednosti i izazove oba pristupa u analizi ponašanja valnog polja uslijed procesa refrakcije i uplićavanja.

***Cljučne riječi:*** refrakcija, uplićavanje, fizikalni model, numerički model, MATLAB, valno polje, eksperimentalna analiza, simulacija valova

## Comparison of numerical and physical models of wave field refraction and shoaling

### *Abstract:*

This thesis investigates the phenomena of refraction and shoaling in wave fields through two approaches: a physical model and a numerical model programmed in MATLAB. The physical model utilizes a rectangular plastic box measuring 34 x 54 cm, LED lighting, a sponge to prevent wave reflection, mini coastal models filled with cement paste, an electric motor with a paddle for generating waves, and a digital water level meter. Experiments were conducted by placing various obstacles and coastal models to study the phenomena of refraction and shoaling, indirectly measuring wave heights. The numerical model for calculating refraction and shoaling was implemented in MATLAB, using spatial domain discretization with triangular finite elements. The aim of this paper is to compare the results obtained from physical experiments with those from numerical simulations and to analyze the accuracy and efficiency of both approaches. Our results showed a high level of correspondence between the physical and numerical models, taking into account possible deviations due to experimental limitations and numerical approximations. In conclusion, the paper explores and highlights the advantages and challenges of both approaches in analyzing wave field behavior due to the processes of refraction and shoaling.

***Key words:*** refraction, shoaling, numerical model, MATLAB, waves, experimental analysis, wave simulation

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

**STUDIJ: PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT: Ivo Orlić**

**MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083228591**

**KATEDRA: Katedra za privrednu hidrotehniku**

**PREDMET: Pomorske građevine**

### **ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

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

**Opis zadatka: Ovaj rad će se fokusirati na analizu uplićavanja i refrakcije valova koristeći fizikalni model male skale i numerički model. Cilj je usporediti rezultate dobivene eksperimentalnim mjerenjima s numeričkim modelom.**

**Rad treba sadržavati:**

- **Izradu fizikalnog modela male skale za prikaz djelovanja morskih valova pri dolasku na obalu koja izaziva uplićavanje i refrakciju.**
- **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 uplićavanja i refrakcije.**
- **Izradu numeričkog modela za dva tipa obale i proračun za tri različite dolazne visine vala.**
- **Usporedbu rezultata numeričkog modela 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

1.1. UVOD.....	6
2.2. OPIS VALNE TRANSFORMACIJE REFRAKCIJE I UPLIĆAVANJA .....	7
2.1. Općenito o morskim valovima i njihovom nastanku .....	7
2.2. Transformacije valnog polja .....	8
2.3. Refrakcija .....	11
2.4. Uplićavanje.....	14
2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja refrakcije.....	16
2.6. Primjena i važnost procjene utjecaja uplićavanja.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>
3.3. FIZIKALNI MODEL ZA REFRAKCIJU I UPLIĆAVANJE .....	17
3.1. Osnove fizikalnih modela .....	17
3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela.....	18
3.3. Provedeni eksperiment za refrakciju i uplićavanje .....	23
3.4. Ograničenja fizikalnog modela.....	27
4.4. NUMERIČKI I GRAFO-ANALITIČKI MODEL TRANSFORMACIJA VALNOG POLJA .....	29
4.1. Osnove numeričkog modela .....	29
4.2. Postavke numeričkog modela za refrakciju i uplićavanje .....	30
5.5. REZULTATI I USPOREDBA .....	34
5.1. Refrakcija .....	34
5.2. Uplićavanje.....	50
6.6. ZAKLJUČAK.....	65
7.7. POPIS TABLICA I SLIKA.....	66
8.8. LITERATURA .....	69

## 1.UVOD

Cilj ovog završnog rada je istražiti fenomene **refrakcije i uplićavanja valnog polja** kroz integraciju **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. To dovodi do potrebe za preciznim modeliranjem i simulacijama koje mogu predvidjeti kako će se valovi ponašati u različitim scenarijima. Problemi u proračunima mogu proizaći iz nedovoljno preciznih modela ili nepotpunog razumijevanja interakcije valova s okolinom.

Integracija fizikalnih eksperimenata u kontroliranom okruženju s numeričkim simulacijama pruža sveobuhvatan uvid u ponašanje valova. Fizikalni model omogućuje direktno mjerenje fenomena, dok numerički model pruža fleksibilnost u variranju parametara i uvjeta. Kombinacija ova dva pristupa omogućuje validaciju numeričkih algoritama i teorijskih predviđanja na temelju stvarnih eksperimentalnih podataka.

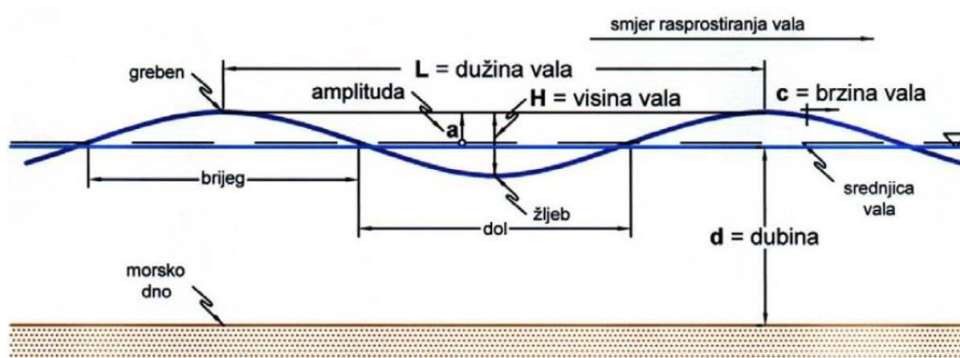
Ovaj rad je integrirao eksperimentalno i numeričko istraživanje kako bi se detaljno proučili fenomeni refrakcije i uplićavanja valnog polja. Postignut je visok stupanj podudarnosti između rezultata fizikalnih eksperimenata i numeričkih simulacija, što potvrđuje valjanost i primjenjivost predloženih modela 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 REFRAKCIJE I UPLIĆAVANJA

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

Morski valovi su složen fenomen koji nastaje iz periodičnih oscilacija površine mora. Ova osciliranja javljaju se zbog djelovanja različitih sila na vodene čestice. Pobuđujuće sile koje uzrokuju ove oscilacije mogu biti potaknute raznim čimbenicima, uključujući vjetar, gibanje plovila, interakciju s drugim tijelima u moru, te promjene u gravitacijskom polju uzrokovane nebeskim tijelima ili seizmičkim poremećajima. S druge strane, umirujuće sile djeluju na stabilizaciju valova. To uključuje površinsku napetost zbog privlačnih sila između vodenih molekula, gravitaciju koja djeluje na vodenu masu, te Coriolisovu silu koja proizlazi iz rotacije Zemlje. Ova složena ravnoteža između pobuđujućih i umirujućih sila rezultira raznolikim oblicima i veličinama valova koje vidimo na površini mora.

Osnovni parametri vala uključuju valnu visinu  $H$  izraženu u metrima, koja predstavlja vertikalnu udaljenost od dna (žlijeba) do vrha (grebena) vala. Valna duljina  $L$ , također izražena u metrima, predstavlja horizontalnu udaljenost između dva uzastopna grebena. Valni period  $T$ , izražen u sekundama, predstavlja vremenski interval 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  $L$  su parametri vala koji se mijenjaju s dubinom, dok period  $T$  ostaje nepromijenjen s dubinom.



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



Valovi se mogu klasificirati prema duljini brijegova i dolova. Valovi kratkog perioda imaju kraće vremenske intervale između uzastopnih vrhova ili dolina. Obično nastaju lokalno pod utjecajem kratkotrajnih vjetrova ili oluja, te su često primjetni na plićim vodama. S druge strane, valovi dugih perioda imaju dulje intervale između vrhova i dolina. Njihovi uzroci mogu biti globalnijeg karaktera, poput udaljenih vjetrova ili seizmičke aktivnosti. Takvi valovi mogu prijeći tisuće kilometara prije nego što stignu na obalu. Primjerice, tsunami valovi su ekstreman oblik valova dugih perioda koji se generiraju seizmičkim poremećajima, kao što su potresi na morskom dnu ili podvodna klizišta. Imaju izuzetno dug period između vrhova i mogu preći velike udaljenosti preko oceana prije nego što dođu do obale. Ova razlika u periodima među valovima dovodi do različitih karakteristika valova i njihovih različitih utjecaja na okoliš i obalne regije. Najčešći i najvažniji za analizu i projektiranje, posebno u Mediteranu i Hrvatskoj, su vjetrovni valovi koji spadaju u valove kratkih perioda do 15s. Vjetrovni val nastaje na dodirnoj površini 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 (uz napomenu da se te mogu ostvariti i u dubokom moru).

**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-visina vala

 $H_0$ -početna dubokovodna visina vala

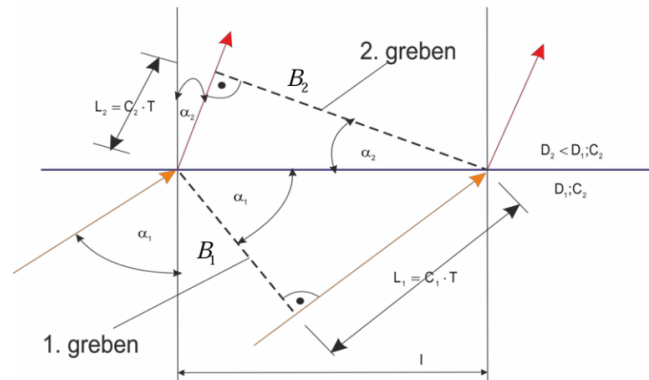
n-omjer brzine grupe valova i jednog vala

 $n_0$ -početni omjer brzine grupe valova i jednog vala

c-brzina vala

 $c_0$ -početna brzina vala $c_g$ -brzina grupe valova $c_{g0}$ - početna brzina grupe valova $K_s$ -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 zrake 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 Snell-ov zakon

**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 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.

Lom vala i transmisija nisu obuhvaćeni u ovom radu.

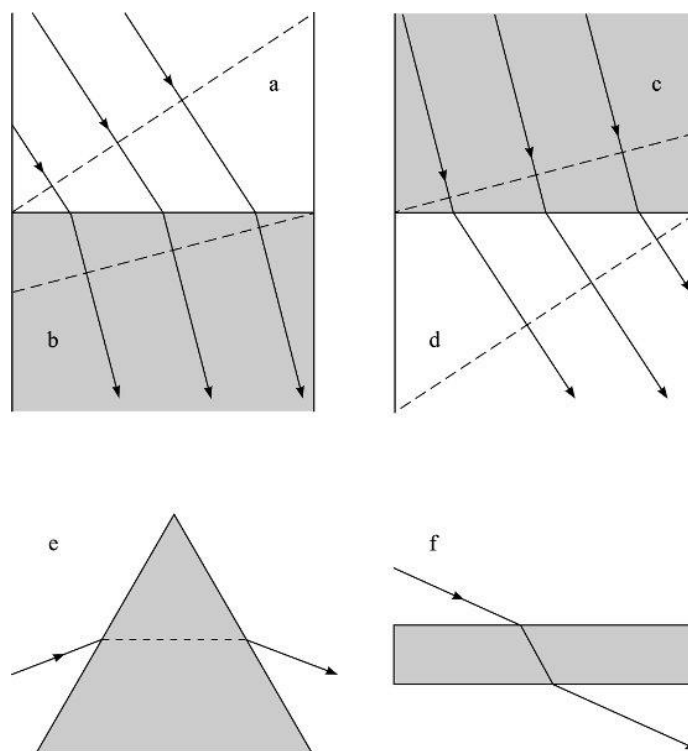
### 2.3. Refrakcija

Kod refrakcije valova zrake vala formiraju kut veći od nula stupnjeva s normalom na obalu. Kako valovi putuju prema obali, njihov kut postupno se smanjuje kako se približavaju, sve do trenutka dodira s obalom kada se zraka vala podudara s normalom na obalnu crtu. Ovaj fenomen nastaje zbog promjene dubine mora kako valovi prilaze obali.

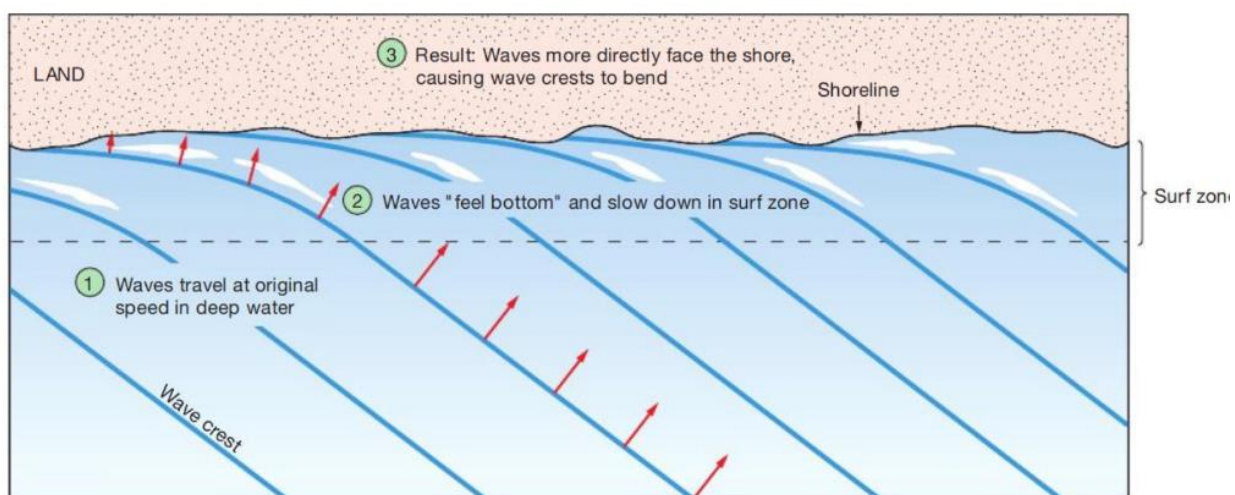
Refrakcija valova duž nepravilne obale neujednačeno raspoređuje energiju duž obale. Na rtovima dolazi do konvergencije valova, dok se u uvalama događa rasipanje energije. Proces refrakcije valova može se opisati kako slijedi: valna brzina valova, koja ovisi o dubini mora, opada proporcionalno smanjenju dubine. Krivulje koje predstavljaju grebene vala sijeku se s izobatama, što znači da valovi s manjom dubinom mora imaju manju valnu brzinu. Analogno tome, grebeni vala udaljeniji od obalne crte imaju veću valnu duljinu i brzinu.

Ovaj proces rezultira time da greben vala koji dolazi iz dubljeg mora sustiže greben vala u plićem moru zbog veće valne brzine. Na taj način, grebeni vala u blizini obale paralelni su s obalom, a valne zrake koincidiraju s normalama na obalnu crtu.

Iz principa očuvanja energije među zrakama vala dolazi se do koeficijenta refrakcije. Pretpostavka je da izobate nemaju lomova te da se sva energija prenosi uzduž zrake vala, bez protoka energije okomito na zraku.



Slika 2. 3 Promjena kuta valne zrake pri prelasku iz jednog medija u drugi.



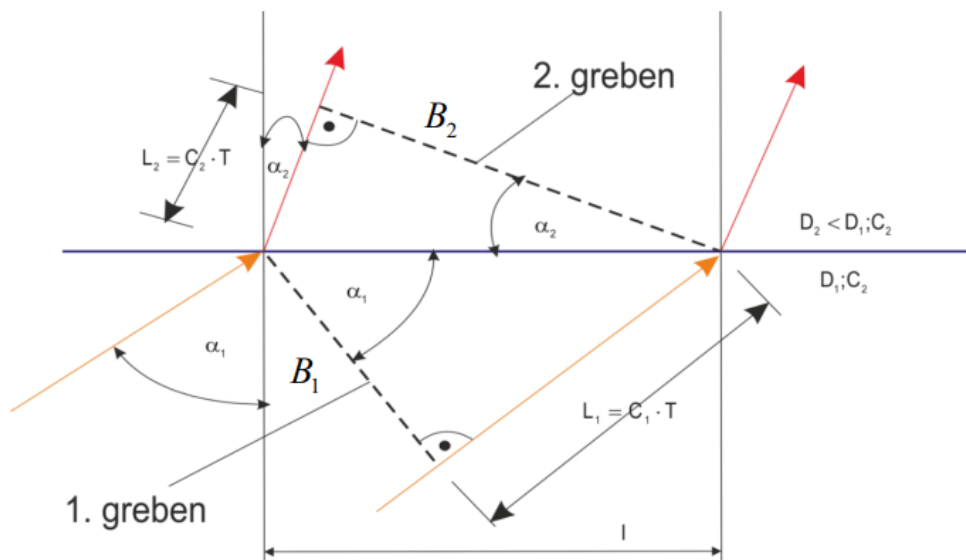
Slika 2. 4 Prikaz refrakcije.

**Snell-ov zakon** definira lom zrake pri prijelazu iz zone u zonu (inače opisuje lom zraka svjetlosti kroz materijale drugačijih svojstava). Ovdje je razlika u svojstvima zona definirana isključivo s dubinom (uz pretpostavku da je gustoća konstantna).

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{k_1}{\frac{2\pi}{k_2}} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$$

(3)

L-duljina vala

 $\alpha$ -kut loma vala

Slika 2. 5 Snell-ov zakon.

$$K_r = \sqrt{\frac{B_o}{B}} = \sqrt{\frac{l_o \cdot \cos \alpha_o}{l_o \cdot \cos \alpha_1}} = \sqrt{\frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_o}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_1}}} = \left( \frac{1 - \sin^2 \alpha_o}{1 - \sin^2 \alpha_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

(4)

K<sub>r</sub>-koeficijent refrakcije

## 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. 6 Uplićavanje valova zajedno s lomom vala izazvanim utjecajem dna.

Kada val pod kutem 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.

$$Ec_g = \underbrace{n}_{n=c_{g0}/c} \cdot cE = konst. \quad \longrightarrow \quad \frac{P}{P_0} = 1 = \frac{Ec_g}{Ec_{g0}} \quad (5)$$

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

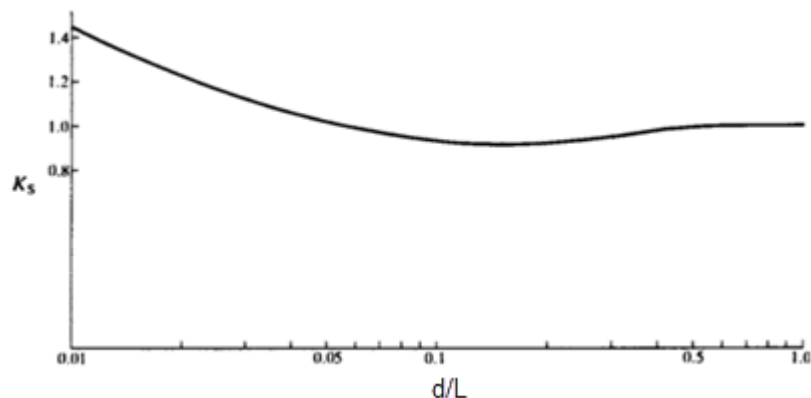
U općem slučaju  $H$  na bilo kojoj dubini moguće je dobiti iz:

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

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

(6)

**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. 7 Omjer dubine i koeficijenta uplićavanja.



## 2.5. Primjena i važnost procjene utjecaja refrakcije i uplićavanja

**Refrakcija i uplićavanje morskih valova**, predstavljaju važne čimbenike u analizi ponašanja valnog polja ulaskom u zonu utjecaja dna. To se posebno ističe primjenom u obalnom inženjerstvu i navigaciji na moru. Oba fenomena se događaju kada valovi prolaze kroz područja s promjenjivom dubinom mora ili nepravilne oblike obale, što uzrokuje promjenu smjera i brzine valova.

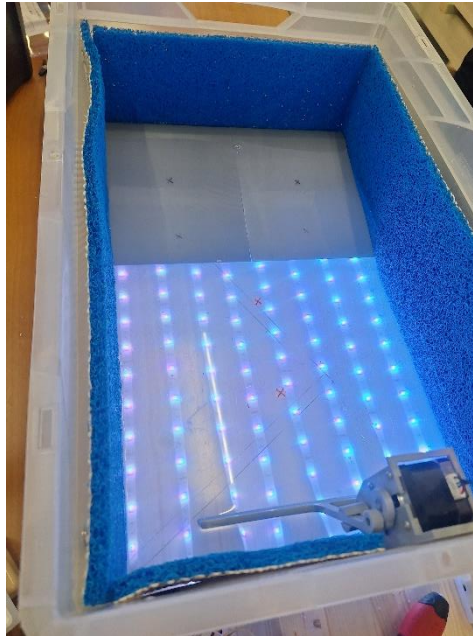
**Obalno inženjerstvo** se bavi zaštitom obalnih područja od erozije i održavanjem sigurnosti pomorske infrastrukture. Razumijevanje refrakcije i uplićavanja valova omogućuje inženjerima da planiraju i implementiraju učinkovite mjere zaštite, poput izgradnje lukobrana ili gatova, kako bi se smanjila erozija obale. Također, refrakcija i uplićavanje valova su važni čimbenici u dizajniranju luka i pristaništa, gdje utječu na sigurnost plovidbe i održivost pomorske infrastrukture. Održavanje postojećih pomorskih struktura, kao što su redoviti nadzor i prilagodba lukobrana ili pomorskih platformi, također zahtijeva razumijevanje ovog fenomena.

Refrakcija, te uplićavanje valova imaju ključnu ulogu i u **navigaciji i sigurnosti na moru**. Ovi fenomeni mogu značajno utjecati na plovidbu brodova, mijenjajući smjer i jačinu valova u uskim morskim prolazima i područjima s nepravilnom obalom. Razumijevanje refrakcije i uplićavanja omogućuje pomorcima planiranje sigurnih plovidbenih ruta i prilagodbu akcija radi smanjenja rizika od nautičkih nesreća. Također, i refrakcija i uplićavanje valova imaju implikacije za stabilnost brodova u teškim vremenskim uvjetima te igraju važnu ulogu u operacijama spašavanja i hitnim intervencijama na moru.

U području **obnovljivih izvora energije**, razumijevanje refrakcije i uplićavanja valova je ključno za identifikaciju optimalnih lokacija za prikupljanje energije valova. Ovi fenomeni omogućuju procjenu raspodjele energije valova uz obalu, što je bitno za efikasnu proizvodnju obnovljive energije iz valova.

### 3. FIZIKALNI MODEL ZA REFRAKCIJU 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 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.

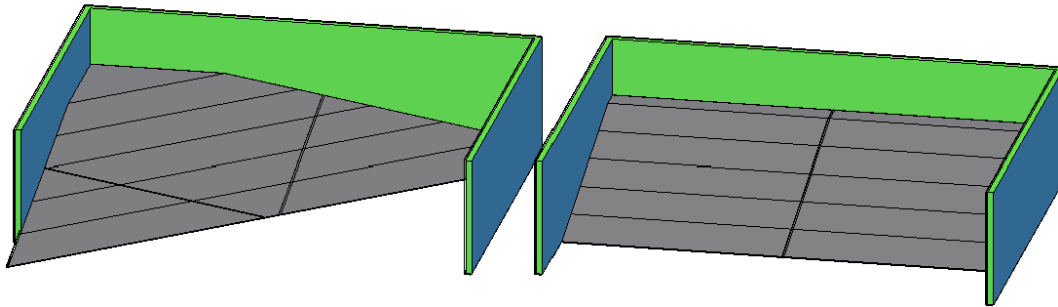
Provođenje eksperimenata započinje pripremom modela, postavljanjem modela obale u bazen za testiranje te osiguravanjem stabilnosti modela i pravilne kalibracije senzora. Zatim se koristeći valni generator stvaraju valovi s različitim karakteristikama, pri čemu se svaki eksperiment ponavlja nekoliko puta 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.

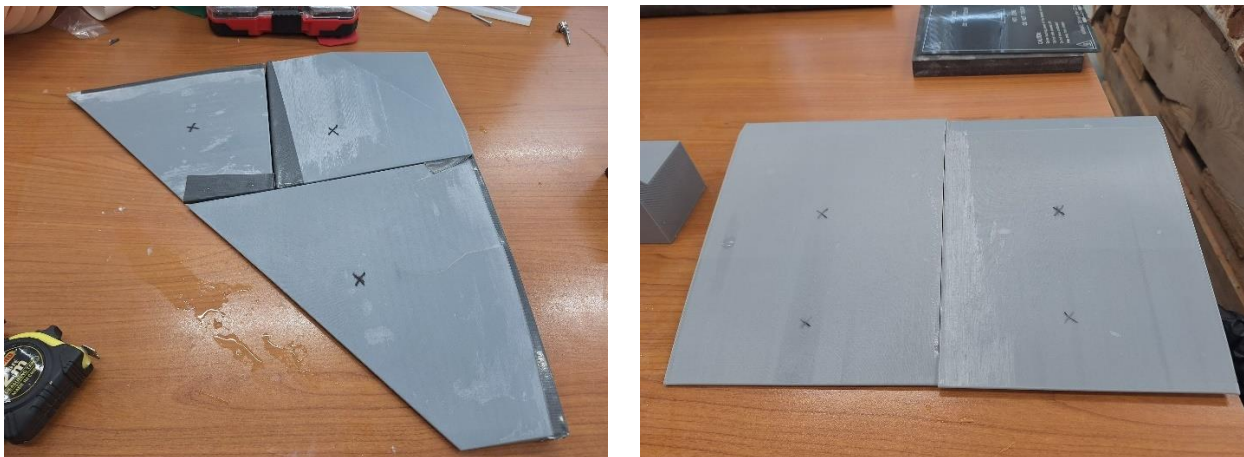
### 3.2. Opis izvedenog fizikalnog modela

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 3.5), nakon čega su izrađene pomoću 3D printera (Slika 3.6). 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. Cementna pasta je odabrana 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 prikaz modela obale reprezentativnih za postizanje obje transformacije (lijevo), samo uplićavanja (desno)*



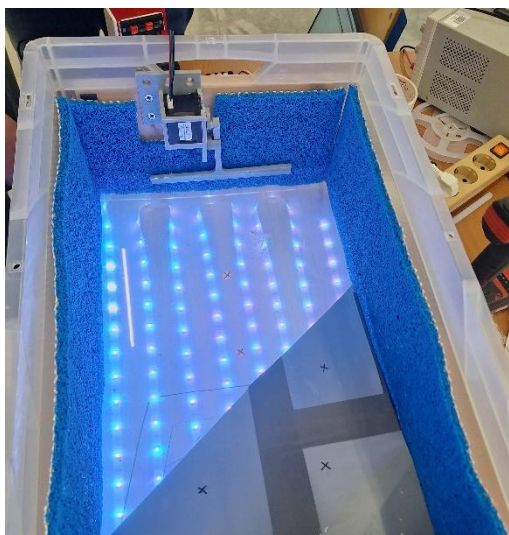
*Slika 3.3 3D isprintani modeli obale za obje transformacije (lijevo), samo uplićavanja (desno)*

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.

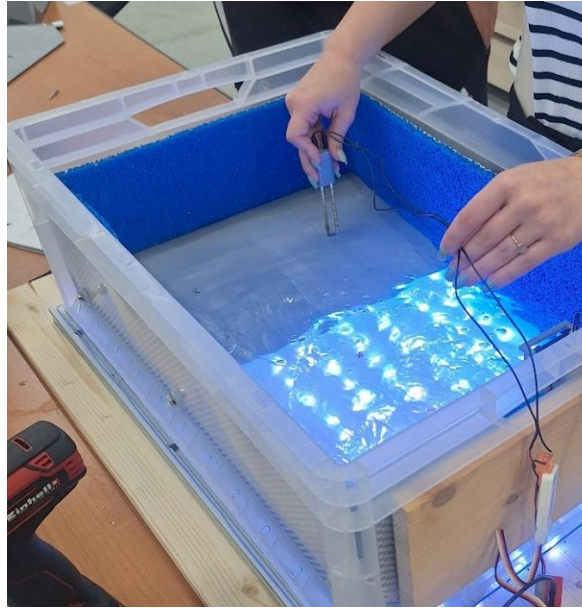
Unutrašnjost bazena okružena je spužvom kako bi se smanjilo reflektiranje valova od zidova bazena. Spužva apsorbira energiju valova, čime se smanjuje njihova refleksija i omogućava preciznije mjerenje valova. Ovo osigurava da izmjereni podaci točnije odražavaju interakciju valova s modelom obale, a ne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



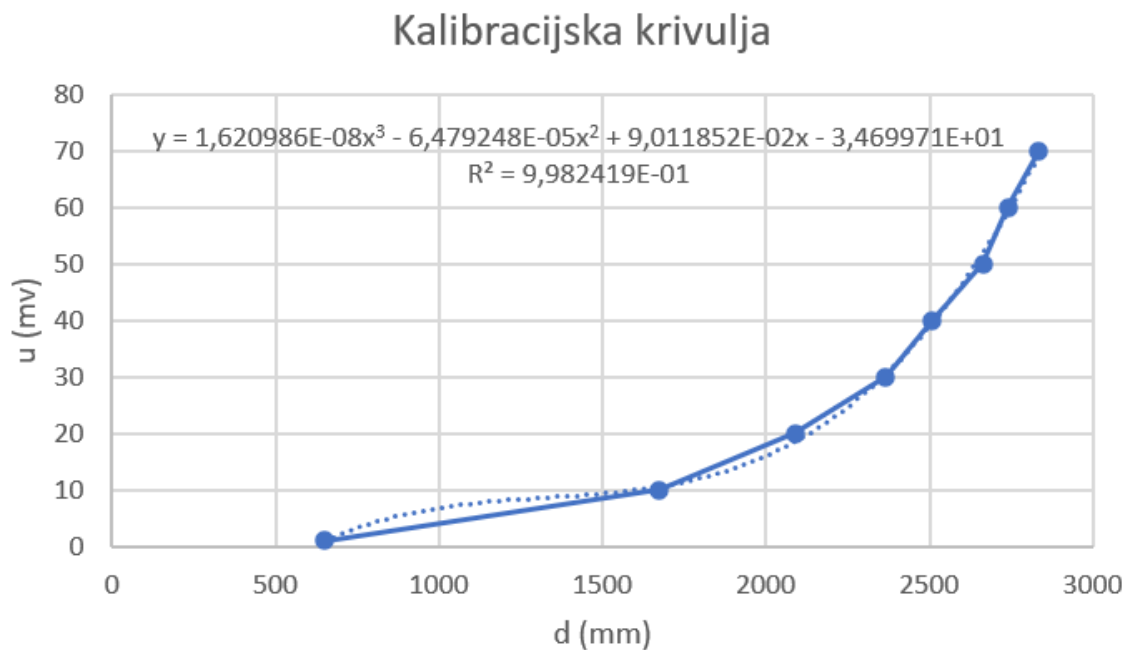
*Slika 3.4 Prikaz bazena s korištenom lopaticom,, spužvom, elektromotorom i LED svijetlima*

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 3.8). 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 mjeran 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 (Slika 3.). Jednom ostvarena kalibracijska krivulja je dala direktno vezu za pretvorbu mjenenog pada napona u dubinu vode.



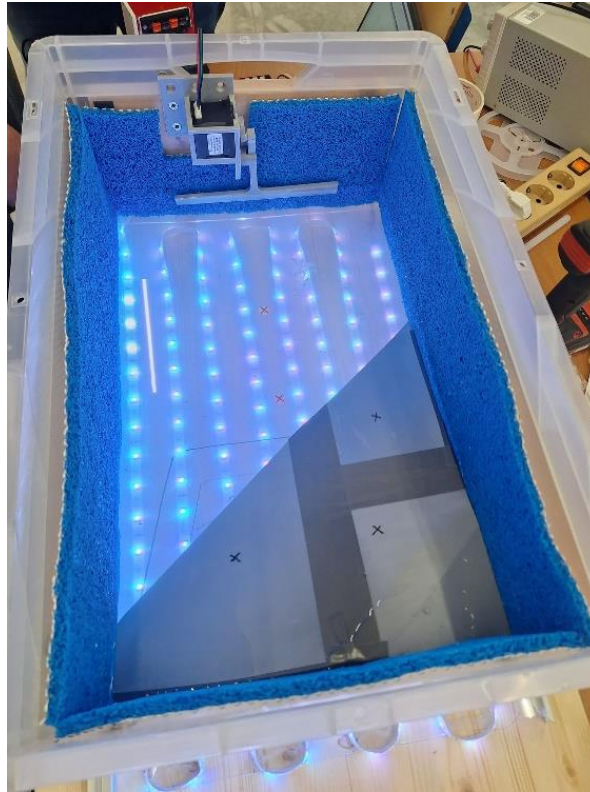
Slika 3.6 Kalibracijska krivulja

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

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.



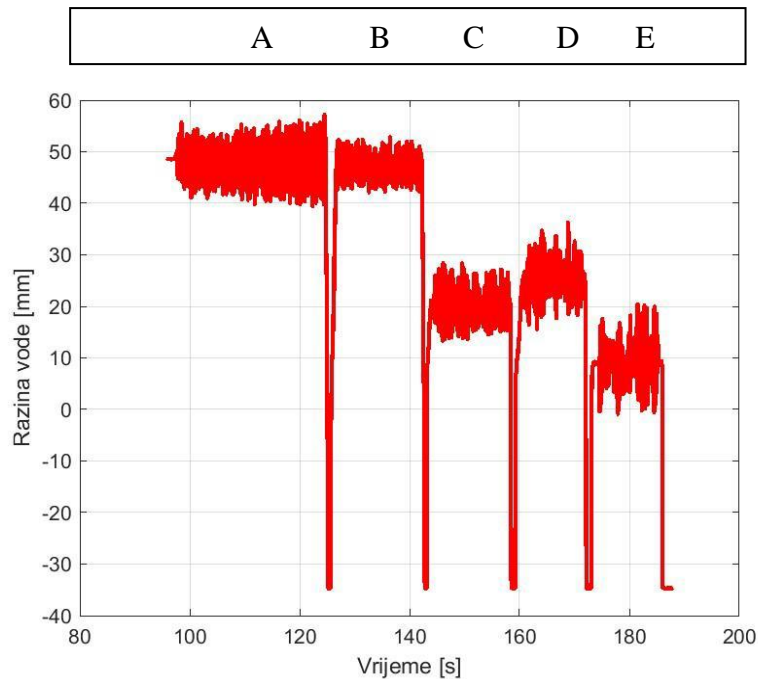
### 3.3. Provedeni eksperiment za refrakciju i uplićavanje



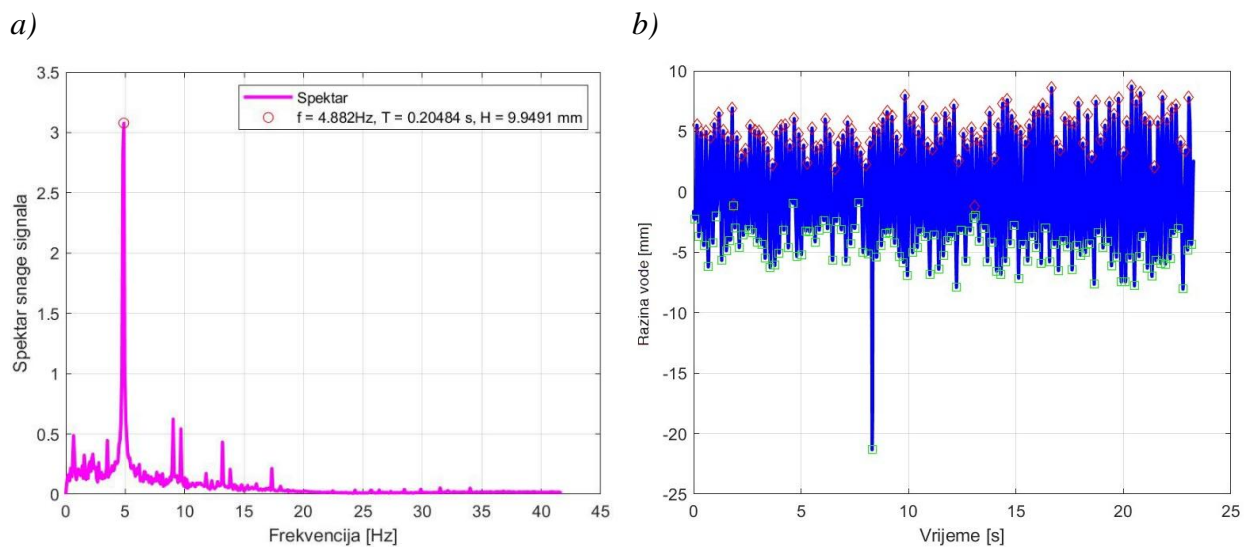
*Slika 3.7 Postavke fizikalnog modela za simulaciju refrakcije i uplićavanja*

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

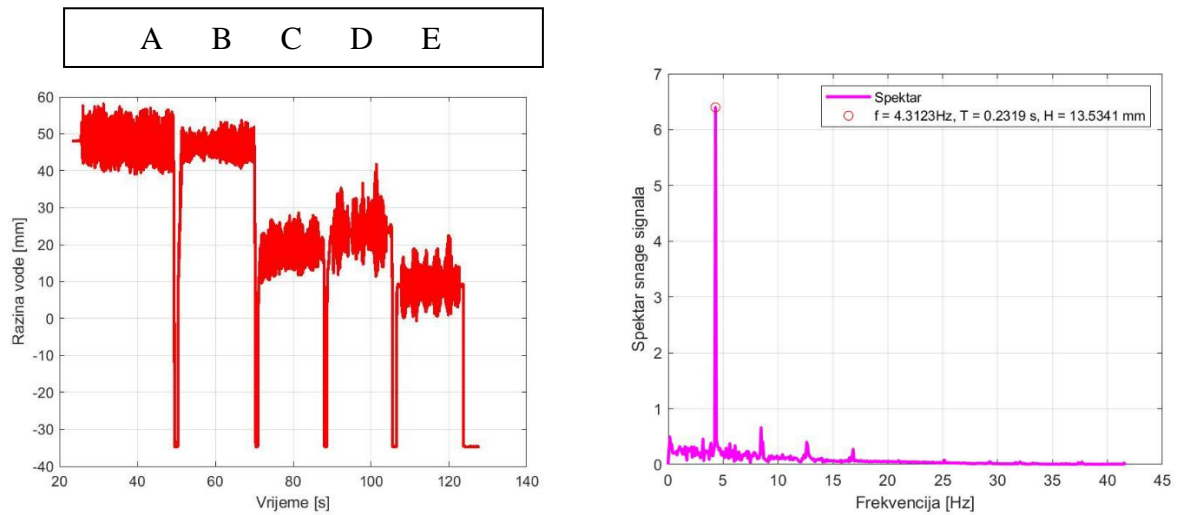


Slika 3.8 Test 1  $T_{motora}=0.17$ 

Podaci su uzeti iz točke A i analizirani su kako bi se dobili ključni parametri vala. Spektralnom analizom signala (Slika 3.), određena je dominantna frekvencija vala  $f = 4.882$  Hz, odnosno period vala  $T = 0.20484$  s, te je visina vala  $H$  procijenjena kao srednja vrijednost iz vremenskog zapisa razina (zero-up metoda) na  $9.9491$  mm. Ove analize su ključne za razumijevanje ponašanja vala u kontroliranim uvjetima bazena.

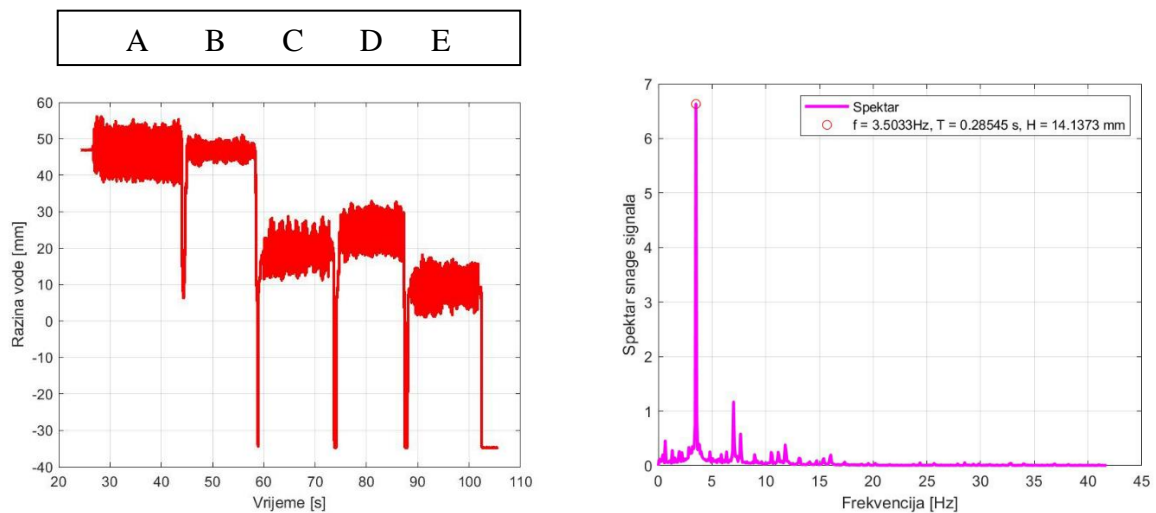
Slika 3.9 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17$  Spektar

U drugom eksperimentu gdje je period okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s, spektralnom analizom i zero-up metodom dobiveno je:  $f = 4.3123$  Hz,  $T = 0.2319$  s i  $H = 13.5341$  mm (Slika 3.)



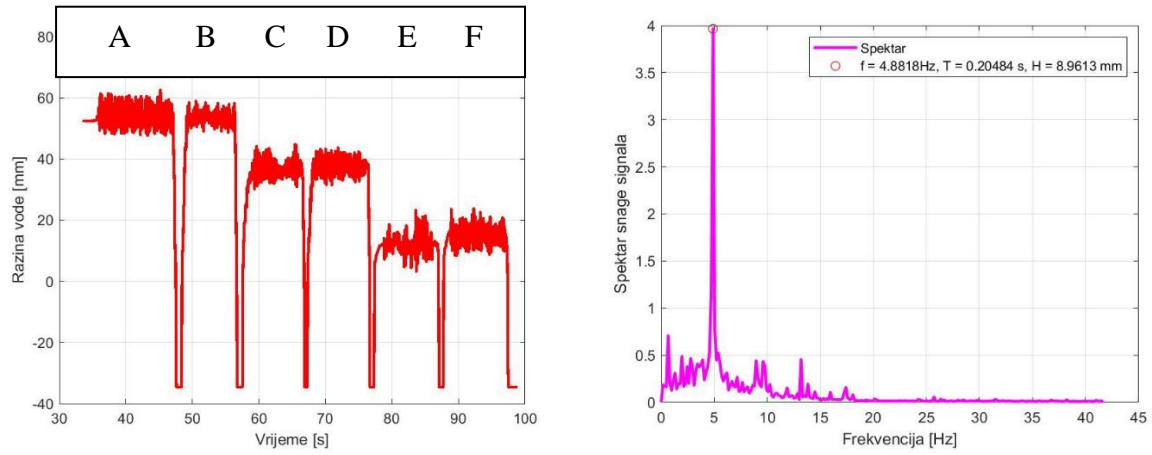
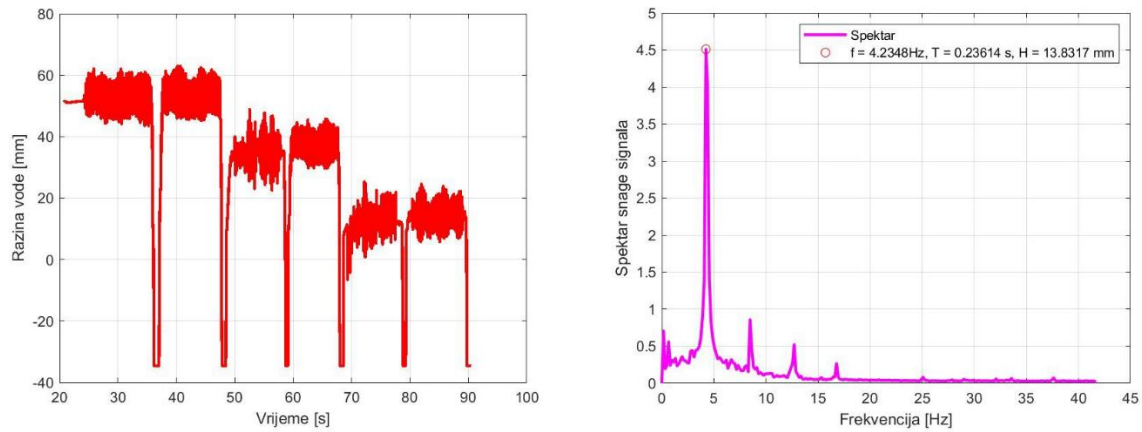
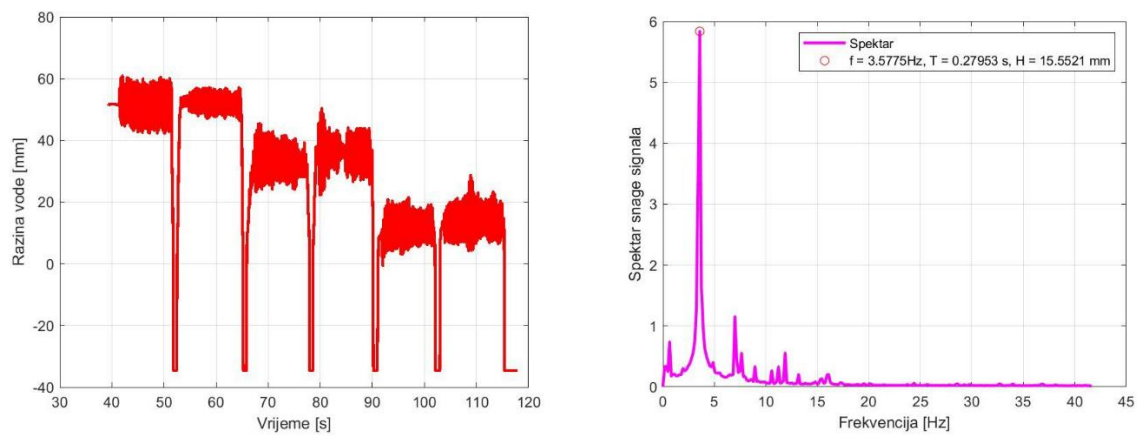
Slika 3.10 Eksperiment 2  $T_{\text{motora}}=0.2$

Treća analiza pokazala je sljedeće rezultate:  $f = 3.5033$  Hz,  $T = 0.28545$  s i  $H = 14.1373$  mm (Slika 3.)



Slika 3.11 Eksperiment 3  $T_{\text{motora}}=0.25$

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

Slika 3.12 Eksperiment 1  $T_{motora}=0.17$ Slika 3.13 Eksperiment 2  $T_{motora}=0.2$ Slika 3.14 Eksperiment 3  $T_{motora}=0.25$

### **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 prilikom 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. 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 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 Eksperimentiranjem 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

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

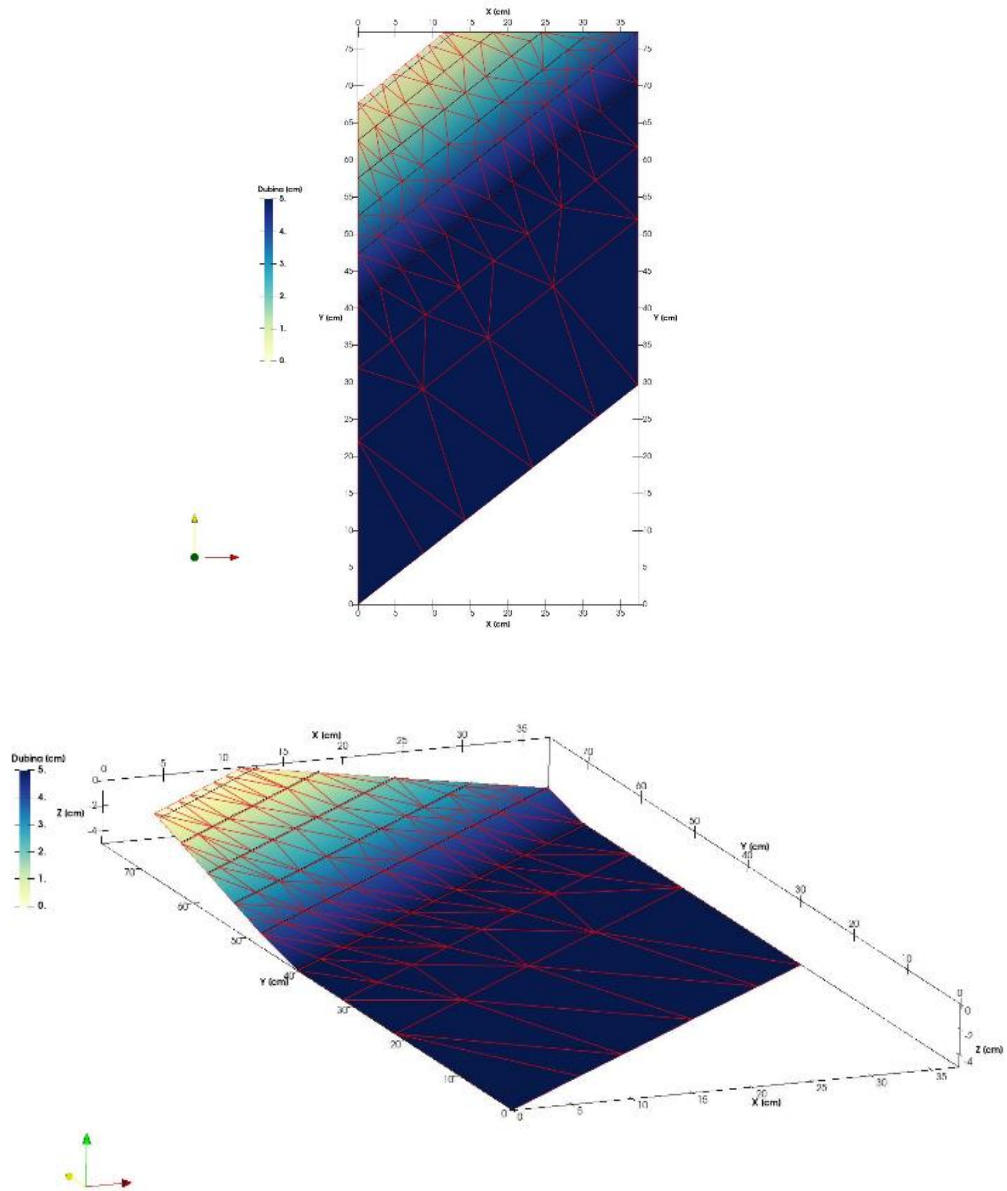
Ključni aspekti uključuju definiranje prostorne domene modela kroz podjelu prostora u smjerovima  $x$  i  $y$ , što omogućuje numeričko rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi koje opisuju zraku vala. Također se uzimaju u obzir rubni uvjeti koji simuliraju interakciju valova s obalom ili drugim 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 metoda 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.

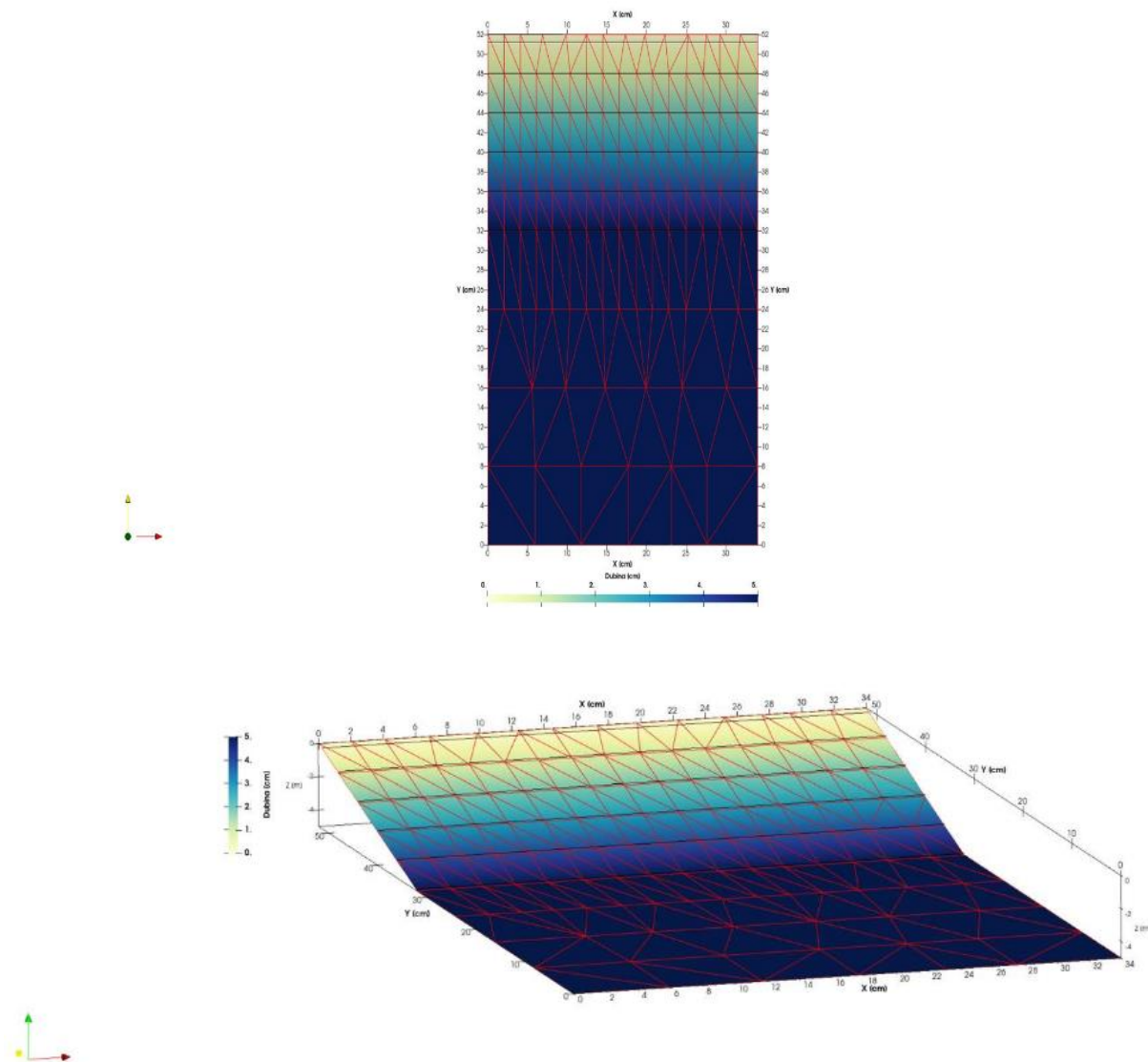
## 4.2. Postavke numeričkog modela za refrakciju i uplićavanje

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 refrakcije s uplićavanjem koristi se mreža s 171 aktivnih elemenata i 98 čvorova, dok mreža za uplićavanje ima 251 element i 138 čvorova. 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 4.1 Mreža za refrakciju i uplićavanje



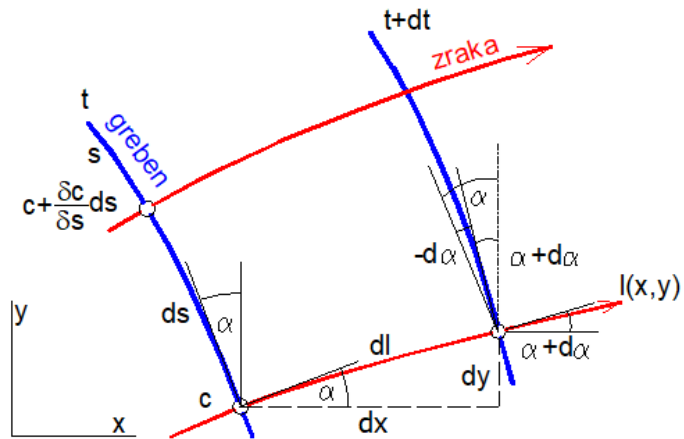


Slika 4.2 Mreža za uplićavanje

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 refrakcija 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 4.3 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru

#### Jednanžba zrake vala u dubokom moru

brzina točke vala  $c = c_0 = f(T) = \text{const.}$

promjena položaja točke vala u vremenu  $dt$ :

$$dl = c_0 \cdot dt$$

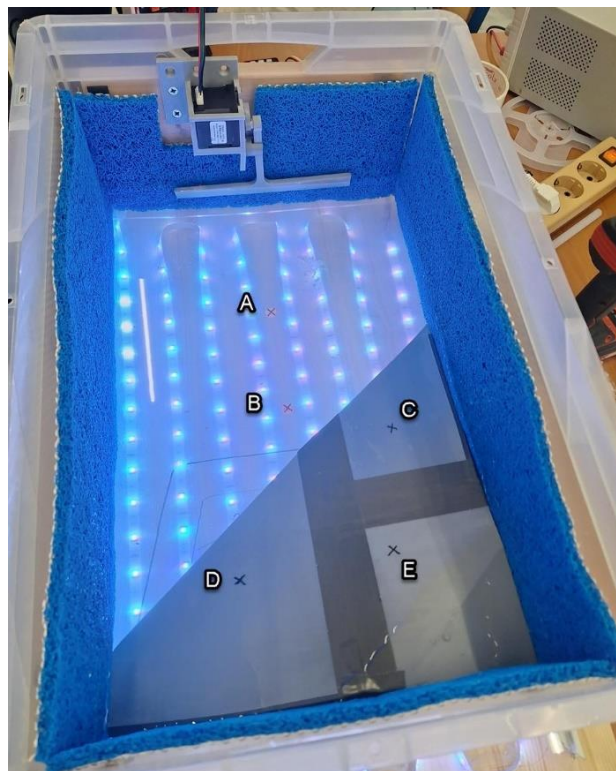
$$dx = c_0 \cdot \cos\alpha \cdot dt$$

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

## 5. REZULTATI I USPOREDBA

### 5.1. Refrakcija

U laboratoriju su za refrakciju provedena tri ispitivanja različitih perioda  $T = 0.20484, 0.2319, 0.28545$  (s) i  $T_{\text{motora}} = 0.17, 0.2$  i  $0.25$ , za svako ispitivanje izmjerene su visine valova  $H$  u pet različitih točaka (Slika 5.).

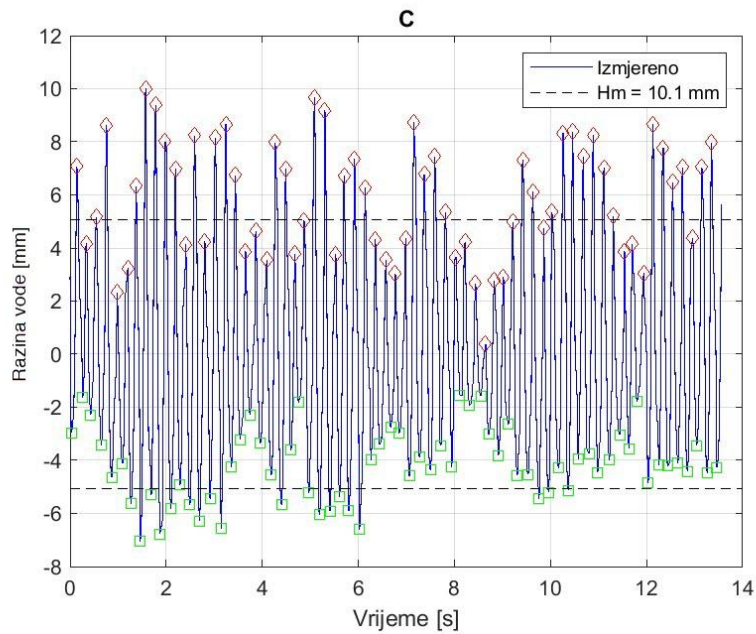


Slika 5.1 Točke mjerenja razine vode za refrakciju

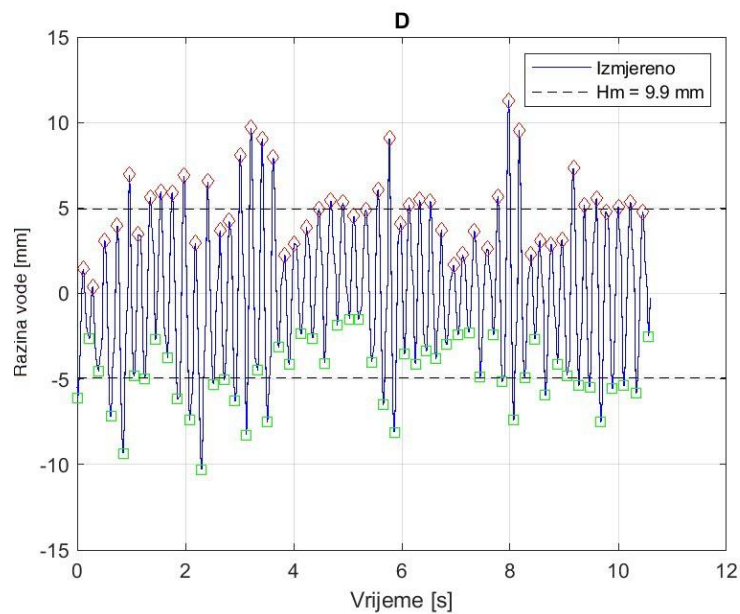
U točkama A i B izmjerene su iste visine valova i pokazano je da u njima nema refrakcije. Refrakcija se nikada ne odvija sama; u ovom slučaju, pojavljuje se zajedno s uplićavanjem.

**EKSPERIMENT 1**

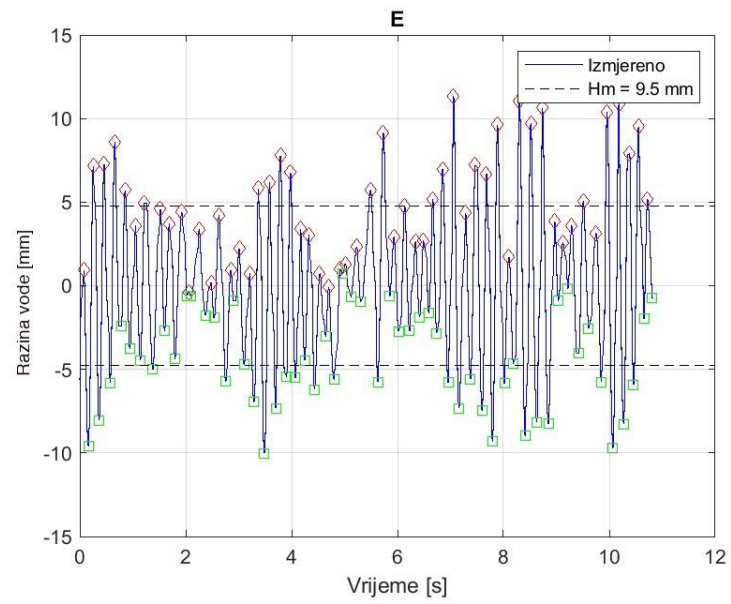
Prvi eksperiment u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i s relevantnim periodom vala  $T = 0.20484$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.2 Točka C za refrakciju



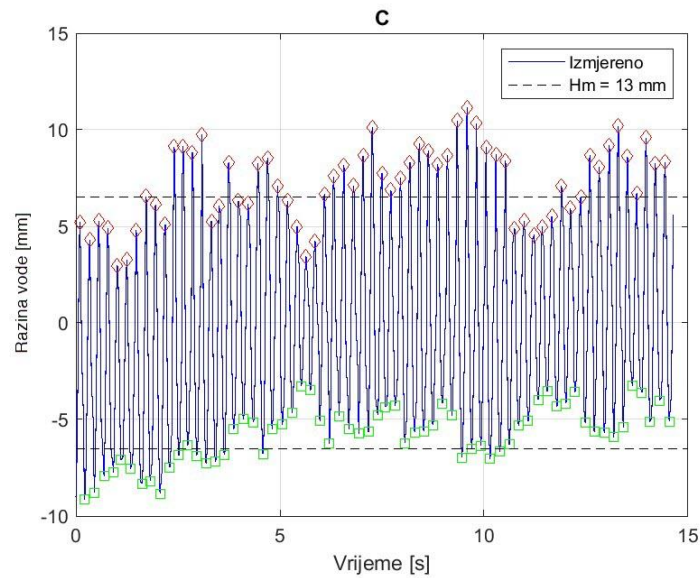
Slika 5.3 Točka D za refrakciju



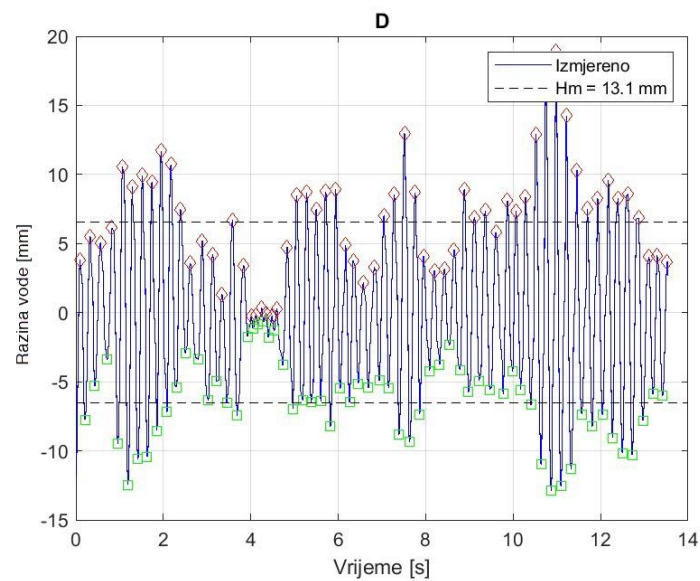
Slika 5.4 Točka E za refrakciju

**EKSPERIMENT 2**

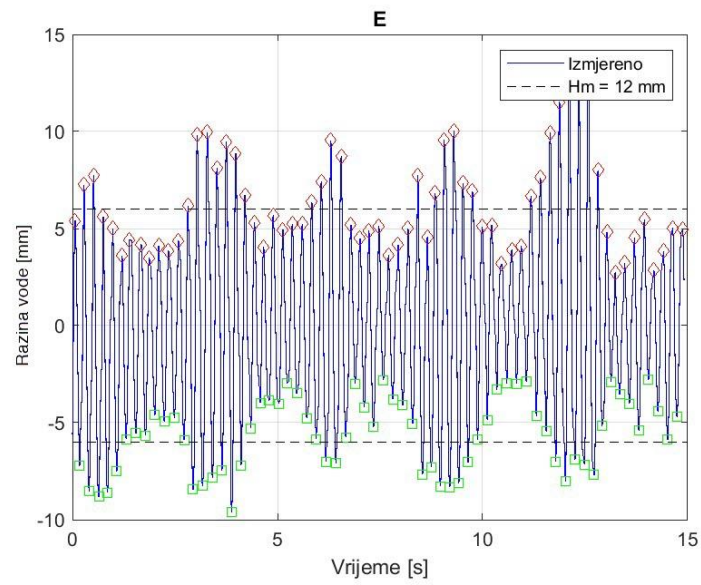
Za drugi eksperiment period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i s pripadajućim periodom vala  $T = 0.23566$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



Slika 5.5 Točka C za refrakciju



Slika 5.6 Točka D za refrakciju

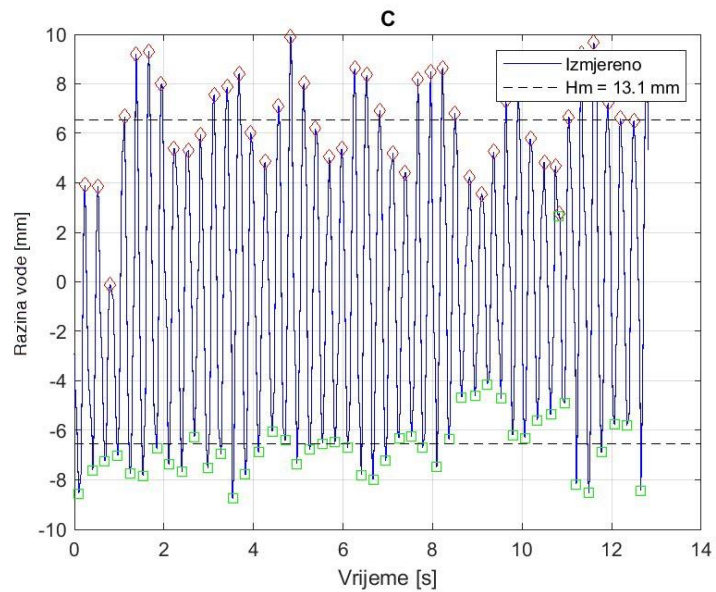


Slika 5.7 Točka E za refrakciju

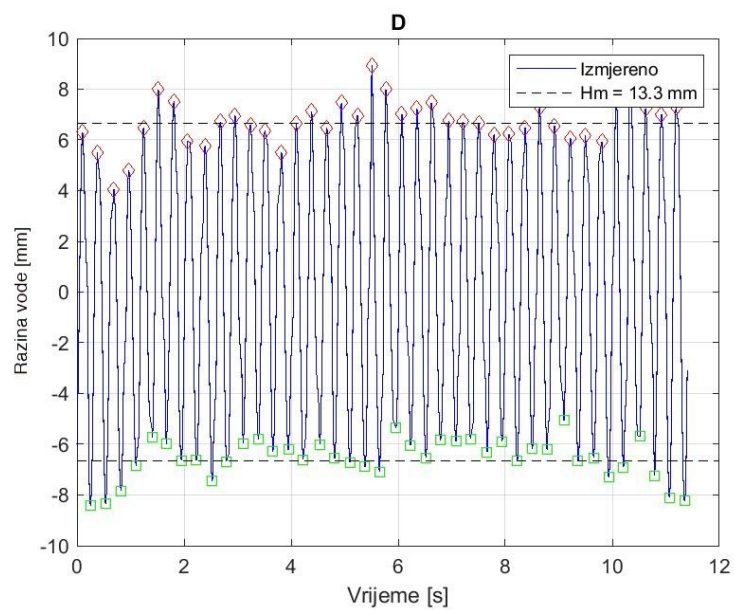


**EKSPERIMENT 3**

U trećem eksperimentu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i relevantni period vala  $T = 0.28545$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.

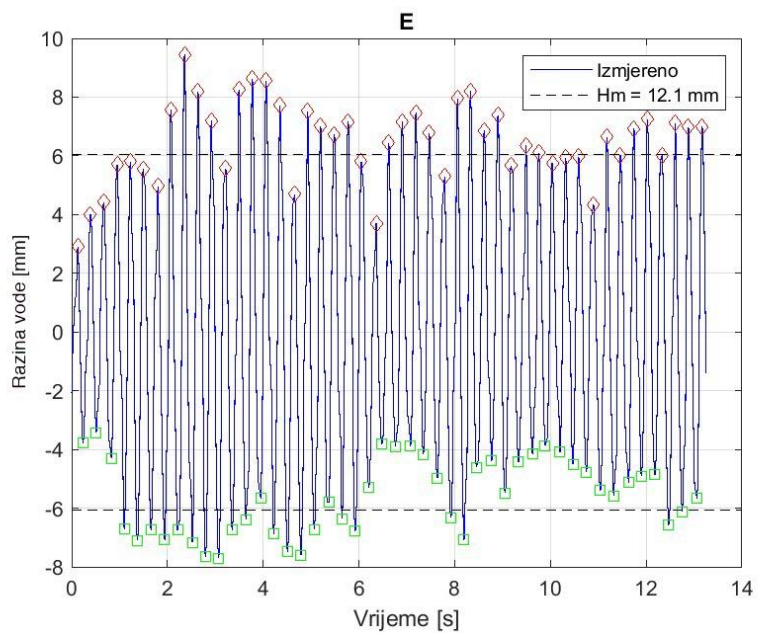


Slika 5.8 Točka C za refrakciju



Slika 5.9 Točka D za refrakciju



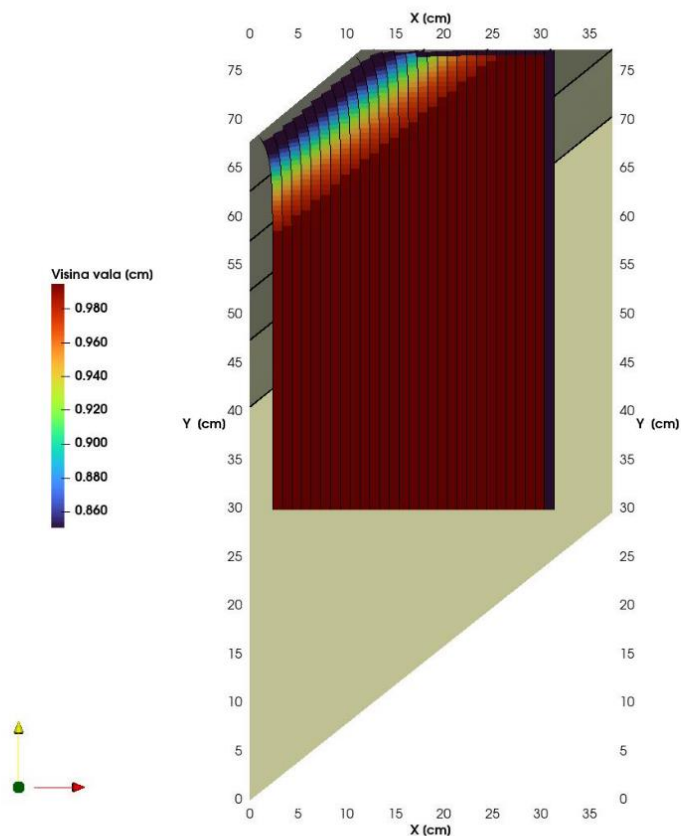


Slika 5.10 Točka E za refrakciju

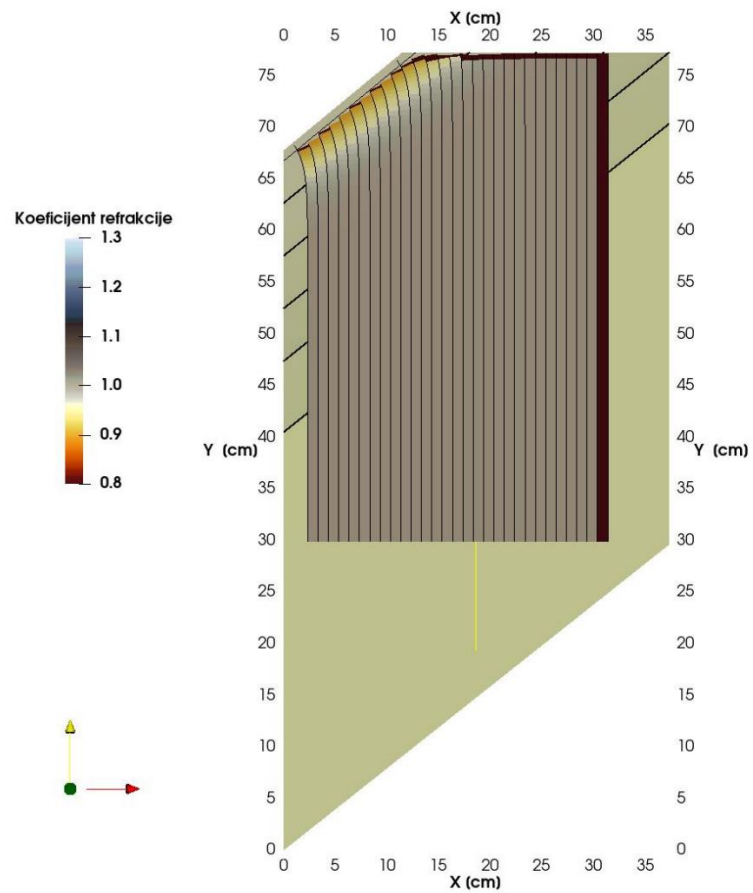
Numeričkim modelom ostvareni su rezultati prikazani u nastavku.

**EKSPERIMENT 1**

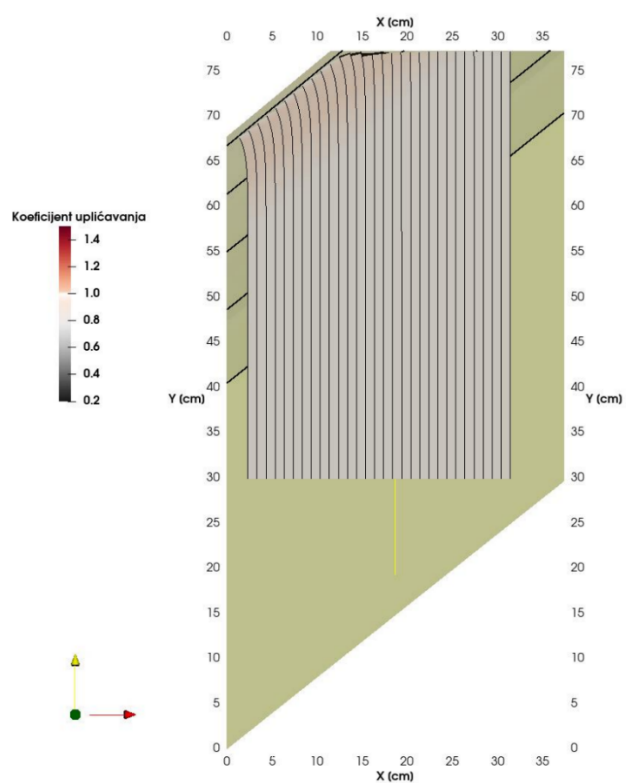
Prvi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 0,99491$  cm, odnosno  $H_0 = 9,9491$  mm (Slika 5.11).



*Slika 5.11 Eksperiment 1, visina vala (cm)*



Slika 5.12 Eksperiment 1, koeficijent refrakcije



Slika 5.13 Eksperiment I, koeficijent uplićavanja

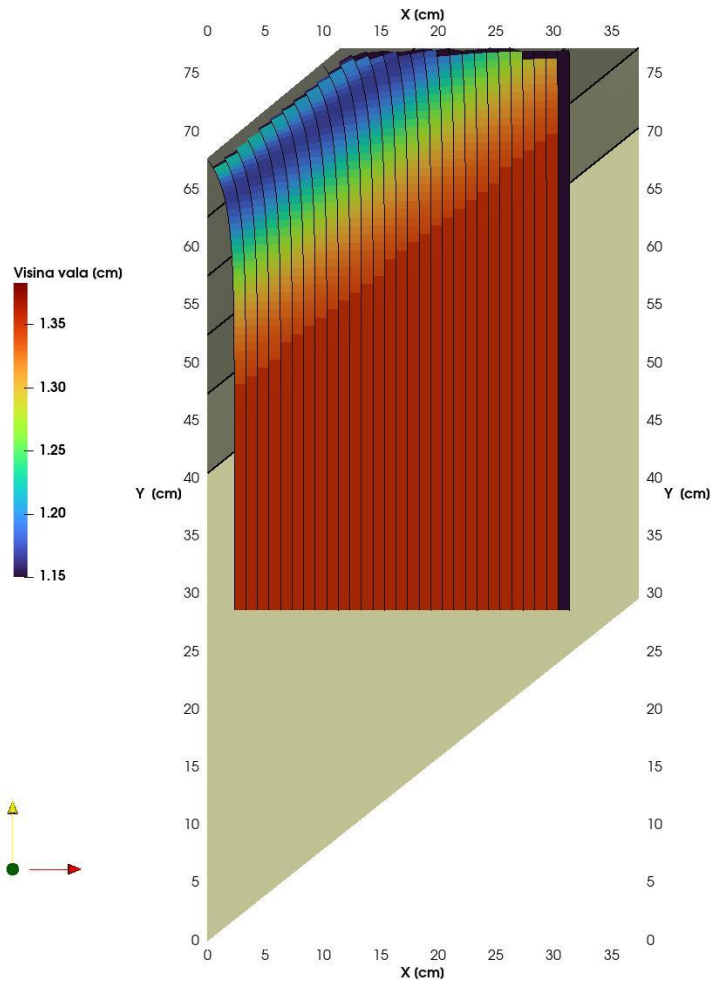
Dobivene visine vala u točkama iznose: Točka C – 0,994895 cm

Točka D – 0,994899 cm

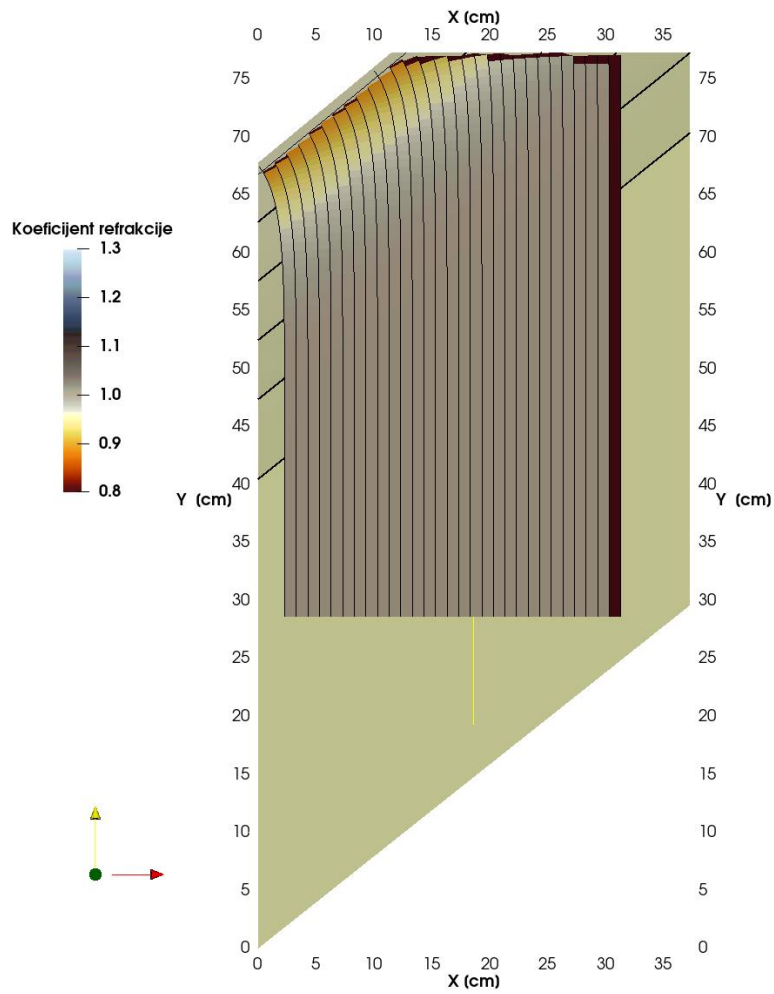
Točka E – 0,969724 cm

**EKSPERIMENT 2**

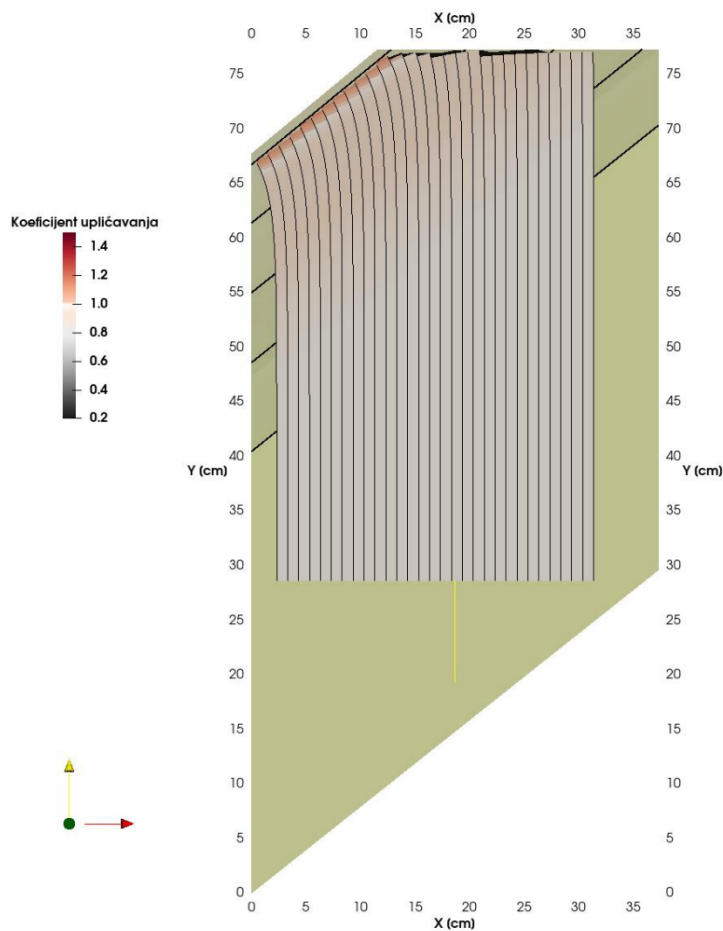
Drugi eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1,35341$  cm, odnosno  $H_0 = 13,5341$  mm (Slika 5.14 ).



Slika 5.14 Eksperiment 2, visina vala (cm)



Slika 5.15 Eksperiment 2, koeficijent refrakcije



Slika 5.16 Eksperiment 2, koefficient uplićavanja

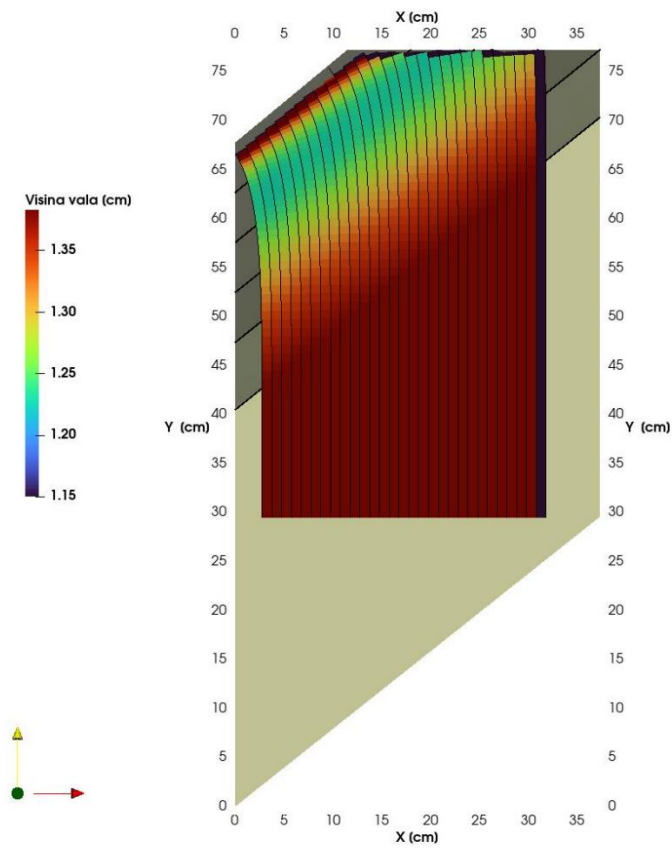
Dobivene visine vala u točkama iznose: Točka C – 1,32848 cm

Točka D – 1,33119 cm

Točka E – 1,21472 cm

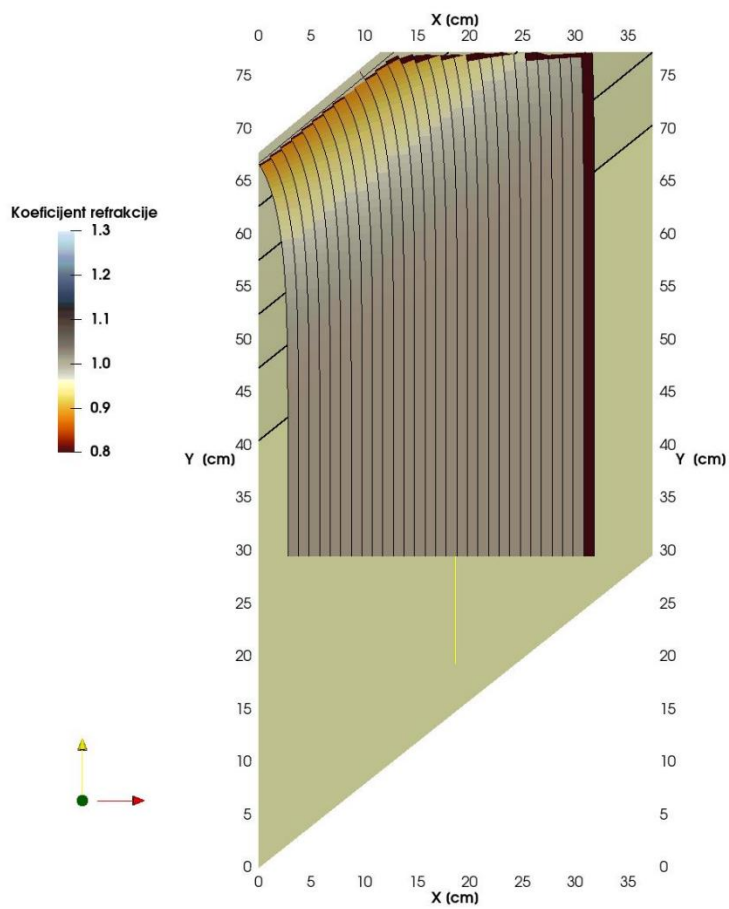
**EKSPERIMENT 3**

Treći eksperiment prikazao je početnu visinu vala  $H_0 = 1.41373$  cm, odnosno  $H_0 = 14.1373$  mm (Slika 5.17).

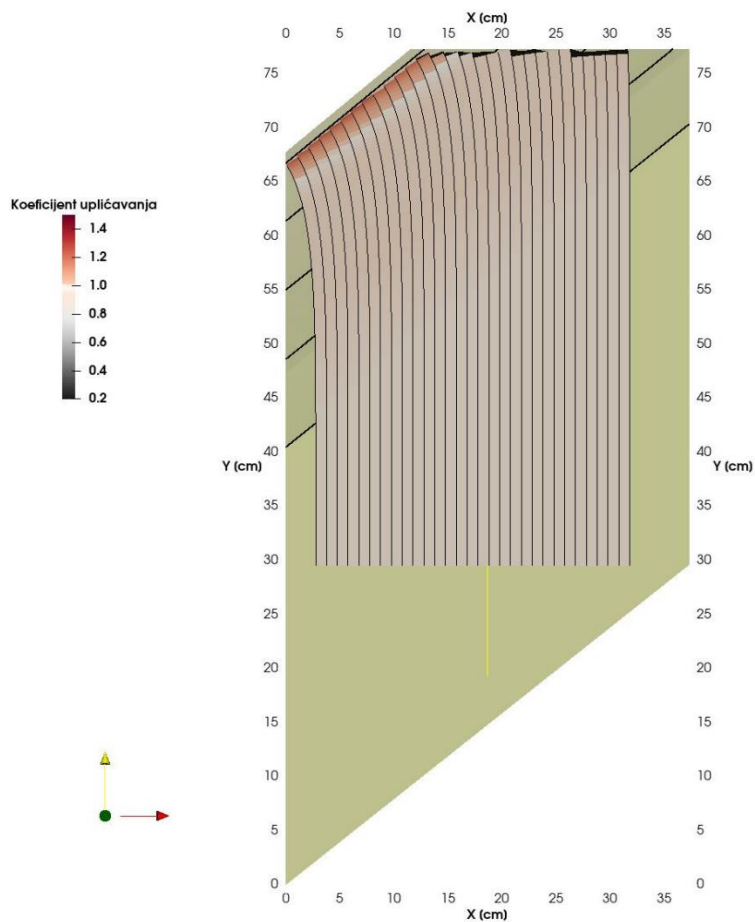


Slika 5.17 Eksperiment 3, visina vala (cm)





Slika 5.18 Eksperiment 3, koeficijent refrakcije



Slika 5.19 Eksperiment 3, koefficient uplićavanja

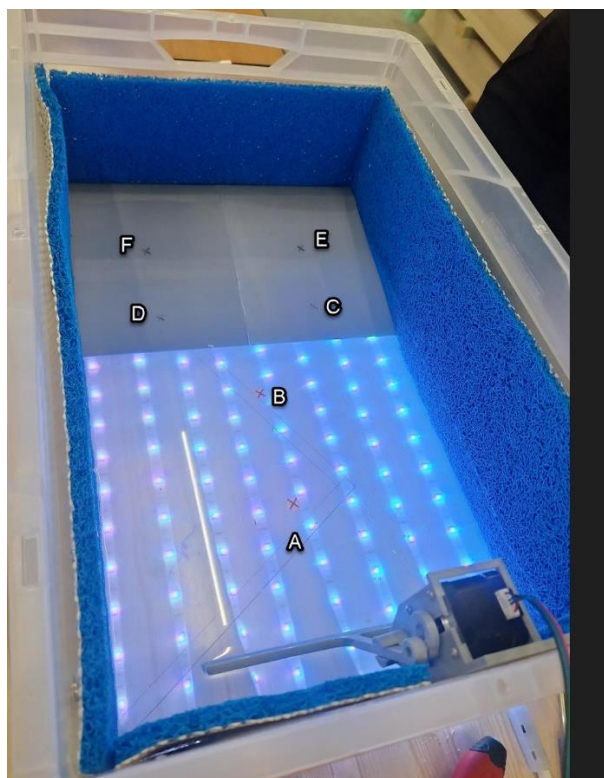
Dobivene visine vala u točkama iznose: Točka C – 1,32851 cm

Točka D – 1,33195 cm

Točka E – 1,22763 cm

## 5.2. Uplićavanje

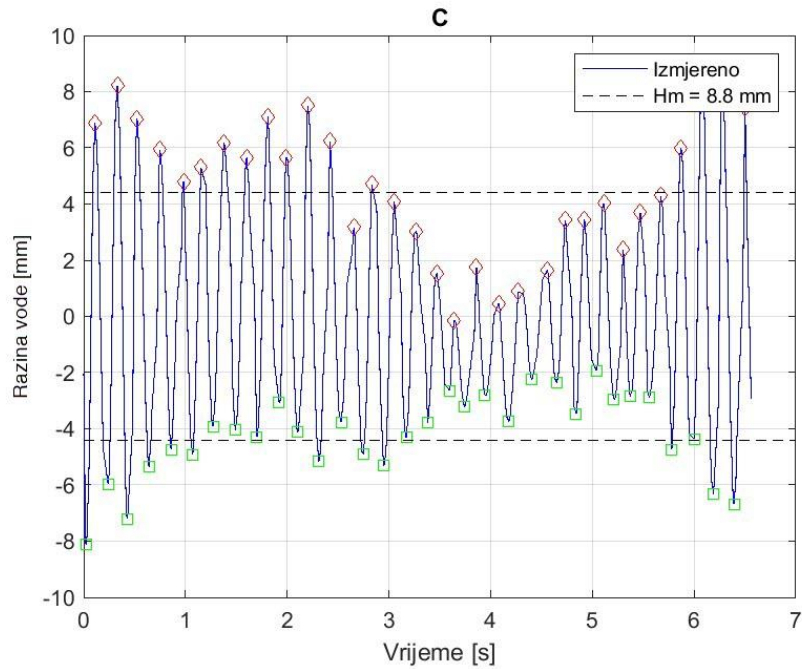
U laboratoriju su za uplićavanje provedena tri ispitivanja različitih perioda  $T = 0.20532, 0.23177, 0.27963$  (s) i  $T_{\text{motora}} = 0.17\text{s}, 0.2\text{s}$  i  $0.25\text{s}$ , za svako ispitivanje izmjerene su visine valova  $H$  u šest različitih točaka (Slika 5.).



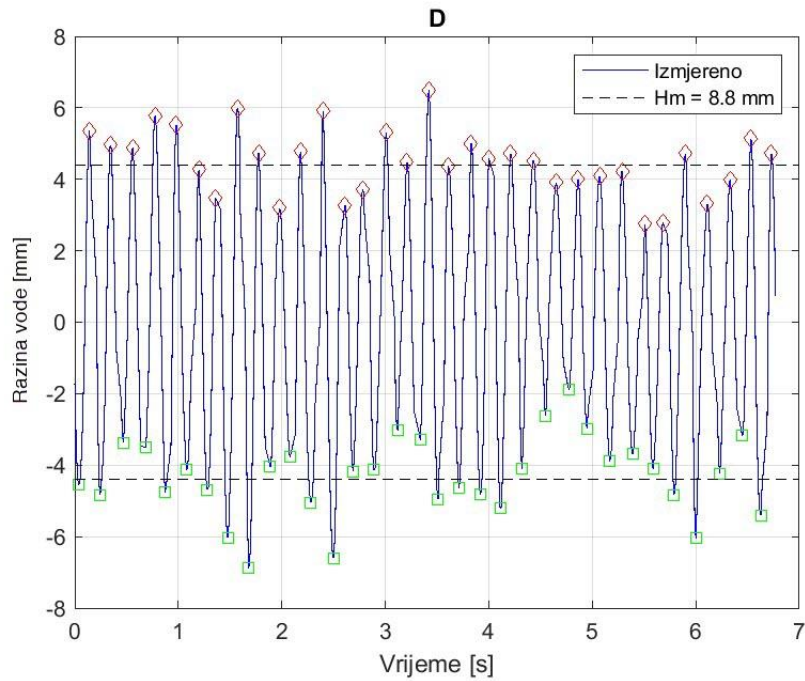
Slika 5.20 Točke mjerenja  $H$  za uplićavanje

**EKSPERIMENT 1**

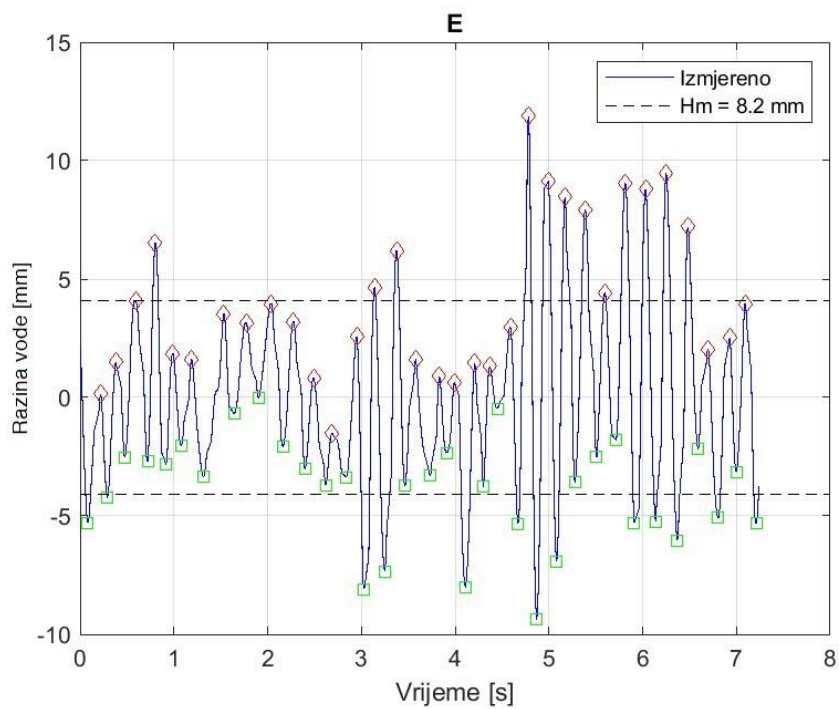
Prvi eksperiment u laboratoriju izveo se periodom okretaja motora  $T_{\text{motora}} = 0.17$  s i odgovarajućim periodom vala u dubokom moru  $T = 0.20532$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



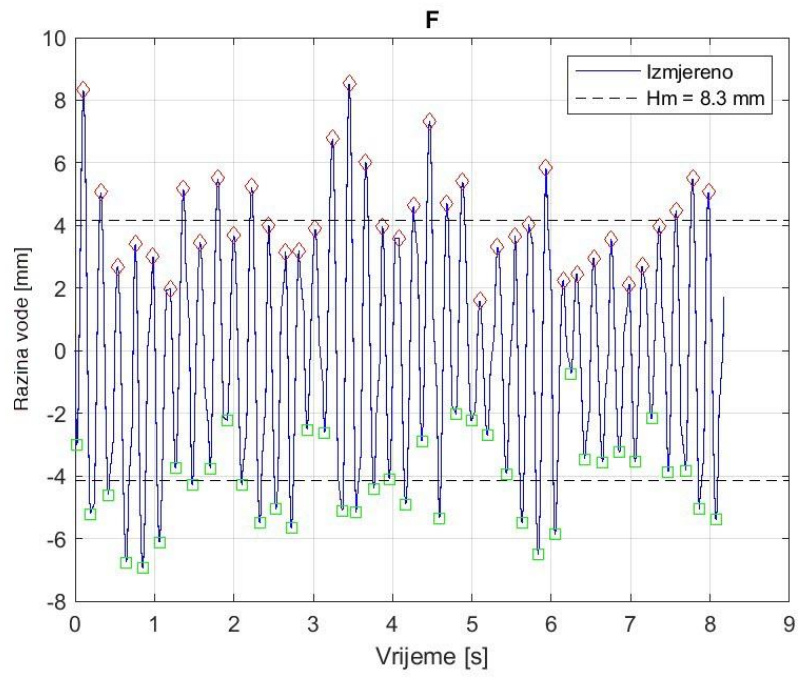
Slika 5.21 Točka C za uplićavanje



Slika 5.22 Točka D za uplićavanje



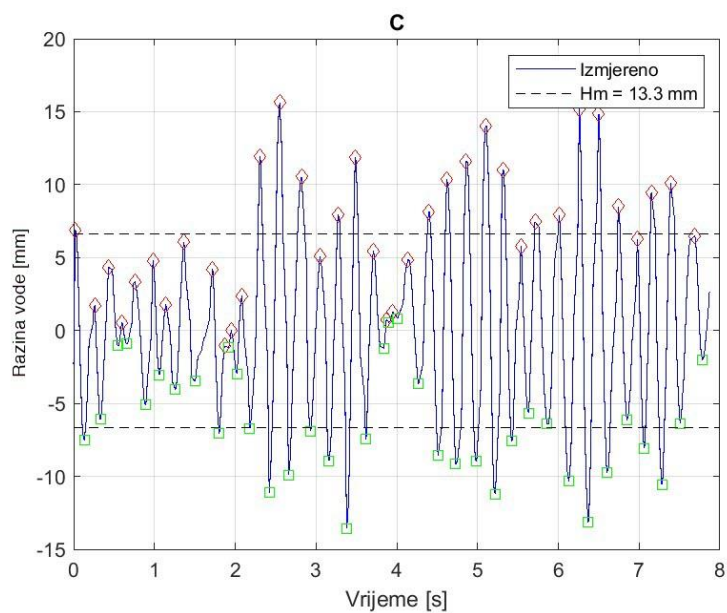
Slika 5.23 Točka E za uplićavanje



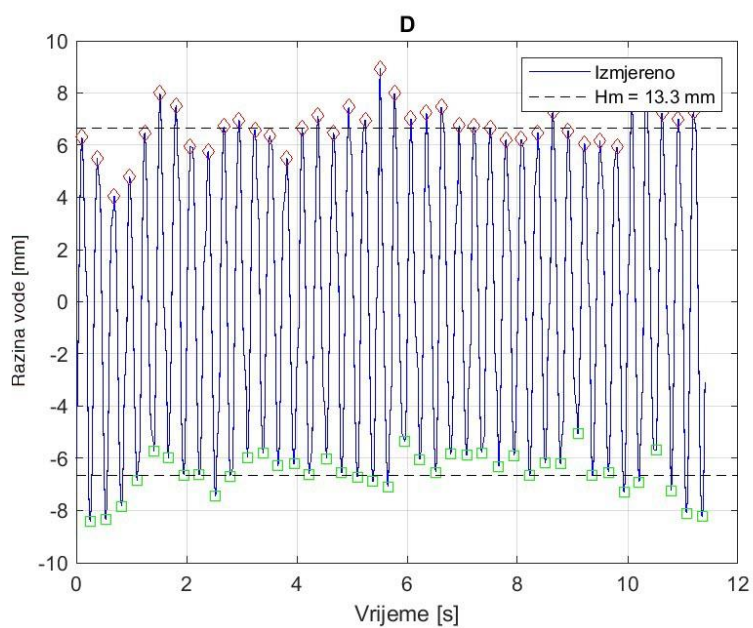
Slika 5.24 Točka F za uplićavanje

**EKSPERIMENT 2**

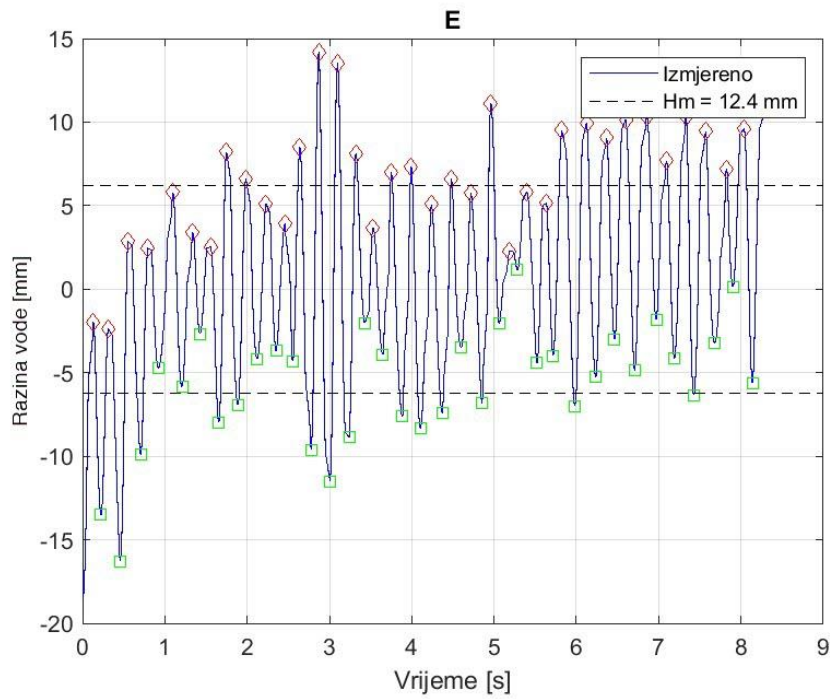
Za drugi Eksperiment period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.2$  s i periodom  $T = 0.23177$ s. Rezultati su prikazani u nastavku.



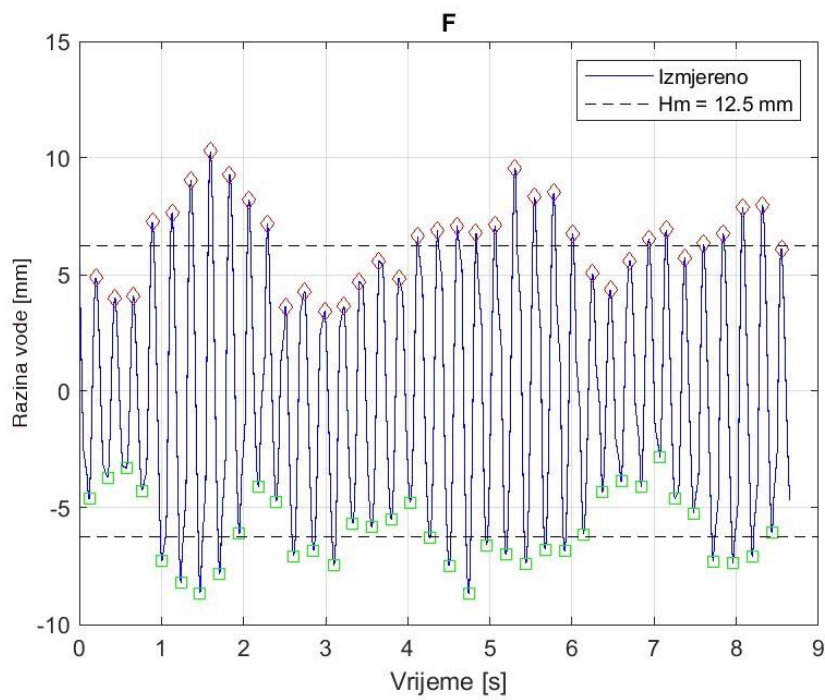
Slika 5.25 Točka C za uplićavanje



Slika 5.26 Točka D za uplićavanje



Slika 5.27 Točka E za uplićavanje

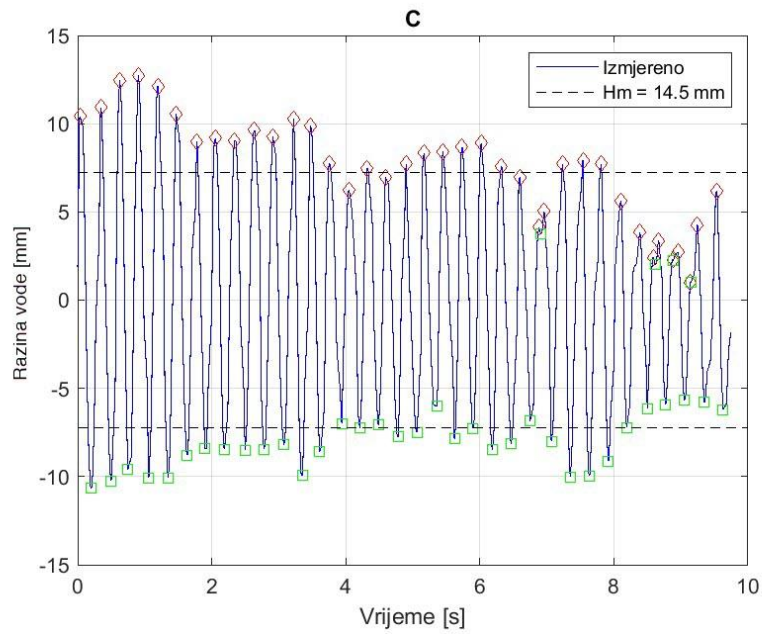


Slika 5.28 Točka F za uplićavanje

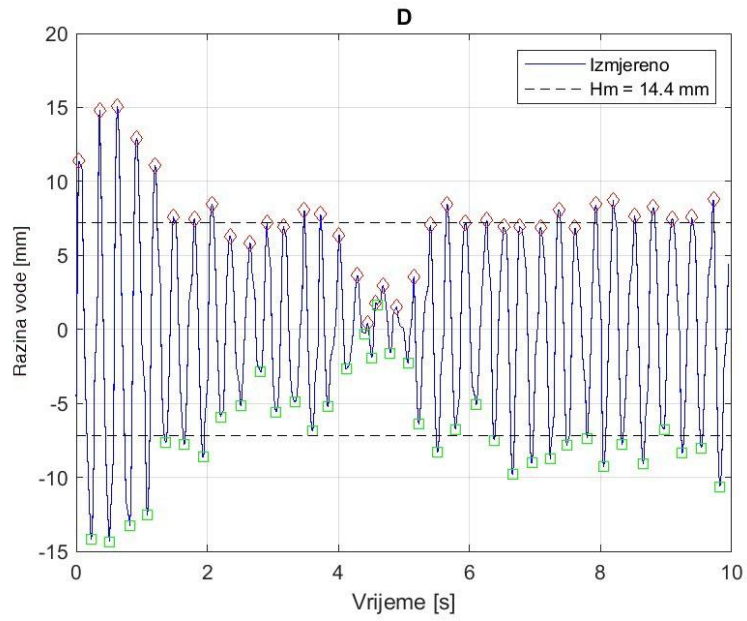


**EKSPERIMENT 3**

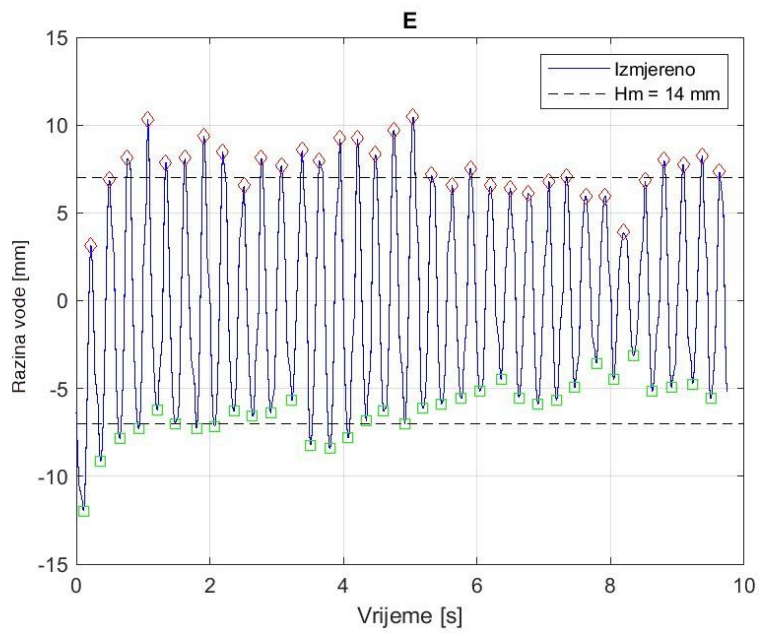
U trećem eksperimentu period okretaja motora je  $T_{\text{motora}} = 0.25$  s i period  $T = 0.27963$  s. Rezultati su prikazani u nastavku.



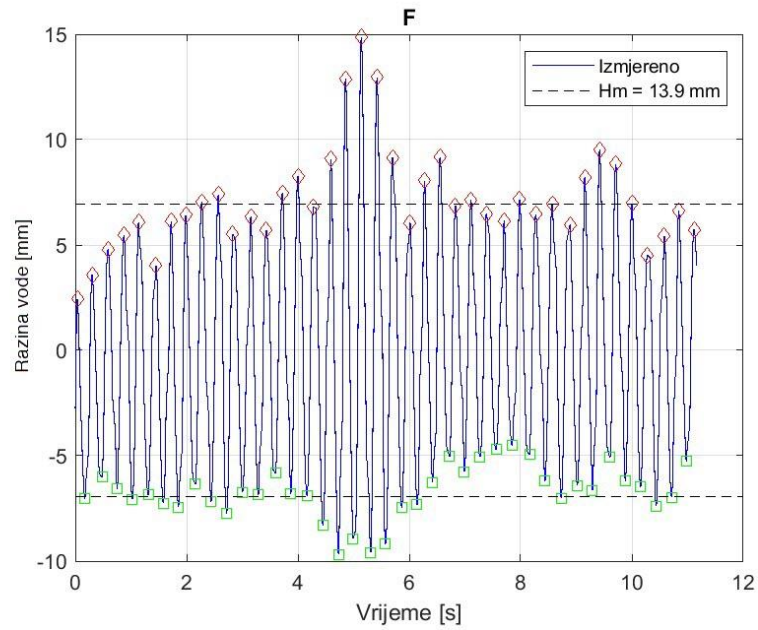
*Slika 5.29 Točka C za uplićavanje*



*Slika 5.30 Točka D za uplićavanje*



*Slika 5.31 Točka E za uplićavanje*

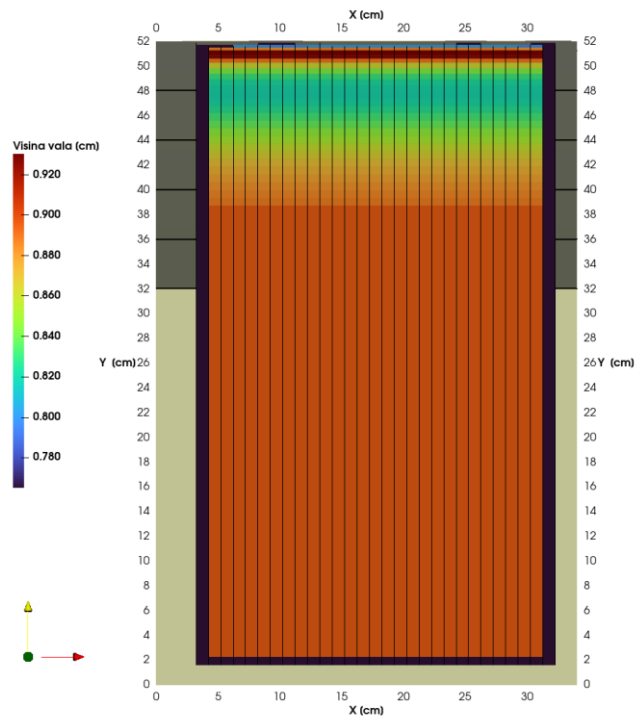


Slika 5.32 Točka F za uplićavanje

Za sve eksperimente se može primjetiti kako točke C i D, te analogno i točke E i F imaju slične signale (zapise vremenskih serija), te im je srednja vrijednost izrazito bliska, što je i očekivano jer se nalaze na istim dubinama i na istoj vrsti geometrije dna.

**EKSPERIMENT 1**

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



*Slika 5.33 Eksperiment 1, numerički model*

Visine vala za svaku točku su prikazane na

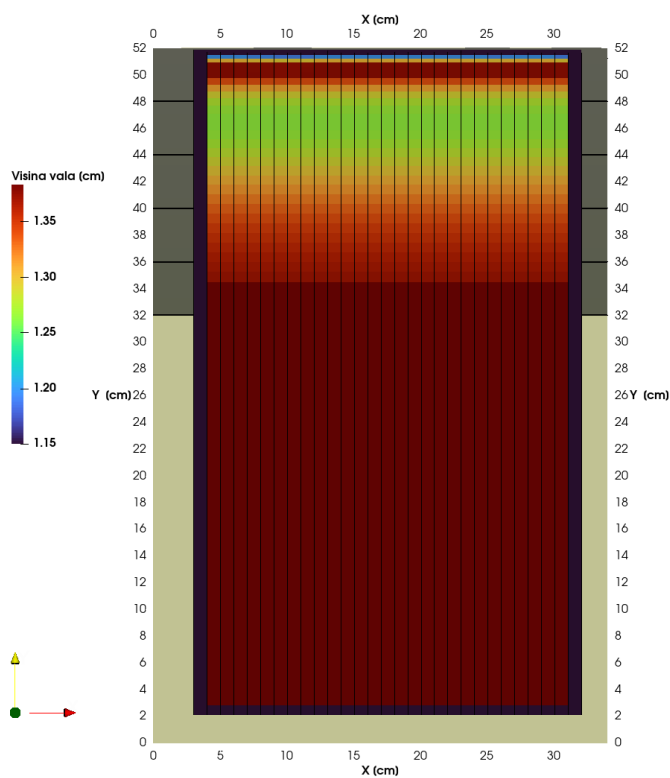
Slika 5..

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

*Slika 5.34 Test 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 5.35 Test 2, numerički model

Visine vala za svaku točku su prikazane na

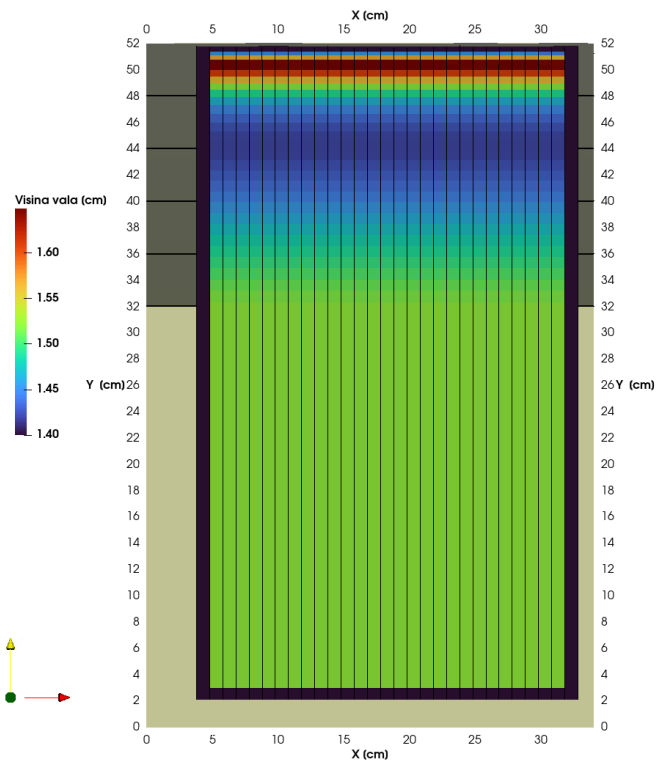
Slika 5..

TOČKE	H (cm)
C	1,35742
D	1,36192

E	1,2785
F	1,27144

Slika 5.36 Test 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 5.37 Test 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 5.3 Test 3, visine vala  $H$ 

Tablica 5.1 Usporedba rezultata refrakcije

<i>N (test)</i>	Točka mjerenja	<i>Fizikalni model</i>	<i>Numerički model</i>
		H (mm)	H (mm)
1	C	10.1	9.95
	D	9.9	9.95
	E	9.5	9.97
2	C	13	13.29
	D	13.1	13.31
	E	12	12.15
3	C	13.1	13.29
	D	13.3	13.32
	E	12.1	12.28

Tablica 5.2 Usporedba rezultata uplićavanje

<i>N (test)</i>	<i>Fizikalni model</i>		<i>Numerički model</i>
	<i>Točka mjerenja</i>	<i>H (mm)</i>	<i>H (mm)</i>
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
---	-------	-------

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad temelji se na integraciji fizikalnog i numeričkog modeliranja radi proučavanja refrakcije 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. Također, došlo je do odstupanja pri prijenosu podataka između sonde za mjerenje i MATLAB programa.

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 .....	7
Slika 2.2 Snell-ov zakon.....	10
Slika 2. 3 Lom vala pri prelasku iz jednog medija u drugi. ....	12
Slika 2. 4 Prikaz refrakcije. ....	12
Slika 2. 5 Snell-ov zakon.....	13
Slika 2. 6 Uplićavanje valova zajedno s lomom vala izazvanim utjecajem dna. ....	14
Slika 2. 7 Omjer dubine i koeficijenta uplićavanja. ....	15
Slika 3.1 Bazen za fizikalni model.....	17
Slika 3.2 3D prikaz modela obale reprezentativnih za postizanje obje transformacije (lijevo), samo uplićavanja (desno) .....	19
Slika 3.3 3D isprintani modeli obale za obje transformacije (lijevo), samo uplićavanja (desno). ....	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 Postavke fizikalnog modela za simulaciju refrakcije i uplićavanja .....	23
Slika 3.8 Test 1 $T_{motora}=0.17$ .....	24
Slika 3.9 Eksperiment 1 $T_{motora}=0.17$ Spektar .....	24
Slika 3.10 Eksperiment 2 $T_{motora}=0.2$ .....	25
Slika 3.11 Eksperiment 3 $T_{motora}=0.25$ .....	25
Slika 3.12 Eksperiment 1 $T_{motora}=0.17$ .....	26
Slika 3.13 Eksperiment 2 $T_{motora}=0.2$ .....	26
Slika 3.14 Eksperiment 3 $T_{motora}=0.25$ .....	26
Slika 4.1 Mreža za refrakciju i uplićavanje.....	31
Slika 4.2 Mreža za uplićavanje .....	32
Slika 4.3 Shematski prikaz zraka vala u dubokom moru .....	33
Slika 5.1 Točke mjerenja razine vode za refrakciju .....	34
Slika 5.2 Točka C za refrakciju.....	35
Slika 5.3 Točka D za refrakciju.....	35
Slika 5.4 Točka E za refrakciju .....	36
Slika 5.5 Točka C za refrakciju.....	37

Slika 5.6 Točka D za refrakciju.....	37
Slika 5.7 Točka E za refrakciju .....	38
Slika 5.8 Točka C za refrakciju.....	39
Slika 5.9 Točka D za refrakciju.....	39
Slika 5.10 Točka E za refrakciju .....	40
Slika 5.11 Eksperiment 1, visina vala (cm).....	41
Slika 5.12 Eksperiment 1, koeficijent refrakcije .....	42
Slika 5.13 Eksperiment 1, koeficijent uplićavanja .....	43
Slika 5.14 Eksperiment 2, visina vala (cm).....	44
Slika 5.15 Eksperiment 2, koeficijent refrakcije .....	45
Slika 5.16 Eksperiment 2, koeficijent uplićavanja.....	46
Slika 5.17 Eksperiment 3, visina vala (cm).....	47
Slika 5.18 Eksperiment 3, koeficijent refrakcije .....	48
Slika 5.19 Eksperiment 3, koeficijent uplićavanja.....	49
Slika 5.20 Točke mjerenja H za uplićavanje.....	50
Slika 5.21 Točka C za uplićavanje .....	51
Slika 5.22 Točka D za uplićavanje.....	52
Slika 5.23 Točka E za uplićavanje .....	52
Slika 5.24 Točka F za uplićavanje .....	53
Slika 5.25 Točka C za uplićavanje .....	54
Slika 5.26 Točka D za uplićavanje.....	54
Slika 5.27 Točka E za uplićavanje .....	55
Slika 5.28 Točka F za uplićavanje .....	55
Slika 5.29 Točka C za uplićavanje .....	56
Slika 5.30 Točka D za uplićavanje.....	57
Slika 5.31 Točka E za uplićavanje .....	57
Slika 5.32 Točka F za uplićavanje .....	58
Slika 5.33 Eksperiment 1, numerički model .....	59
Slika 5.35 Eksperiment 2, numerički model .....	60
Slika 5.36 Eksperiment 2, visine vala H .....	61
Slika 5.37 Eksperiment 3, numerički model .....	61
Slika 5.38 Eksperiment 3, visine vala H .....	62
Tablica 5.1 Usporedba rezultata refrakcije .....	62

Tablica 5.2 Usporedba rezultata uplićavanja .....63

## **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] Waves | DP Physics – IB Recap, “ Waves | DP Physics”  
<https://ibrecap.com/DP/Waves>
- [7] Revision science, “Wave behaviour“  
<https://revisionscience.com/gcse-revision/physics/waves/wave-behaviour>

