

# Koeficijent transmisije valne energije plutajućeg lukobrana pod utjecajem spektralnih valova

---

**Topić, Antonija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:668120>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

Antonija Topić

Koeficijent transmisije valne energije  
plutajućeg lukobrana pod utjecajem  
spektralnih valova

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| Popis slika.....   | II  |
| Popis tablica.....   | IV  |
| Popis korištenih fizikalnih veličina.....  | IV  |
| Popis korištenih kratica .....   | V   |
| Sažetak.....   | VI  |
| Summary.....   | VII |
| 1. Uvod.....   | 1   |
| 1.1. Spektralni valovi   | 1   |
| 1.2. Lukobrani   | 2   |
| 1.3. Plutajući lukobran  | 4   |
| 1.3.1. Transmisija energije ispod plutajućeg lukobrana.....                                      | 4   |
| 2. Metodologija .....  | 9   |
| 2.1. Fizikalni model   | 9   |
| 2.1.1. Valni kanal .....   | 9   |
| 2.1.2. Plutajući lukobran .....  | 12  |
| 2.2. Mjerna oprema   | 16  |
| 2.3. Valovni parametri   | 17  |
| 3. Rezultati .....   | 22  |
| 3.1. Valne serije  | 22  |
| 3.2. Utjecaj dubine na transmisiju valne energije  | 26  |
| 3.3. Utjecaj uronjenosti plutajućeg pontona na transmisiju valne energije                        | 31  |
| 3.4. Ispravnost jednadžbe za predviđanje koeficijenta transmisije prema Ruol i sur., 2013.<br>32 |     |
| 3.5. Jednostavna formulacija za predviđanje transmisije valne energije                           | 33  |

|   |    |
|---|----|
| 4. Zaključak.....                       | 35 |
| 5. Prilog.....                          | 37 |
| 5.1. Rezultati mjerenja u valnom kanalu | 37 |
| 6. Popis Literature .....               | 44 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Tipovi lukobrana (Carević i Pršić, 2021.).....  | 3  |
| Slika 2 $\pi$ plutajući lukobran (preuzeto s Marinetek, 2023) .....   | 4  |
| Slika 3 Promjena koeficijenta transmisije u ovisnosti o relativnoj dubini za djelomično uronjenu plutajuću strukturu (ponton) prema rezultatima istraživanja provednog od strane Brebner i Ofuya (1968.).....             | 6  |
| Slika 4 Valni kanal u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu: valni kanal (lijevo gore), valni generator tip piston (desno gore), pasivni disipator valne (lijevo dolje), ponton (desno dolje)..... | 10 |
| Slika 5 Nacrt valnog kanala i ugrađene opreme sa naznačenim pozicijama postavljanja fizikalnih modela pontona i pozicijama mjernih sonde za praćenje dinamike razine vode ispred i iza ispitivanih pontona .....          | 11 |
| Slika 6 Fotografije 3D print modela BRK 5320 tijekom izrade (gore), izrađen model BRK 5320 (dolje lijevo) .....   | 13 |
| Slika 7 Nacrti plutajućeg lukobrana BRK 5320.....   | 14 |
| Slika 8 Modelski sustav sidrenja pontona sa pozicijama polaganja sidrenih blokova (Levanat d.o.o, 2021.).....   | 15 |
| Slika 9 Fotografije detalja sidrenog sustava u valnom kanalu.....   | 15 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 10 Fotografija mjernih sonde u valnom kanalu u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu .....   | 17 |
| Slika 11 Valna serija za testove 10 (gore) i 46 (dolje) .....   | 22 |
| Slika 12 Valna serija za testove 18 (gore) i 54 (dolje) .....   | 23 |
| Slika 13 Valna serija za testove 36 (gore) i 72 (dolje) .....   | 24 |
| Slika 14 Valna serija za testove 33 (gore), 33p (sredina) i 33pp (dolje) .....  | 26 |
| Slika 15 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije $Kt$ po kategorijama dubine, kutijasti dijagrami ispunjeni bojom označavaju mjerene vrijednosti u okviru ovog rada, dok šrafirani kutijasti dijagrami označavaju predviđanja koeficijenta transmisije u skladu s jednadžbom Ruol i sur, 2013. .... | 27 |
| Slika 16 Preljevanje preko modela lukobrana u Hidrotehničkom laboratoriju .   | 28 |
| Slika 17 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije $Kt$ u odnosu na omjer valne dužine koji pripada vršnom periodu vala i dubine vode .....   | 29 |
| Slika 18 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije $Kt$ u odnosu na valnu dužinu koji pripada vršnom periodu vala .....   | 30 |
| Slika 19 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije $Kt$ u odnosu na valnu dužinu koji pripada vršnom periodu vala i dubine vode .....   | 31 |
| Slika 20 Omjer rezultata mjerenja koeficijenta transmisije $Kt$ i koeficijenta transmisije predviđenog iz jednadžbe Ruol i sur., 2013. u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana .....   | 32 |
| Slika 21 Mjereni koeficijenti transmisije $Kt$ u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana .....   | 33 |
| Slika 22 Mjereni koeficijenti transmisije $Kt$ u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana .....   | 34 |

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Udaljenost mjernih sondi od početka valnog kanala ..... 16

Tablica 2 Parametri monokromatskih valova za provedene eksperimente tijekom laboratorijskog ispitivanja (mjerilo prirode) ..... 18

Tablica 3 Parametri monokromatskih valova za provedene eksperimente tijekom laboratorijskog ispitivanja (mjerilo modela) ..... 20

## POPIS KORIŠTENIH FIZIKALNIH VELIČINA

| Fizikalna veličina          | Oznaka | Mjerna jedinica |
|-----------------------------|--------|-----------------|
| Energija dolazećeg vala     | $E_I$  | joul (J)        |
| Transmitirana energija vala | $E_T$  | joul (J)        |
| Reflektirana energija vala  | $E_R$  | joul (J)        |
| Disipirana energija vala    | $E_D$  | joul (J)        |
| Visina dolazećeg vala       | $H_I$  | metar (m)       |
| Visina transmitiranog vala  | $H_T$  | metar (m)       |
| Visina reflektiranog vala   | $H_R$  | metar (m)       |
| Visina disipacije vala      | $H_V$  | metar (m)       |
| Valna visina                | $H_s$  | metar (m)       |
| Koeficijent transmisije     | $K_t$  | -               |
| Koeficijent refleksije      | $K_R$  | -               |
| Koeficijent disipacije      | $K_v$  | -               |
| Valni period                | $T$    | sekunde (s)     |
| Valna duljina               | $L$    | metri (m)       |
| Valna visina                | $H$    | metri (m)       |
| Dubina vode                 | $h$    | metri (m)       |
| Dubina                      | $d$    | metri (m)       |
| Širina strukture            | $w$    | metar (m)       |
| Vršni valni period          | $T_P$  | sekunde (s)     |

*Popis korištenih kratica*

|   |           |             |
|---|-----------|-------------|
| Period prirodne oscilacije<br>uzdizanja       | $T_h$     | sekunde (s) |
| Gravitacijsko ubrzanje                        | g         | $m/s^2$     |
| Parametar skaliranja (Ruol)                   | $\lambda$ | -           |
| Koef. transmisije prema<br>Macagnovoj formuli | $K_{TM}$  | -           |
| Gaz   | d         | metar (m)   |

**POPIS KORIŠTENIH KRATICA**

| Kratica | Opis                                  |
|---------|---------------------------------------|
| DHI     | Danski hidraulički institut           |
| AWACS   | Active Wave Absorption Control System |

## SAŽETAK

Lučki akvatorij predstavlja ključnu ulogu u pomorskom prometu, upravljanju lukama i osiguranju sigurnosti plovidbe, zbog toga je bitno adekvatno zaštititi to područje. Plutajući lukobrani se često koriste kao način zaštite akvatorija i plovila u lukama, stoga je bitno ispravno procijeniti prijenos valne energije. Cilj ovog rada je ispitati ispravnost formule za procjenu koeficijenta transmisije valne energije koju je predložio Ruol, 2013. godine na plutajući lukobran  $\pi$ -tipa pod utjecajem spektralnih valova te analizirati utjecaj dubine vodnog stupca na koeficijent transmisije. Mjerenja su provedena u valnom kanalu na modelu plutajućeg lukobrana  $\pi$ -tipa izvedenog u mjerilu 1:21. Incidentni i transmitirani valni parametri mjereni su pomoću osam mjernih sonda. Na temelju mjerenih valnih serija izračunat je koeficijent transmisije. Analizom podataka uočeno je da rastom dubine vode na raste koeficijent transmisije. Pokazalo se da formula predložena od Ruol i sur, 2013. podcjenjuje mjerenja za 25% za male vrijednosti  $T_p/T_h$  ( $1,0 < T_p/T_h < 1,20$ ), dok za veće omjere za velike  $T_p/T_h$  ( $1,30 < T_p/T_h < 1,60$ ) i male dubine formula precjenjuje za 15% , dok je za velike dubine u tom rasponu perioda formula gotovo u potpunosti točna. Na kraju, izveden je polinom koji povezuje omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja pontona s koeficijentom transmisije mjerenom u ovom radu.

ključne riječi: plutajući lukobran, spektralni valovi, koeficijent transmisije, zaštita akvatorija, marina



## **SUMMARY**

The harbor area plays a crucial role in maritime traffic, port management, and ensuring navigational safety, making it essential to adequately protect this area. Floating breakwaters are often used as a means of protecting the harbor and vessels in ports, so it is crucial to accurately assess the transmission of wave energy. The aim of this study is to examine the accuracy of the formula for estimating the wave energy transmission coefficient proposed by Ruol et al. in 2013. for a floating breakwater of the  $\pi$ -type under the influence of spectral waves and to analyze the effect of water depth on the transmission coefficient. Measurements were conducted in a wave flume using a 1:21 scale model of a  $\pi$ -type floating breakwater. Incident and transmitted wave parameters were measured using eight measuring probes. Based on the measured wave data, the transmission coefficient was calculated. Data analysis revealed that an increase in water depth causes an increase in the transmission coefficient. It was found that the formula proposed by Ruol et al. in 2013. underestimates measurements by 25% for small values of  $T_p/T_h$  ( $1.0 < T_p/T_h < 1.20$ ), while for larger  $T_p/T_h$  values ( $1.30 < T_p/T_h < 1.60$ ) and shallow depths, the formula overestimates by 15%. However, for large depths within the same  $T_p/T_h$  range, the formula is almost entirely accurate. Lastly, a polynomial was derived that relates the peak wave period to the natural heave oscillation of the breakwater with the transmission coefficient measured in this study.

key words: floating breakwater, spectral waves, transmission coefficient, sheltering harbors, marine

## 1. UVOD

Lučki akvatoriji može biti prirodno ili umjetno zaštićena vodena površina luke. To je vodno područje unutar luka ili oko pristaništa namijenjeno za pomorski promet, upravljanje lukama te za sigurnost plovidbe. Glavni dijelovi lučkog akvatorija su lučki manevarski akvatorij i lučki operativni akvatorij.

Uloga lučkog manevarskog akvatorija je osigurati siguran i brz prilaz brodova na vez. Najveće je dubine u luci, a dijelovi lučkog manevarskog akvatorija su: ulaz, okretište te prolaz prema lučkim obalama.

Lučki operativni akvatorij služi za vezivanje brodova uz operativnu obalu sa svrhom prekrcaja. Dijelovi lučkog operativnog akvatorija su operativni bazen i vezovi. Prostire se uzduž lučke obalne zone i operativnih obala. Lučki operativni akvatoriji je u lukama odijeljen molovima na lučke bazene (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2023.).

Kako bi se zaštitio akvatorij luka i marina od nailaska valova (više o spektralnim valovima u poglavlju 1.1) grade se različite unutarnje i vanjske pomorske građevine koje osiguravaju sigurnu plovidbu i zaštitu od prirodnih nepogoda. Unutarnje pomorske građevine za zaštitu lučkog akvatorija su: obalni zid (operativna obala), molo, gat, utvrđica, dalba, plutača te uređena obala. Najčešće vanjske hidrotehničke građevine za zaštitu lučkog akvatorija su lukobrani i ostale građevine u konstruktivnom smislu slične lukobranima a to su: valobran, valolom i obaloutvrda. Grade se u prijelaznoj i plitkoj dubini mora te su direktno izloženi djelovanju valova (Carević i Pršić, 2021.). Lukobrani funkcijski imaju ulogu umanjenja valovima uzrokovanu agitaciju unutar zaštićenog akvatorija na prihvatljivu razinu (detaljnije u poglavlju 1.2). Obično se prihvatljiva razina valova unutar zaštićenih akvatorija odnosi na vrijednosti propisane od strane (Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture, 2020).

### 1.1. Spektralni valovi

Spektralni opis valova je realni, a ne idealiziran, prikaz morskih valova. U spektralnom opisu morskih uvjeta glavni pokazatelj je energetska spektar. Spektralni pristup omogućava analizu raspodjele valne energije u odnosu na valni period unutar 5-15 minutnog valnog zapisa. Valni spektar predstavlja distribuciju valnih visina i perioda u određenom vremenskom i prostornom kontekstu. Ovakvi spektri se matematički opisuju uz pomoć funkcije spektralne gustoće  $S_{\eta\eta}(f)$ . Nepravilni valni zapis  $\eta(t)$  smatra se periodičnom funkcijom koja se može rastaviti Froudovom

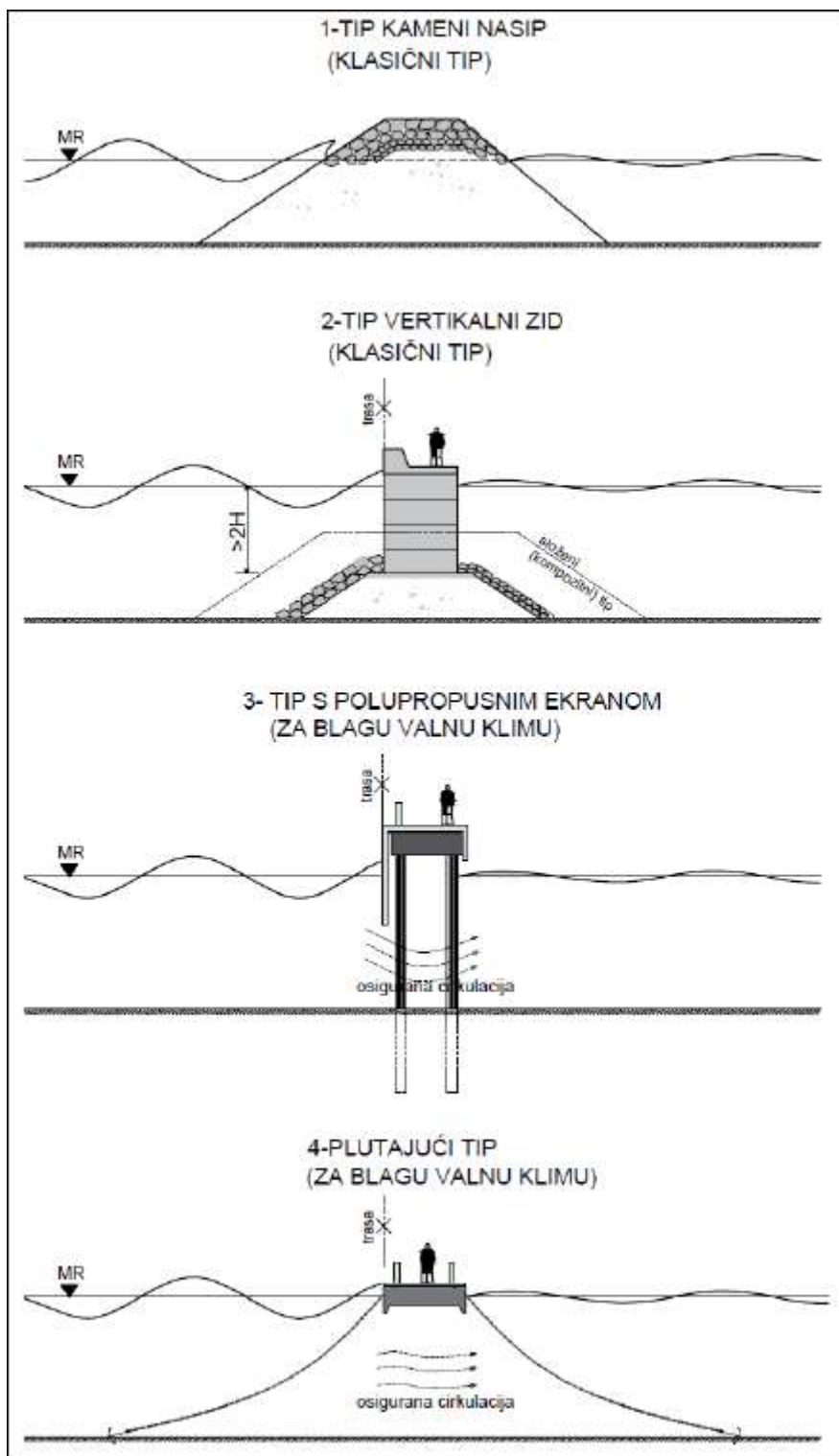
transformacijom na niz pravilnih komponenti (sinusnih valova,  $\eta_i$ ) određenih amplituda i perioda. Funkcija  $S_{\eta\eta}(f)$  se naziva funkcijom spektralne gustoće valne energije, energetski spektar ili spektar izdizanja površine mora. Konstruira se primjenom Fourierove transformacije.

## 1.2. Lukobrani

Valovi mogu uzrokovati smanjenu funkcionalnost akvatorija. Kako bi se ublažio ovaj učinak valova koriste se lukobrani. Svojom dužinom, lukobran štiti luku iz smjera dolaska valova, dok visina lukobrana sprječava veliku većinu prelijevanja valova. Osim što štiti od valova, lukobran ima funkciju prevencije štetnih utjecaja morskih struja i pronosa nanosa. U slučaju zaštite od nanosa i morskih struja, lukobran svojom dužinom i položajem usmjerava struje i sprječava pronos nanosa na području akvatorija luke.

Po svojoj konstrukciji lukobrani mogu biti izgrađeni na morskom dnu od nasipa ili od betona. Za lokacije manje izložene valovima koriste se polupropusni i plutajući lukobrani. Kao što je prikazano na slici 1 (Carević i Pršić, 2021.) razlikujemo četiri tipa lukobrana s obzirom na presjek: lukobran tipa nasip, lukobran tipa zid, lukobran s polupropusnim ekranom i plutajući lukobran (detaljnije o plutajućim lukobranima u poglavlju 1.3).

Prema svom tlocrtu, lukobran može biti jednostrani i dvostrani. Njegovi tlocrtni dijelovi su: korijen lukobrana kao veza s obalom na obalnoj liniji, trup te glava lukobrana koja predstavlja ojačani morski završetak konstrukcije. U slučaju da lukobran nije povezan s kopnom nema korijen, nego se sastoji od trupa i dvije glave.

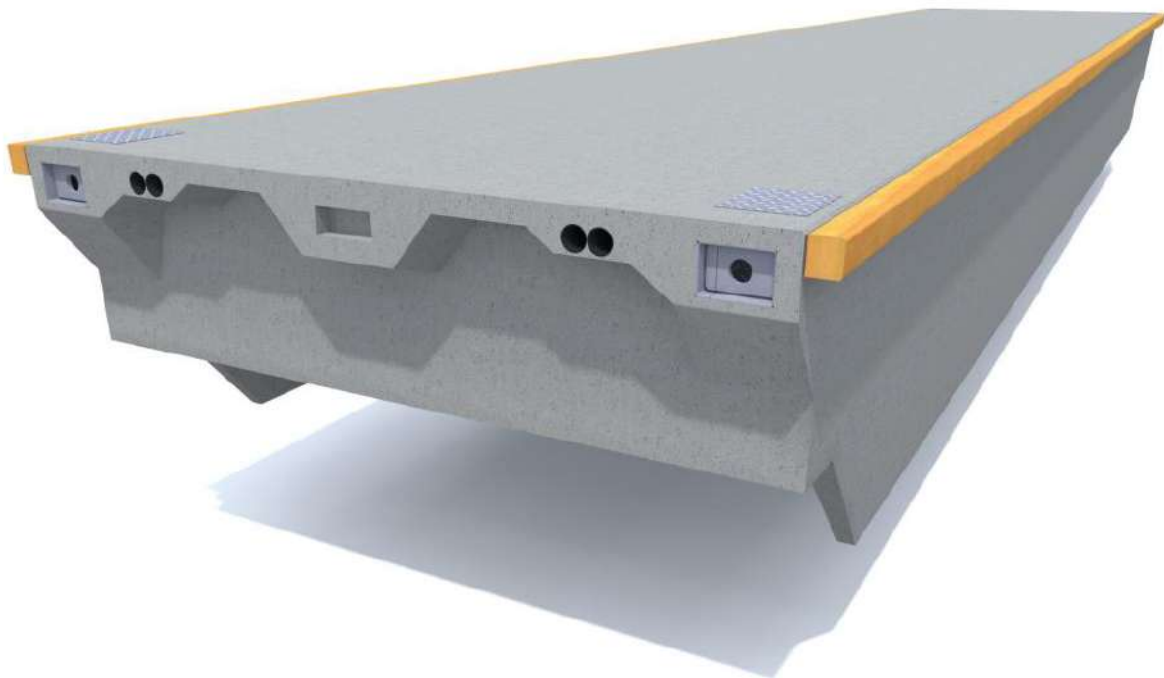


Slika 1 tipovi lukobrana (Carević i Pršić, 2021.)

### 1.3. Plutajući lukobran

Plutajući lukobran najčešće se koristi u manjim lukama s blagom valnom klimom, valnog perioda do 4 s i valnom visinom do 1,5 m. Postoje razni oblici poprečnog presjeka plutajućeg pontona, a u ovom radu ćemo se fokusirati na  $\pi$  plutajući lukobran.

Poprečni presjek razmatranog lukobrana je pravokutnik s dvije bočne ploče usmjerene prema dolje što podsjeća na grčko slovo  $\pi$  po čemu je ovakav tip lukobrana dobio i ime. Predgotovljeni elementi plutajućeg lukobrana međusobno se povezuju i pojedinačno sidre.



Slika 2  $\pi$  plutajući lukobran (preuzeto s Marinetek, 2023)

#### 1.3.1. Transmisija energije ispod plutajućeg lukobrana

Energija dolazećeg vala se na uronjenu prepreku može podijeliti na tri dijela: na dio koji se odnosi na transmisiju, na dio koji se odnosi na refleksiju, i dio koji se disipira kroz složeni proces opstrujavanja same strukture pontona. Direktno mjerenje gubitaka energije nije moguće provesti, već posredno mjerenjem refleksije i transmisije energije. Energetska ravnoteža za dvodimenzionalni slučaj konstrukcije pontona poprima opći oblik:

$$E_I = E_T + E_R + E_V \quad (1)$$

Za energetski udio pojedinih dijelova ukupne energije dolazećeg vala, preformulacijom jednadžbe 1 dobiva se:

$$1 = \frac{E_T}{E_I} + \frac{E_R}{E_I} + \frac{E_V}{E_I} \quad (2)$$

Prilikom korištenja teorije valova prvog reda, prema jednadžbi 2 udio pojedinih dijelova ukupne energije dolazećeg vala može se izraziti kao:

$$K_T^2 = \frac{E_T}{E_I} = \left(\frac{H_T}{H_I}\right)^2 \quad (3)$$

$$K_R^2 = \frac{E_R}{E_I} = \left(\frac{H_R}{H_I}\right)^2 \quad (4)$$

$$K_V^2 = \frac{E_V}{E_I} = \left(\frac{H_V}{H_I}\right)^2 \quad (5)$$

Iz jednadžbe 3 slijedi sljedeći izraz za određivanje koeficijenta transmisije:

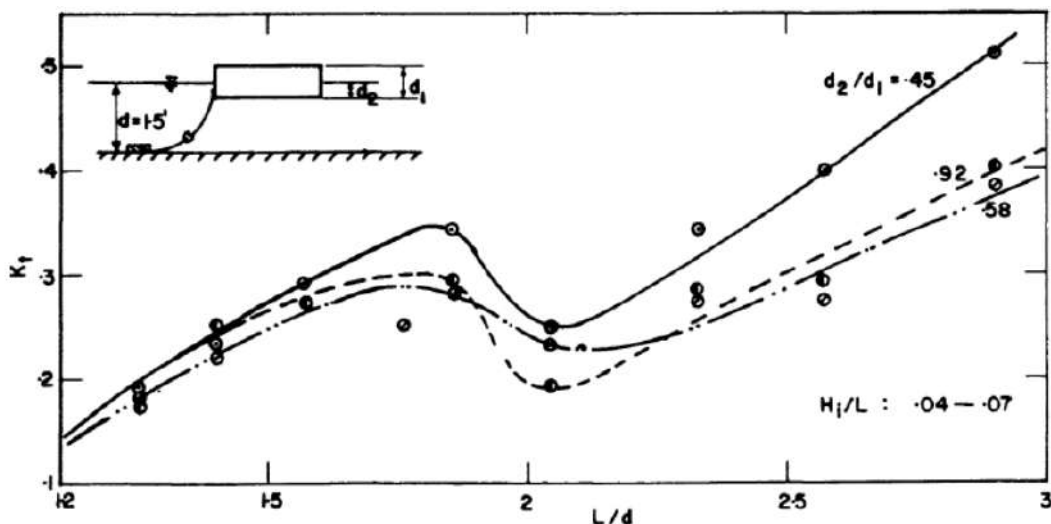
$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad (7)$$

Koeficijent transmisije  $K_t$  je u najopćenitijem slučaju funkcija sljedećih parametara:

$$K_t = f(T, L, H, d, w, H/L, d/L, w/L) \quad (8)$$

gdje je:  $T$  valni period,  $L$  valna duljina,  $H$  valna visina,  $d$  dubina,  $w$  širina strukture.

Koeficijent transmisije  $K_t$  ovisi o relativnoj dubini vode  $d/L$ , a temeljem istraživanja na fizikalnim modelima za „box type“ plutajuće pontone prepoznato je da prelaskom iz dubokovodnog ( $d/L > 0,5$ ) u prijelazno područje ( $d/L < 0,5$ ) dolazi do općenitog povećanja transmisije valne energije, osim u zoni gdje odnos  $L/d$  iznosi između 1,8 i 2,1 (slika 3, Brebner i Ofuya (1968)). Stoga se pontone i izbjegava koristiti u prijelaznom i plitkovodnom području ( $d/L < 0,5$ ).



Slika 3 Promjena koeficijenta transmisije u ovisnosti o relativnoj dubini za djelomično uronjenu plutajuću strukturu (ponton) prema rezultatima istraživanja provednog od strane Brebner i Ofuya (1968.)

Macagno (1954.) je ponudio izraz za transmisiju vala kroz fiksiranu djelomično uronjenu konstrukciju u formi kvadra, s duljinom vala  $L$  gdje je  $d$  gaz,  $w$  širina pontona,  $h$  dubina vode i  $k = \frac{2\pi}{L}$  :

$$K_{TM} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( kw \frac{\sinh kh}{2 \cdot \cosh(kh - kd)} \right)^2}} \quad (9)$$

Macagnova formula (9) za predviđanje koeficijenta transmisije primjenjiva je jedino za navedeni tip pontona i to uz dodatna ograničenja. U slučaju kada je gaz  $d$  jednak dubini vode  $h$  dolazi do transmisije iako u tom slučaju ona nije očekivana. Kada se Macagnova formula (9) koristi za predviđanje koeficijenta transmisije kod nepravilnih valova, valna duljina zamijenjena je s prosječnom valnom duljinom izračunata na temelju prosječnog valnog

perioda ( $T = T_p / 1,1$ ). Ukoliko se formula primjenjuje za  $\pi$ -tip pontona formula daje netočne rezultate, iz tog razloga dolazi do potrebe za unaprjeđenjem i prilagođavanjem Macagnove formule (9).

Unaprjeđenje i proširenje prethodno dane jednadžbe (9) prezentirano je u radu Roul i sur. (2013.), pri čemu je dan poluempirički izraz za proračun koeficijenta transmisije pontona  $\pi$  oblika (jednadžbe 10, 11 i 12):

$$\chi = \frac{T_p}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{d + 0.35w}} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\chi - \chi_0}{\sigma}\right) e^{-\left(\frac{\chi - \chi_0}{\sigma}\right)^2}} \quad (11)$$

$$K_T = \beta(\chi)K_{TM} \quad (12)$$

Jednadžba (10) daje približno jednaku vrijednost kao i odnos  $T_p/T_h$  te je, zbog jednostavnosti, preporučljivo da se rezultati za koeficijent transmisije prikazuju u zavisnosti o funkciji  $X$  (10). U slučaju kada valovi na konstrukciju ne udaraju okomito, već pod nekim kutem, parametar  $X$  se može izraziti preko valne duljine  $L$  i dubine vode  $d$ . Ovaj postupak je prikladniji iz razloga što se kut vala može izraziti preko valne duljine koja je okomita na smjer kretanja vala. Kod viših valova očekivana je veća disipacija i prelijevanje preko plutajućeg pontona, što je direktno povezano s mjerilom modela. Za pronalazak prikladnog izraza za  $\beta$  (11), autori su uveli uvjete:  $K_T = K_{TM}$  u slučaju vrlo dugih i vrlo kratkih valova, odnosno eksperimentalno su došli do zaključka da je  $\beta=1$  kada je  $X>1,3$  i  $X<0,3$ . Jednadžba (11) se slaže s eksperimentalnim podacima, obuhvaćajući raspon  $X$  (0,5; 1,5), gdje je  $X_0=0,7919$  i  $\sigma=0,1922$ .

Izraz (12) povezuje koeficijent transmisije za  $\pi$ -tip plutajuće pontone te Macagnov izraz za koeficijent transmisije za „box type“ plutajuće pontone.

Sažeto, glavni cilj rada Ruol i sur. (2013.) jest pronaći jednostavan izraz za procjenu koeficijenta transmisije za  $\pi$ -tip plutajućeg lukobrana na temelju empirijskog i teorijskog, odnosno analitičkog pristupa. Martinelli i sur. (2008) i Ruol i sur. (2008) postavili su jednostavnu bezdimenzionalnu varijablu  $T_p/T_h$  koja je pokazala dobro slaganje s koeficijentom transmisije, gdje je  $T_p$  vršni period vala, a  $T_h$  predstavlja vertikalno osciliranje vala. Kod  $\pi$ -tipa plutajućeg lukobrana,  $T_h$  nije jednostavno odrediti zbog složene geometrije pontona. Stoga se



pristupilo izradi jednostavne empirijske formule koja ugrubo predviđa  $T_h$  za  $\pi$ -tipa plutajućeg lukobrana. Testovi korišteni za izradu formule provedeni su valno tunelu na Sveučilištu u Padovi. Osam modela izrađenih u mjerilu 1:10 prilagođeni su empirijskoj formuli koja se koristi kao korektivni faktor Macagnovog odnosa. Pri oblikovanju formule odlučeno je da se utjecaj valne visine na transmisiju koji je uočen u eksperimentu neće uzimati u obzir, nego će se fokusirati na dinamiku samog pontona opisanu, već spomenutom, bezdimenzijskom veličinom.

Cilj ovog rada je provjeriti ispravnost metodologije predstavljene u Ruol i sur. (2013.) za proračun koeficijenta transmisije ispod pontonskog lukobrana pod utjecajem spektralnih valova. U poglavlju prikazanih rezultata provedenih istraživanja prikazat će se komparativno vrijednosti koeficijenta transmisije dobivenih provedbom mjerenja na fizikalnom modelu i dobivenih proračunom temeljem jednadžbi 9-12. Također će se dati osvrt na utjecaj dubine vodnog stupca na količinu transmisije valne energije kroz pontonski lukobran.

## 2. METODOLOGIJA

### 2.1. Fizikalni model

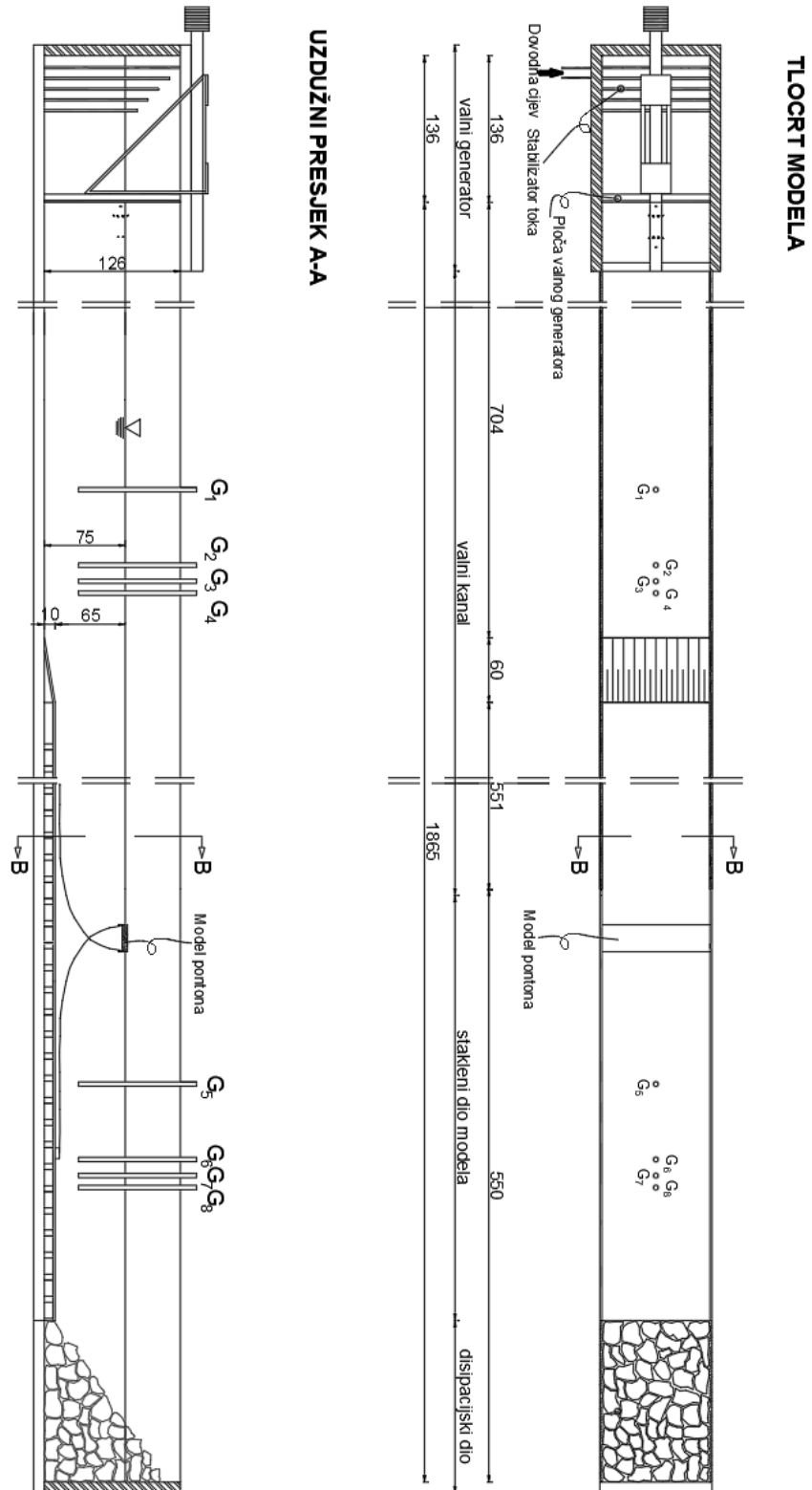
#### 2.1.1. Valni kanal

Ispitivanja su provedena u valnom kanalu u Hidrotehničkom laboratoriju Zavoda za hidrotehniku, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U ispitivanju su korišteni spektralni valova s valnom visinom od  $H = 0,048$  m do  $H = 0,057$  m, a generirani su u mjerilu koje odgovara mjerilu duljina izvedenog fizikalnog modela pontona (mjerilo 1:21). Temeljem izmjerenih vrijednosti značajnih valnih visina ispred i iza modela pontona određeni su pripadni koeficijenti transmisije ( $Kt$ ). Ispitivanje je provedeno isključivo za ortogonalni nailazak valova na pontone.

Valni kanal u kojem su provedena ispitivanja nalazi se u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu (slika 4). Bočne stranice su izrađene od iverice, a pod i bočni zidovi su obloženi vodonepropusnom izolacijom. Na dijelu valnog kanala su s jedne strane ugrađeni stakleni paneli radi vizualnog praćenja hidrauličke fenomenologije (slika 4). Duljina valnog kanala je 18,35 m, širina je 1 m i visine 1,1 m (slika 5). Na udaljenosti 7,6 m od valnog generatora smanjuje se dubina u valnom kanalu uzdizanjem poda za 0,1 m (slika 5). Povišena podloga sačinjena je od drvenog materijala koji omogućuje učvršćivanje modela pontona za dno bez oštećenja vodonepropusne membrane koja je ugrađena po obodu valnog kanala. Na početku valnog kanala postavljen je valni generator. Disipacijska dionica nalazi se na kraju valnog kanala (slika 4 i slika 5), i izveden je od manjih kamenih blokova srednjeg promjera 0.3 m. Svrha disipacijske dionice je da se što efikasnije smanji refleksija valova od stijenke kraja valnog kanala.



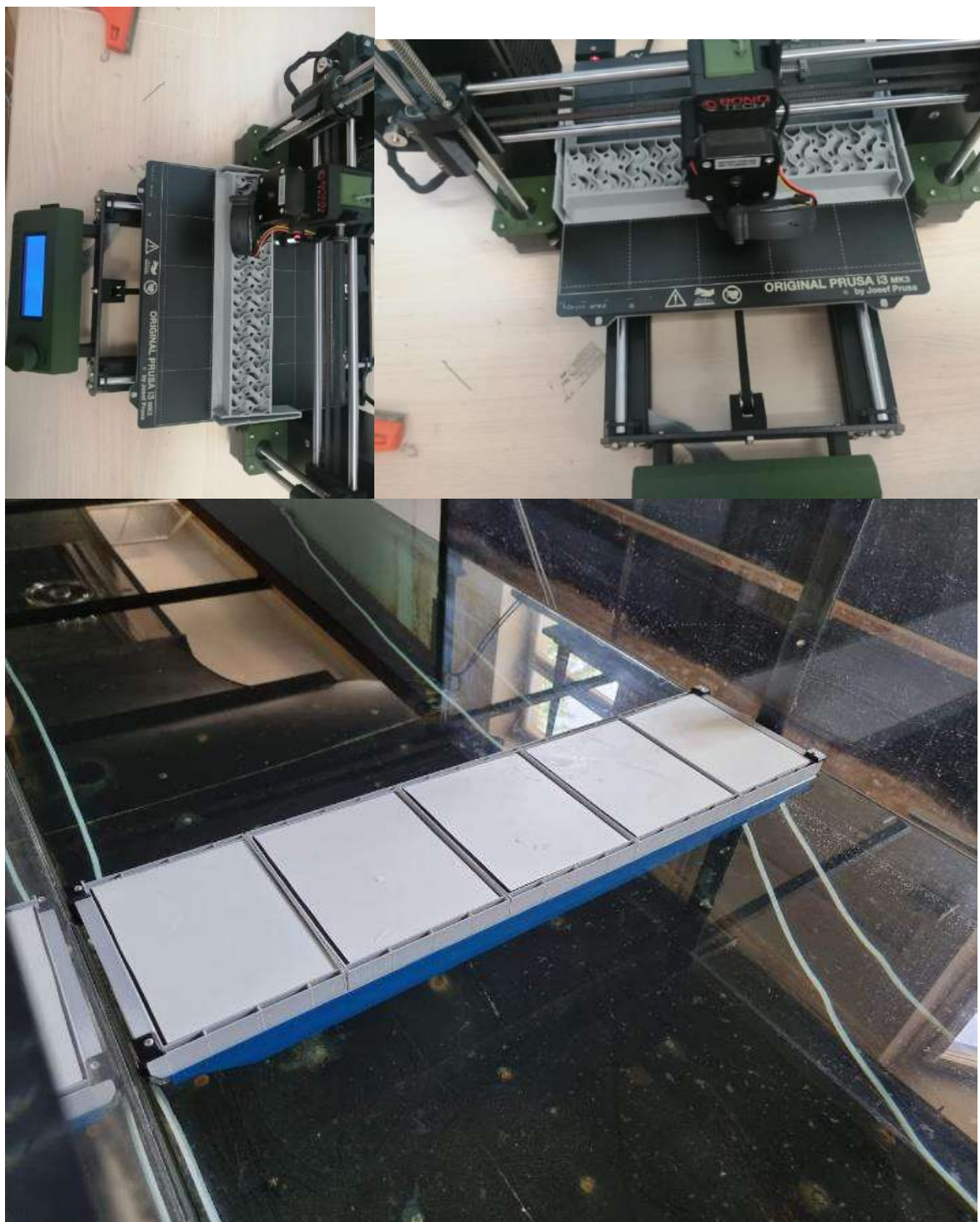
Slika 4 Valni kanal u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu: valni kanal (lijevo gore), valni generator tip piston (desno gore), pasivni disipator valne (lijevo dolje), ponton (desno dolje)



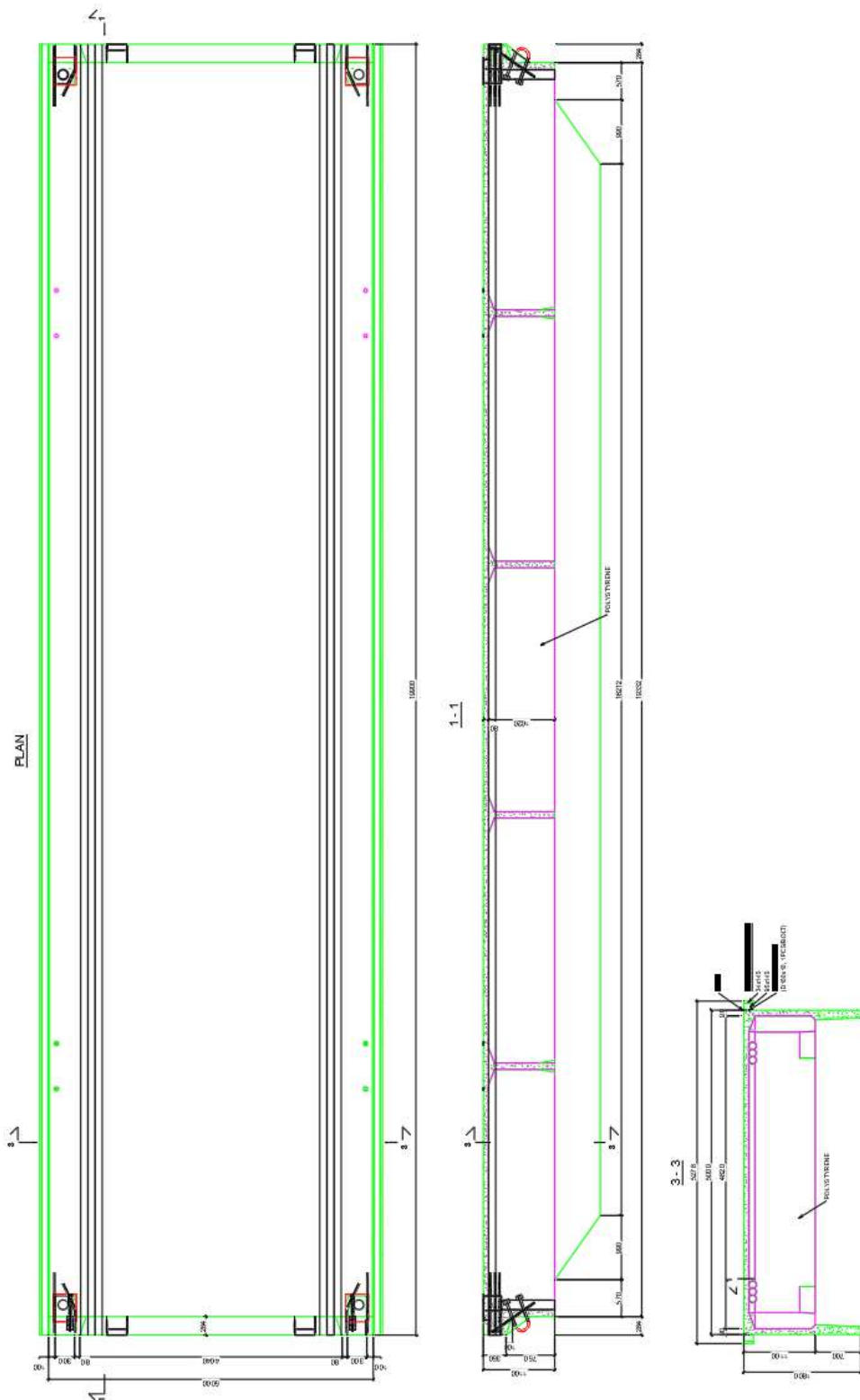
Slika 5 Nacrt valnog kanala i ugrađene opreme sa naznačenim pozicijama postavljanja fizikalnih modela pontona i pozicijama mjernih sondi za praćenje dinamike razine vode ispred i iza ispitivanih pontona

### 2.1.2. Plutajući lukobran

Na udaljenosti od 14,9 m od početka kanala postavlja se fizikalni model pontona BRK 5320 (proizvođača Marinetek), izvedeni 3D printerom (slika 6). Širina modela BRK 5320 iznosi 0,24 m, dok je duljina pontona 0,95 m (slika 6). Na bočnim stranama pontona pružaju se ploče duljine 0,09 m, usmjerene prema dolje, što podsjeća na grčko slovo  $\pi$  po kojemu je ovakav tip lukobrana i dobio ime. Kao što je vidljivo na slikama 6 i 7, model je sidren s četiri sidrena konopa. Sidrenje modela pontona se vrši na način da se svaki lanac veže na jedan rub pontona te na pridneno položene sidrene blokove, tzv. „corpo morte“ (slike 8 i 9). Svaki konop duljine je 1,93 m, na kraju kojih se nalaze sidreni blokovi težine 1 kg međusobno udaljeni 0,9 m. Točne pozicije polaganja sidrenih blokova u valnom kanalu prikazane su na slici (Levanat d.o.o., 2021.). Na plutajući lukobran su postavljene ploče koje povećavaju težinu lukobrana. Ploče se mogu izvaditi što dovodi do isplivavanja lukobrana, odnosno, smanjenja gaza.

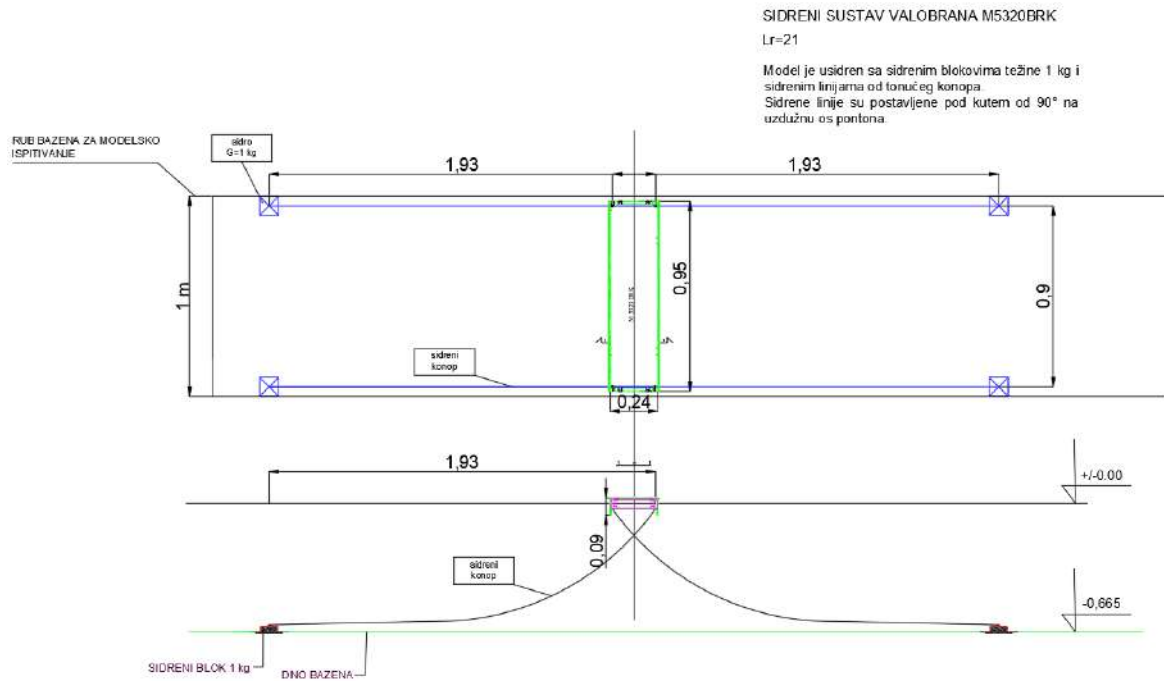


Slika 6 Fotografije 3D print modela BRK 5320 tijekom izrade (gore), izrađen model BRK 5320 (dolje lijevo)



Slika 7 Nacrti plutajućeg lukobrana BRK 5320





Slika 8 Modelski sustav sidrenja pontona sa pozicijama polaganja sidrenih blokova (Levanat d.o.o, 2021.)



Slika 9 Fotografije detalja sidrenog sustava u valnom kanalu

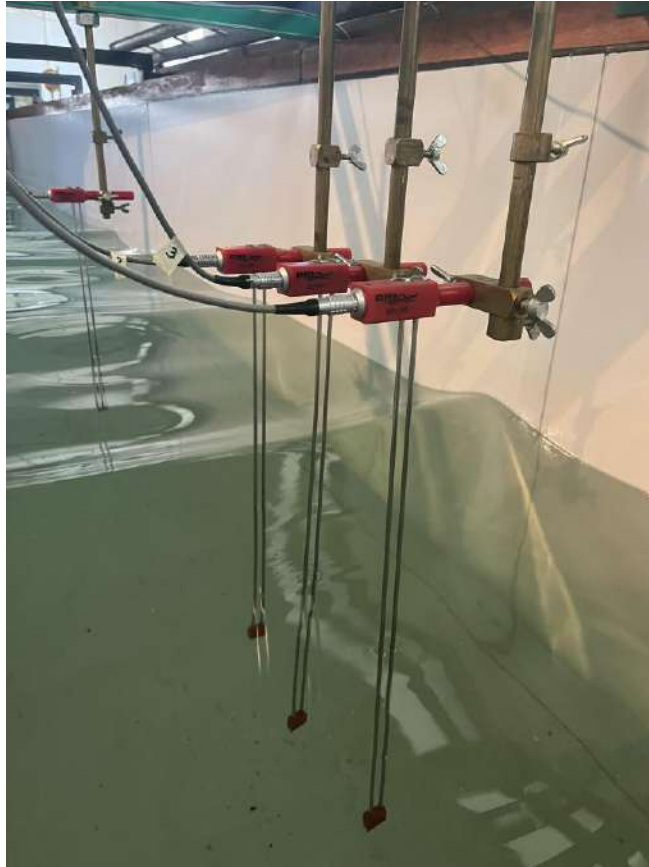


## 2.2. Mjerna oprema

Postavljeno je ukupno 8 mjernih sondi za praćenje dinamike vodnog lica, a koje su postavljene na udaljenostima (od početka kanala) prema prikazu danom u Tablica 1. Transmisija valne energije mjerena je korištenjem četiri kapacitivne sonde pozicionirane ispred plutajućeg lukobrana s ciljem mjerenja valnih parametara dolaznih valova (G1 – G4) i četiri kapacitivne sonde postavljene iza lukobrana u svrhu mjerenja valnih parametra transmitiranih valova kroz propust (G5 – G8). Frekvencijom uzorkovanja kapacitivnih sondi u iznosu od 40 Hz se osigurava izbjegavanje poduzorkovanja (*engl. Aliasing*). Podaci valnih visina mjereni pomoću kapacitivnih sondi su u potpunosti vjerodostojni, stoga su se koristile izvorne vremenske serije u daljnjoj obradi u okviru numeričkog modeliranja. Za analizu transmisije spektralnih valova provela se separacija incidentnog i reflektiranog vala kako bi se tako određene valne visine mogle koristiti u daljnjim analizama i definiranju obrazaca.

Tablica 1 Udaljenost mjernih sondi od početka valnog kanala

| Pozicija sondi |       |
|----------------|-------|
| G1             | 5.67  |
| G2             | 6.37  |
| G3             | 6.52  |
| G4             | 6.63  |
| G5             | 14.79 |
| G6             | 15.49 |
| G7             | 15.64 |
| G8             | 15.75 |



Slika 10 Fotografija mjernih sondi u valnom kanalu u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu

### 2.3. Valovni parametri

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

Za adekvatnu statističku obradu zapisa spektralnog vala koji je prikladniji za opis valne klime u prirodi od matematički jednostavnijih monokromatskih valova je primijenjena vremenska serija od 3 min. Izabran je niz karakterističnih spektralnih valova koji se mogu naći u morima sličnim Jadranskom u smislu dužine privjetrišta te jačini i smjeru vjetra (Tablica 2). Usvajanjem mjerila duljina fizikalnog modela  $L_R = 21$ , vrijednosti parametara u mjerilu prirode prebačene su u odgovarajuće vrijednosti u mjerilu fizikalnog modela (Tablica 3).

Tablica 2 Parametri spektralnih valova za provedene eksperimente tijekom laboratorijskog ispitivanja (mjerilo prirode)

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) |
|-------------|--------|-------|
| 1           | 1      | 20    |
| 2           | 1      | 25    |
| 3           | 1      | 30    |
| 4           | 1      | 35    |
| 5           | 1.1    | 22    |
| 6           | 1.1    | 27.5  |
| 6p          | 1.1    | 27.5  |
| 6pp         | 1.1    | 27.5  |
| 7           | 1.1    | 33    |
| 8           | 1.1    | 38.5  |
| 9           | 1.2    | 24    |
| 10          | 1.2    | 30    |
| 10p         | 1.2    | 30    |
| 10pp        | 1.2    | 30    |
| 11          | 1.2    | 36    |
| 12          | 1.2    | 42    |
| 13          | 1      | 20    |
| 14          | 1      | 25    |
| 15          | 1      | 30    |
| 16          | 1      | 35    |
| 16p         | 1      | 35    |
| 16pp        | 1      | 35    |
| 17          | 1.1    | 22    |
| 18          | 1.1    | 27.5  |
| 18p         | 1.1    | 27.5  |
| 18pp        | 1.1    | 27.5  |
| 19          | 1.1    | 33    |
| 20          | 1.1    | 38.5  |
| 21          | 1.2    | 24    |

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) |
|-------------|--------|-------|
| 22          | 1.2    | 30    |
| 23          | 1.2    | 36    |
| 24          | 1.2    | 42    |
| 25          | 1      | 20    |
| 26          | 1      | 25    |
| 27          | 1      | 30    |
| 28          | 1      | 35    |
| 29          | 1.1    | 22    |
| 29p         | 1.1    | 22    |
| 29pp        | 1.1    | 22    |
| 30          | 1.1    | 27.5  |
| 31          | 1.1    | 33    |
| 32          | 1.1    | 38.5  |
| 33          | 1.2    | 24    |
| 33p         | 1.2    | 24    |
| 33pp        | 1.2    | 24    |
| 34          | 1.2    | 30    |
| 35          | 1.2    | 36    |
| 36          | 1.2    | 42    |
| 37          | 1      | 20    |
| 38          | 1      | 25    |
| 39          | 1      | 30    |
| 40          | 1      | 35    |
| 41          | 1.1    | 22    |
| 42          | 1.1    | 27.5  |
| 42p         | 1.1    | 27.5  |
| 42pp        | 1.1    | 27.5  |
| 43          | 1.1    | 33    |
| 44          | 1.1    | 38.5  |

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) |
|-------------|--------|-------|
| 45          | 1.2    | 24    |
| 46          | 1.2    | 30    |
| 47          | 1.2    | 36    |
| 48          | 1.2    | 42    |
| 49          | 1      | 20    |
| 50          | 1      | 25    |
| 51          | 1      | 30    |
| 52          | 1      | 35    |
| 53          | 1.1    | 22    |
| 54          | 1.1    | 27.5  |
| 54p         | 1.1    | 27.5  |
| 54pp        | 1.1    | 27.5  |
| 55          | 1.1    | 33    |
| 56          | 1.1    | 38.5  |
| 57          | 1.2    | 24    |
| 58          | 1.2    | 30    |

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) |
|-------------|--------|-------|
| 59          | 1.2    | 36    |
| 60          | 1.2    | 42    |
| 61          | 1      | 20    |
| 62          | 1      | 25    |
| 63          | 1      | 30    |
| 64          | 1      | 35    |
| 65          | 1.1    | 22    |
| 66          | 1.1    | 27.5  |
| 66p         | 1.1    | 27.5  |
| 66pp        | 1.1    | 27.5  |
| 67          | 1.1    | 33    |
| 68          | 1.1    | 38.5  |
| 69          | 1.2    | 24    |
| 70          | 1.2    | 30    |
| 71          | 1.2    | 36    |
| 72          | 1.2    | 42    |

Tablica 3 Parametri spektralnih valova za provedene eksperimente tijekom laboratorijskog ispitivanja (mjerilo modela)

| Naziv testa | Hs (m) | Lp (m) |
|-------------|--------|--------|
| 1           | 0.048  | 0.952  |
| 2           | 0.048  | 1.190  |
| 3           | 0.048  | 1.429  |
| 4           | 0.048  | 1.667  |
| 5           | 0.052  | 1.048  |
| 6           | 0.052  | 1.310  |
| 6p          | 0.052  | 1.310  |
| 6pp         | 0.052  | 1.310  |
| 7           | 0.052  | 1.571  |
| 8           | 0.052  | 1.833  |
| 9           | 0.057  | 1.143  |
| 10          | 0.057  | 1.429  |
| 10p         | 0.057  | 1.429  |
| 10pp        | 0.057  | 1.429  |
| 11          | 0.057  | 1.714  |
| 12          | 0.057  | 2.000  |
| 13          | 0.048  | 0.952  |
| 14          | 0.048  | 1.190  |
| 15          | 0.048  | 1.429  |
| 16          | 0.048  | 1.667  |
| 16p         | 0.048  | 1.667  |
| 16pp        | 0.048  | 1.667  |
| 17          | 0.052  | 1.048  |
| 18          | 0.052  | 1.310  |
| 18p         | 0.052  | 1.310  |
| 18pp        | 0.052  | 1.310  |
| 19          | 0.052  | 1.571  |

| Naziv testa | Hs (m) | Lp (m) |
|-------------|--------|--------|
| 20          | 0.052  | 1.833  |
| 21          | 0.057  | 1.143  |
| 22          | 0.057  | 1.429  |
| 23          | 0.057  | 1.714  |
| 24          | 0.057  | 2.000  |
| 25          | 0.048  | 0.952  |
| 26          | 0.048  | 1.190  |
| 27          | 0.048  | 1.429  |
| 28          | 0.048  | 1.667  |
| 29          | 0.052  | 1.048  |
| 29p         | 0.052  | 1.048  |
| 29pp        | 0.052  | 1.048  |
| 30          | 0.052  | 1.310  |
| 31          | 0.052  | 1.571  |
| 32          | 0.052  | 1.833  |
| 33          | 0.057  | 1.143  |
| 33p         | 0.057  | 1.143  |
| 33pp        | 0.057  | 1.143  |
| 34          | 0.057  | 1.429  |
| 35          | 0.057  | 1.714  |
| 36          | 0.057  | 2.000  |
| 37          | 0.048  | 0.952  |
| 38          | 0.048  | 1.190  |
| 39          | 0.048  | 1.429  |
| 40          | 0.048  | 1.667  |
| 41          | 0.052  | 1.048  |
| 42          | 0.052  | 1.310  |

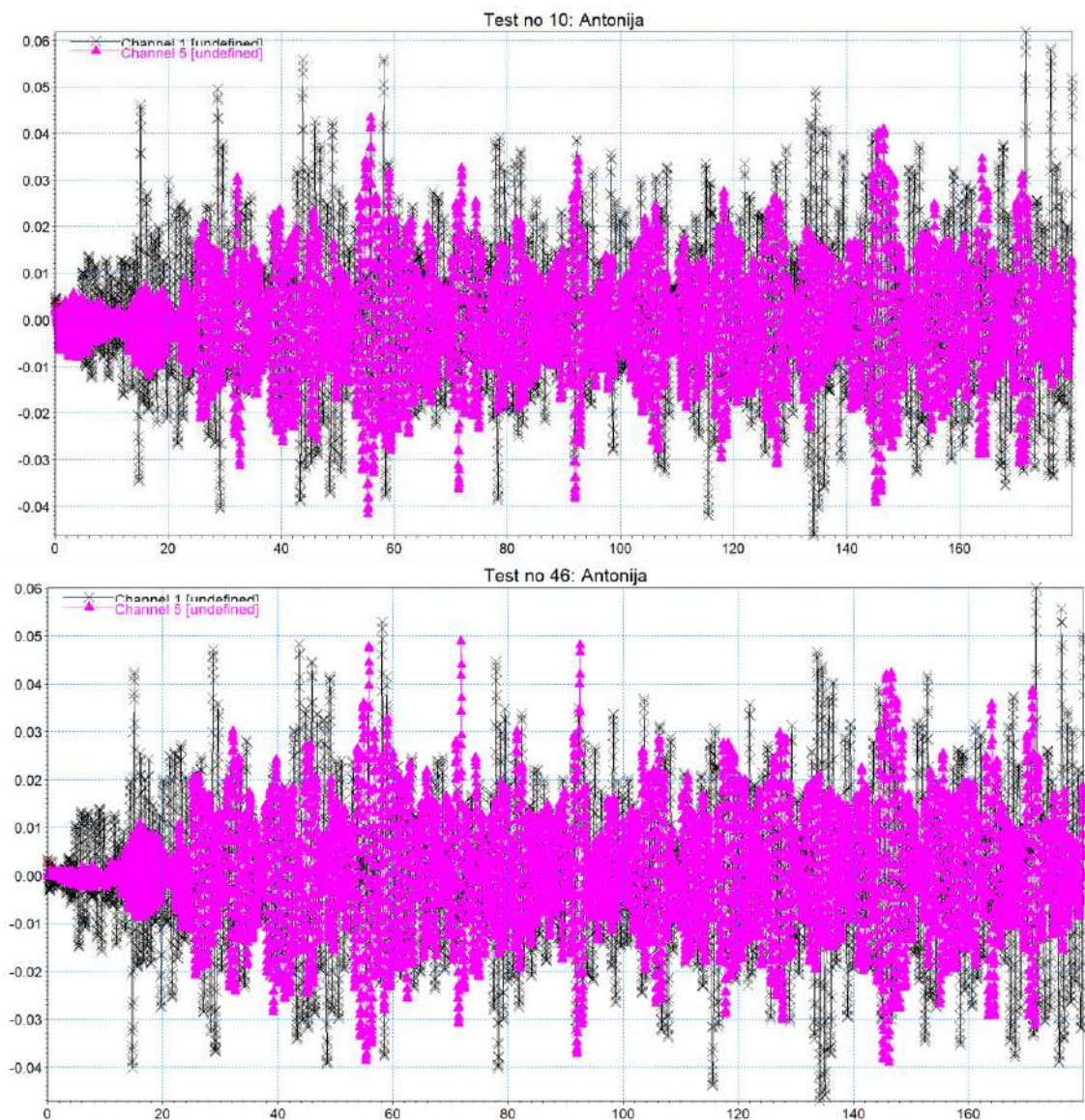
| Naziv testa | Hs (m) | Lp (m) |
|-------------|--------|--------|
| 42p         | 0.052  | 1.310  |
| 42pp        | 0.052  | 1.310  |
| 43          | 0.052  | 1.571  |
| 44          | 0.052  | 1.833  |
| 45          | 0.057  | 1.143  |
| 46          | 0.057  | 1.429  |
| 47          | 0.057  | 1.714  |
| 48          | 0.057  | 2.000  |
| 49          | 0.048  | 0.952  |
| 50          | 0.048  | 1.190  |
| 51          | 0.048  | 1.429  |
| 52          | 0.048  | 1.667  |
| 53          | 0.052  | 1.048  |
| 54          | 0.052  | 1.310  |
| 54p         | 0.052  | 1.310  |
| 54pp        | 0.052  | 1.310  |
| 55          | 0.052  | 1.571  |
| 56          | 0.052  | 1.833  |

| Naziv testa | Hs (m) | Lp (m) |
|-------------|--------|--------|
| 57          | 0.057  | 1.143  |
| 58          | 0.057  | 1.429  |
| 59          | 0.057  | 1.714  |
| 60          | 0.057  | 2.000  |
| 61          | 0.048  | 0.952  |
| 62          | 0.048  | 1.190  |
| 63          | 0.048  | 1.429  |
| 64          | 0.048  | 1.667  |
| 65          | 0.052  | 1.048  |
| 66          | 0.052  | 1.310  |
| 66p         | 0.052  | 1.310  |
| 66pp        | 0.052  | 1.310  |
| 67          | 0.052  | 1.571  |
| 68          | 0.052  | 1.833  |
| 69          | 0.057  | 1.143  |
| 70          | 0.057  | 1.429  |
| 71          | 0.057  | 1.714  |
| 72          | 0.057  | 2.000  |

### 3. REZULTATI

#### 3.1. Valne serije

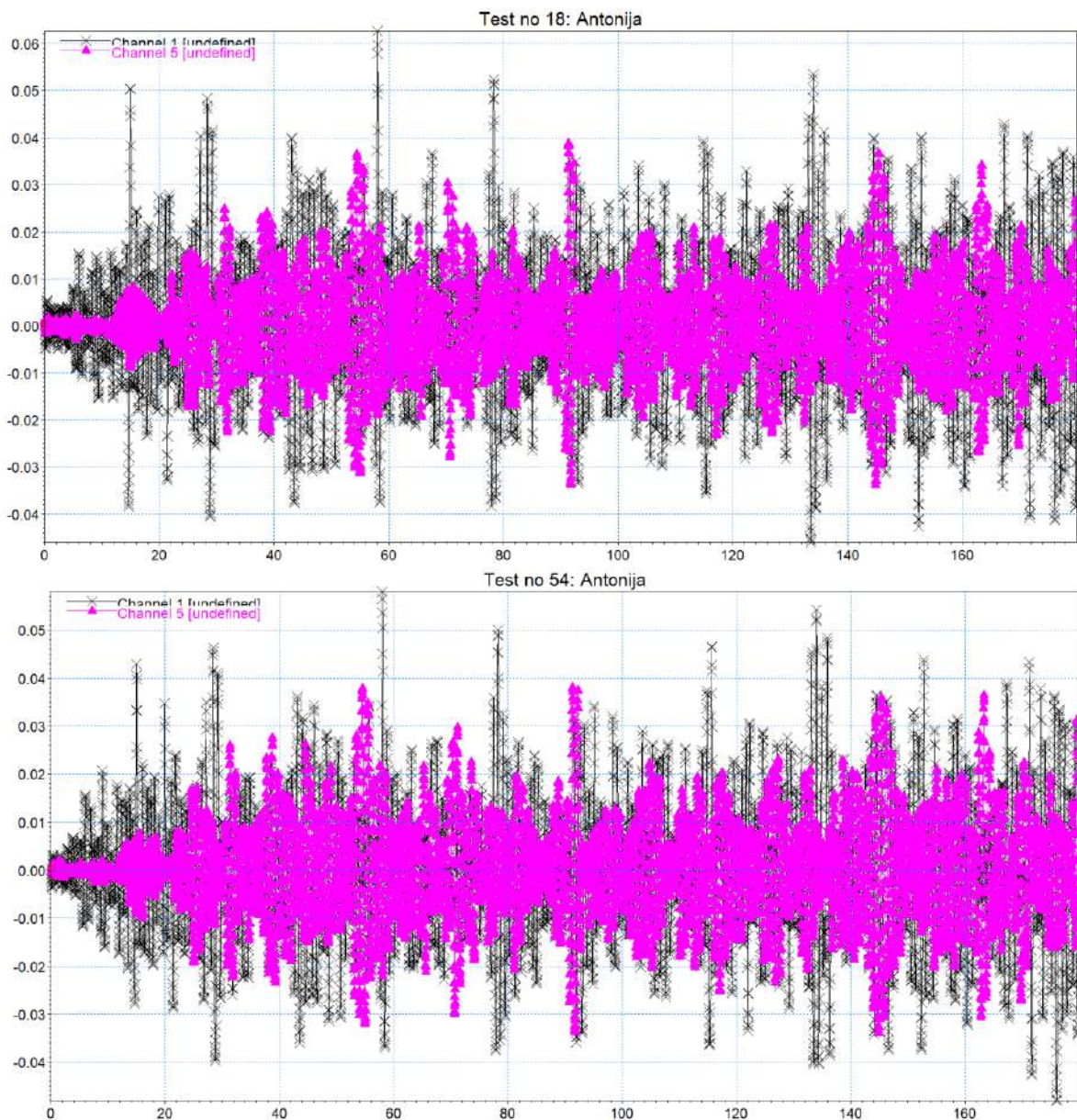
Na slici 11 prikazane su valne serije za testove 10 i 46. U oba testa dubina vode je 0,550 m dok gaz u testu 10 iznosi 0,060 m, a u testu 46 iznosi 0,057 m. Za dolazni val minimalna razina vodnog lica za test 10 i iznosi -0,0464 m, a maksimalna razina vodnog lica iznosi 0,0619 m. Za test 46 minimalna vrijednost vodnog lica je -0,0471 m, dok je maksimalna vrijednost 0,0601 m. Za transmitirani val minimalna razina vodnog lica za test 10 i iznosi -0,0417 m, a maksimalna razina vodnog lica iznosi 0,0434 m. Za test 46 minimalna vrijednost razine vodnog lica je -0,0391 m, dok je maksimalna vrijednost iznosi 0,0488 m.



Slika 11 Valna serija za testove 10 (gore) i 46 (dolje)



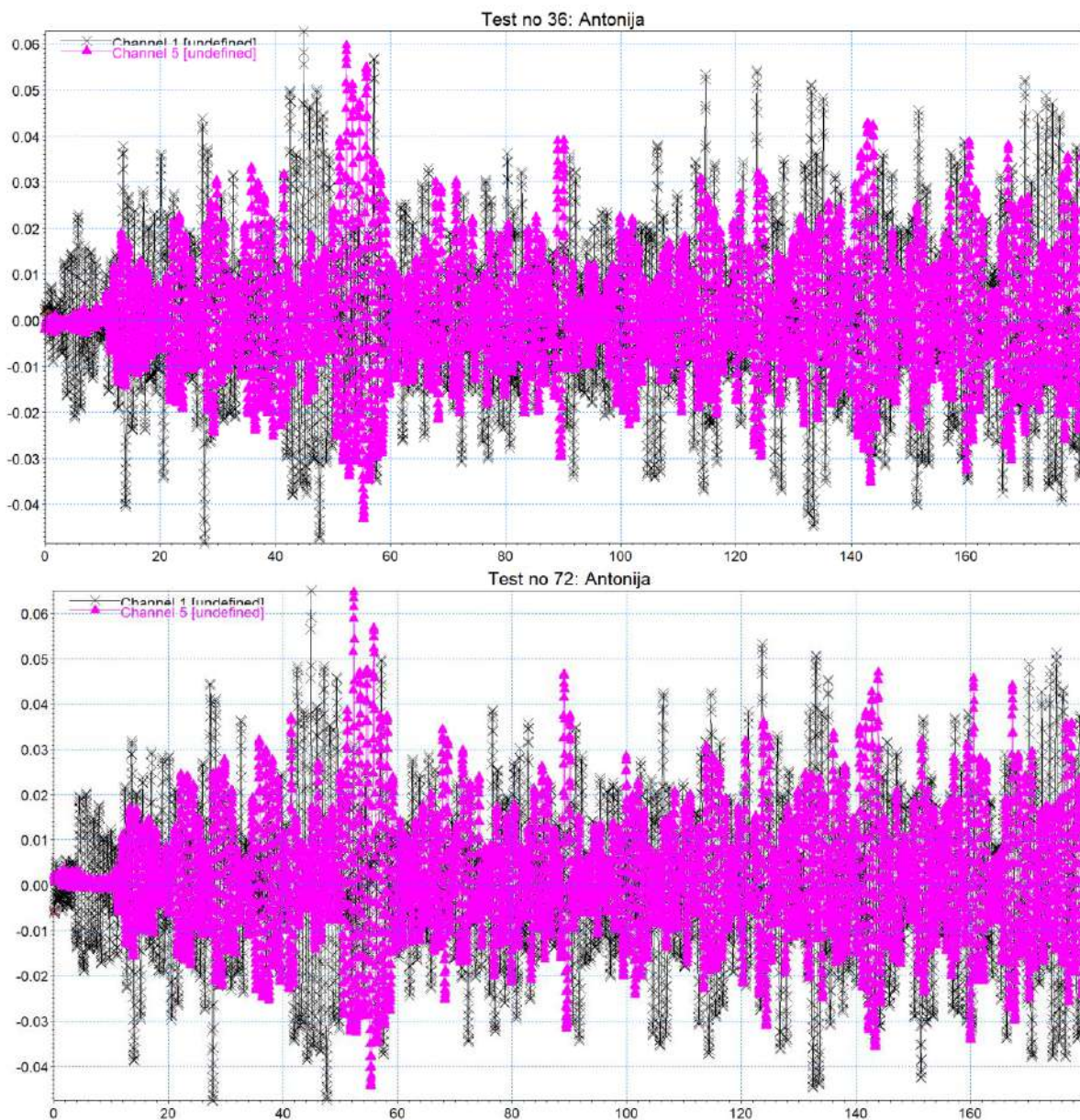
U testovima 18 i 54 prikazanim na slici 12, dubina vode je 0,350 m. Dubina gaza u mjerenju 18 je 0,060 m, a u testu 54 je 0,057 m. Za dolazni val minimalna razina vodnog lica za test 18 i iznosi -0,0460 m, a maksimalna razina vodnog lica iznosi 0,0627 m. Za test 54 minimalna vrijednost razine vodnog lica je -0,0481 m, dok je maksimalna vrijednost 0,0580 m. Za transmitirani val u testu 18 minimalna razina vodnog lica iznosi -0,0338 m, maksimalna vrijednost razine vodnog lica iznosi 0,0388 m. U testu 54 minimalna razina vodnog lica iznosi -0,0339 m, dok je maksimalna razina vodnog lica 0,0381 m.



Slika 12 Valna serija za testove 18 (gore) i 54 (dolje)



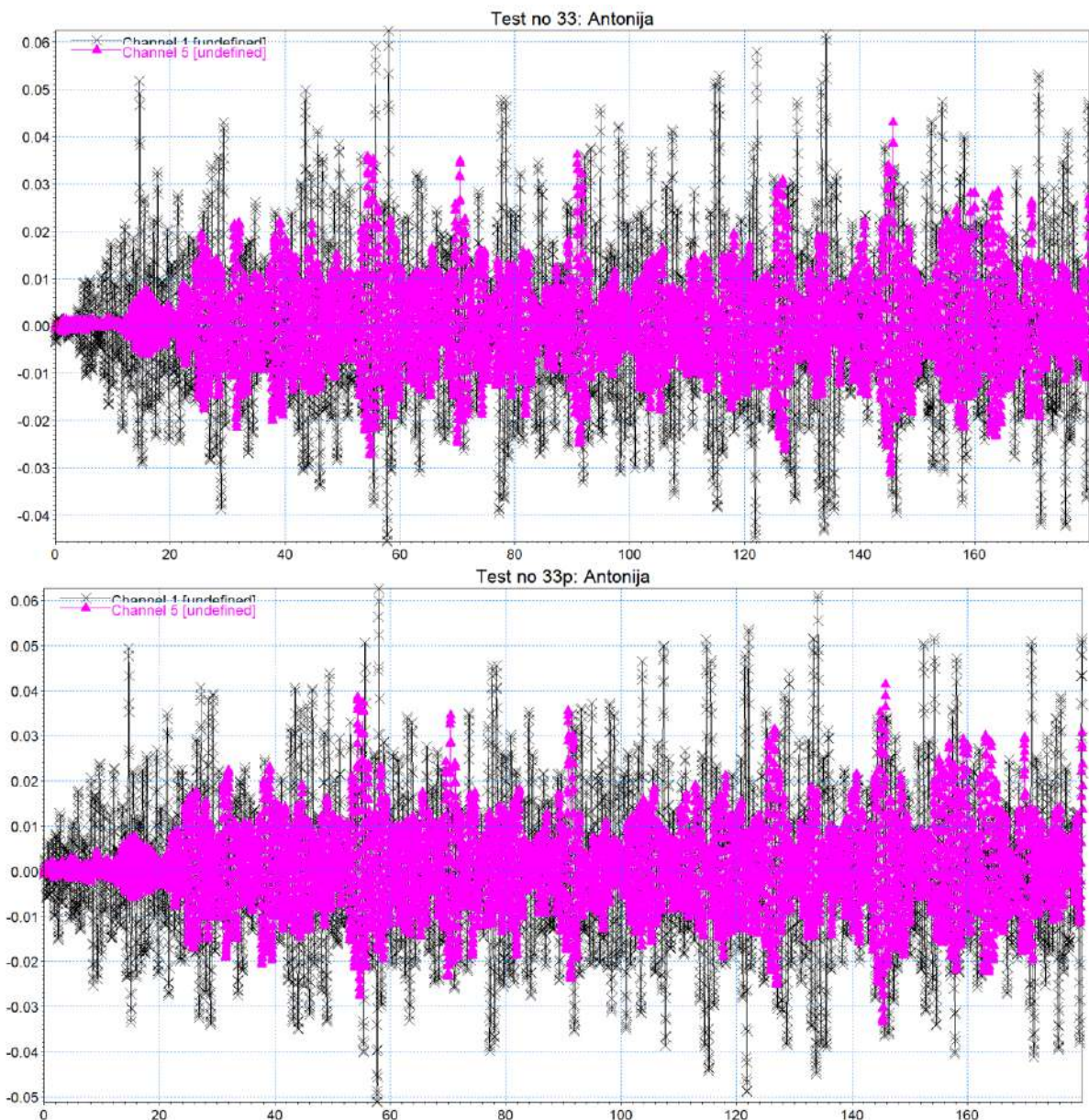
Na slici 13 prikazane su valne serije testova 36 i 72 kod kojih je dubina vode 0,270 m. Gaz kod testa 36 iznosi 0,060 m, a kod testa 72 iznosi 0,057 m. Za dolazni val, minimalna razina vodnog lica za test 36 i iznosi -0,0485 m, a maksimalna razina vodnog lica iznosi 0,0628 m. Za test 72 minimalna razina vodnog lica je -0,0476 m, dok je maksimalna razina 0,0650 m. Za transmitirani, val u testu 36 minimalna razina vodnog lica iznosi -0,04314 m, maksimalna razina 0,0598 m. U testu 72 minimalna razina vodnog lica iznosi -0,04438 m, dok maksimalna razina vodnog lica u testu 72 iznosi 0,06473 m.

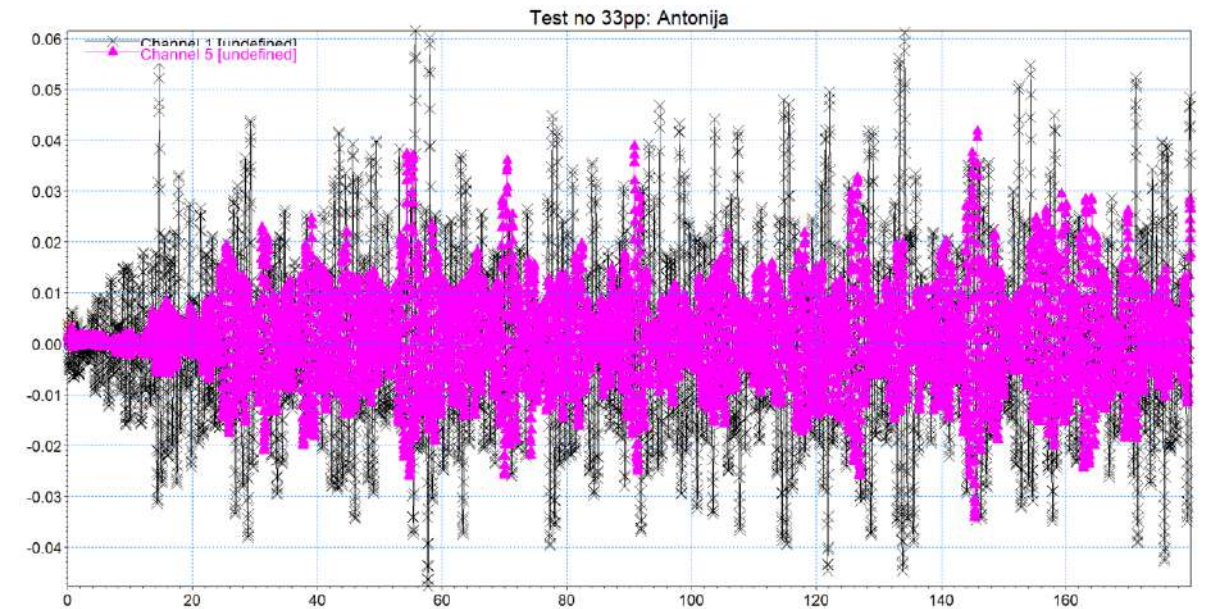


Slika 13 Valna serija za testove 36 (gore) i 72 (dolje)



Na slici 14 prikazani su testovi 33, 33p i 33pp koji imaju u potpunosti iste vrijednosti. Tako je dubine vode  $h = 0,270$  m, a dubina gaza pontona iznosi  $d = 0,060$  m. Provedeni su iz razloga kontrole točnosti mjerenja. Za dolazni val, u testu 33 minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0456$  m, a maksimalna  $0,0624$  m. U testu 33p minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0513$  m, a maksimalna  $0,0626$  m. U testu 33pp minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0477$  m, a maksimalna  $0,0615$  m. Za transmitirani val, u testu 33 minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0313$  m, a maksimalna  $0,0431$  m. U testu 33p minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0335$  m, a maksimalna  $0,0414$  m. U testu 33pp minimalna razina vodnog lica iznosi  $-0,0341$  m, a maksimalna  $0,0418$  m. Možemo primijetiti mala odstupanja u minimalnim i maksimalnim vrijednostima valnih visina





Slika 14 Valna serija za testove 33 (gore), 33p (sredina) i 33pp (dolje)

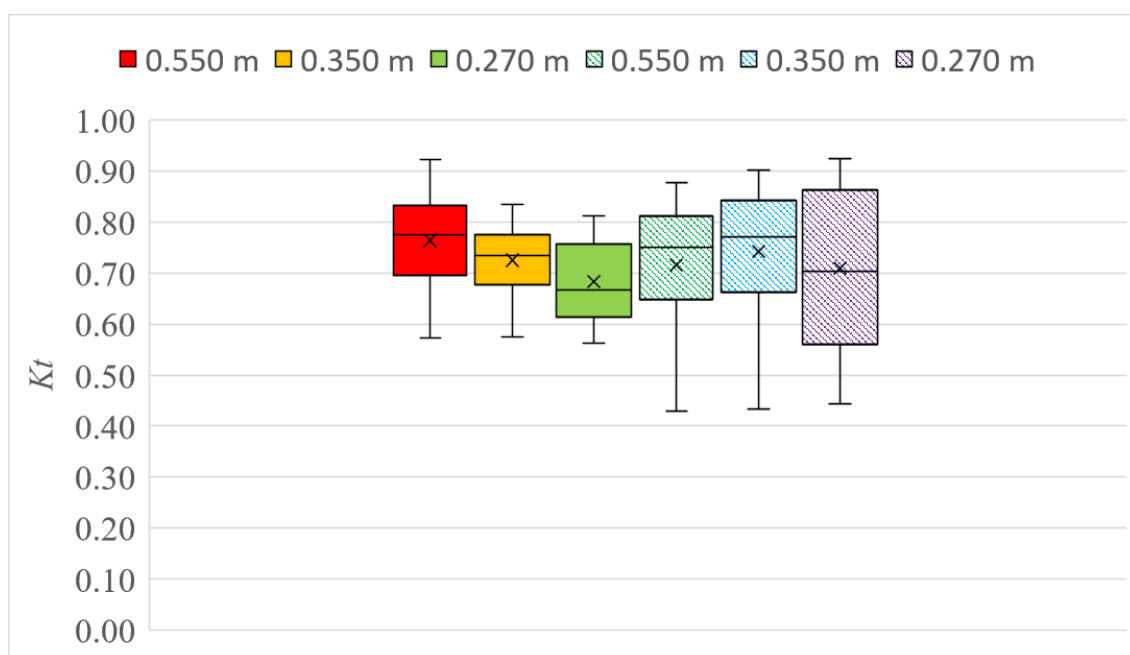
Prilikom mjerenja korišteno je osam sonde koje služe za razdvajanje spektra. Prve četiri sonde nalaze se ispred modela plutajućeg pontona i mjere promjene u razini vode (crna boja na slikama) te se separacijom spektra dobiva valna visina dolaznog vala koja se koristi za proračun koeficijenta transmisije pojedinog testa. Preostale četiri sonde nalaze se iza modela plutajućeg pontona i mjere promjene razine vode (ljubičasta boja na slikama) te se separacijom spektra na tim sondama dobiva valna visina transmitiranog vala koja se koristi za proračun koeficijenta transmisije (jed. 7).

### 3.2. Utjecaj dubine na transmisiju valne energije

Prema niže navedenoj slici 15 može se uočiti da postoji tendencija smanjenja uočene transmisije valne energije smanjenjem dubine vode na lokaciji plutajućeg lukobrana (ispunjeni kutijasti dijagrami na slici 15). Za dubinu 0,55 m koeficijent transmisije se kreće u rasponu od 0,57 do 0,92. Srednja vrijednost koeficijenta transmisije za ovu vrijednost iznosi 0,76, dok se medijan nalazi na vrijednosti od 0,78. Za dubinu 0,35 m raspon koeficijenta transmisije je od vrijednosti 0,57 do 0,83, je srednja vrijednost 0,72, a medijan iznosi 0,74. Na dubini od 0,270 m koeficijent transmisije varira od 0,56 do 0,81. Srednja vrijednost koeficijenta transmisije za dubinu 0,270 iznosi 0,68, dok je medijan 0,67. Možemo primijetiti da se maksimalna vrijednost koeficijent transmisije, srednja vrijednost koeficijenta transmisije

te medijan smanjuju sa smanjenjem dubine vode, dok je najmanja vrijednost koeficijenta transmisije približno jednaka za sve dubine.

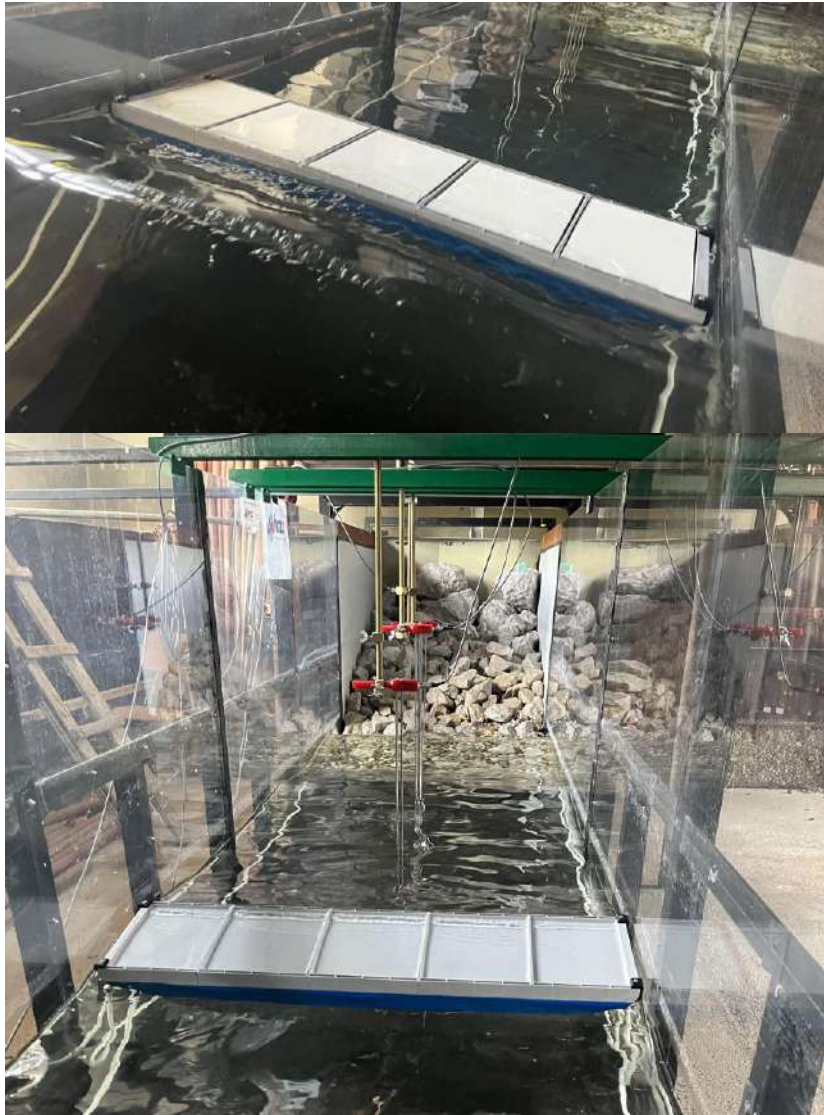
Šrafirani dijagrami koji predstavljaju predviđanja koeficijenta transmisije u skladu s jednadžbom Ruol i sur, 2013. prikazuju blagi, ali suprotan trend. Za najveću dubinu od 0,55 m koeficijent transmisije se kreće u rasponu od 0,43 do 0,88, srednja vrijednost iznosi 0,72 te se medijan nalazi na vrijednosti od 0,75. za dubinu 0,350 m koeficijent transmisije varira u rasponu od 0,43 do 0,90. Srednja vrijednost koeficijenta transmisije iznosi 0,74 dok se medijan nalazi na vrijednosti od 0,77. Za dubinu 0,270 raspon koeficijenta transmisije kreće se od 0,44 do 0,92, srednja vrijednost je 0,71 i medijan 0,70. Možemo primijetiti kako je koeficijent transmisije najveći za najmanju dubinu.



Slika 15 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije  $Kt$  po kategorijama dubine, kutijasti dijagrami ispunjeni bojom označavaju mjerene vrijednosti u okviru ovog rada, dok šrafirani kutijasti dijagrami označavaju predviđanja koeficijenta transmisije u skladu s jednadžbom Ruol i sur, 2013.

Razlog ovoj razlici se može pripisati fenomenu prelijevanja preko plutajućeg pontona koji se pojavljuje u većini testova koji su provedeni ovim radom, ali takvi slučajevi nisu uzeti u obzir u istraživanjima Ruola i sur, 2013. Stoga prelijevanje preko plutajućeg pontona također nije uzeto u obzir pri izradi jednadžbe za predviđanje koeficijenta transmisije koju su dali Ruol i sur, 2013. Manjom dubinom dolazi do većeg izdizanja valne visine, koja se zatim se u većoj mjeri preljeva preko pontona, što uzrokuje veću disipaciju energije i manju transmisiju valne energije.

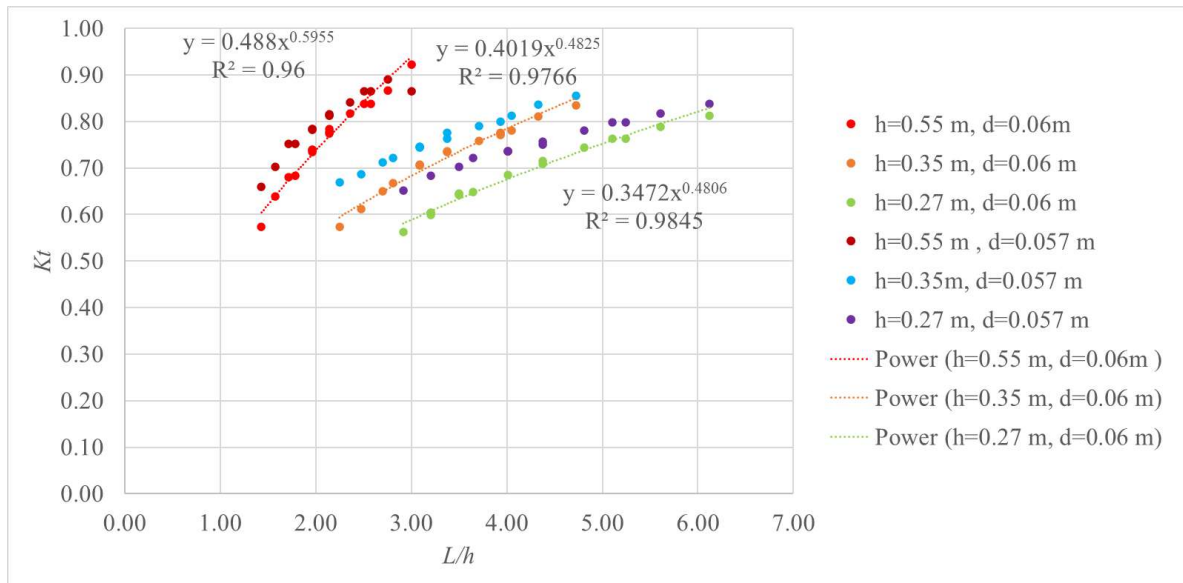




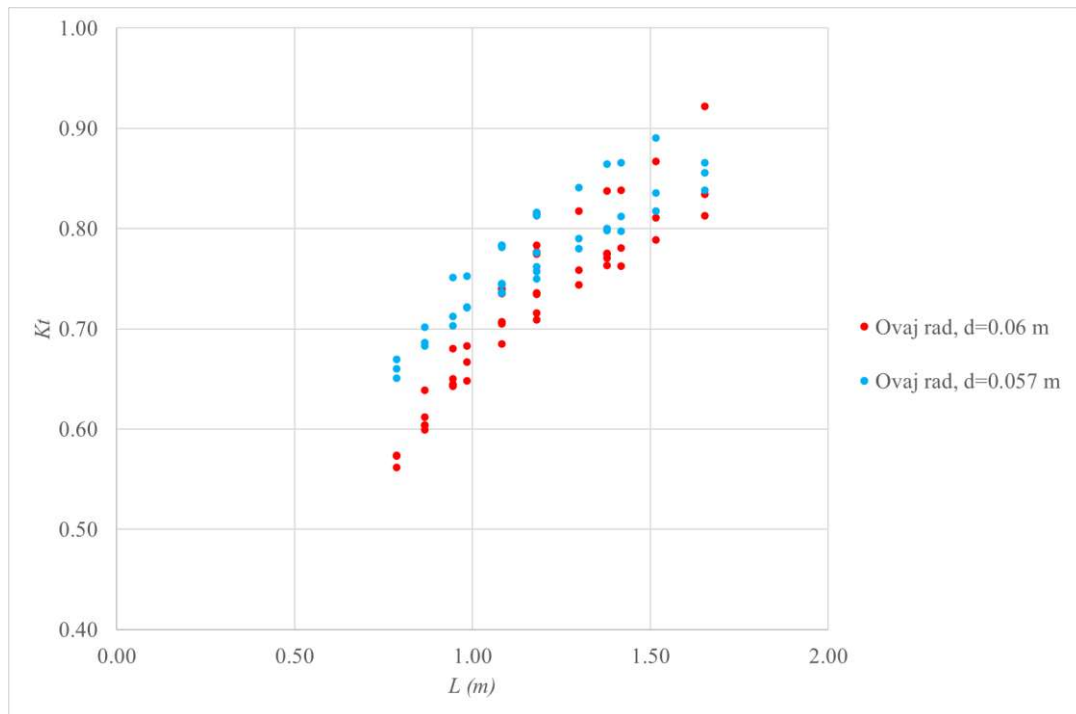
Slika 16 Preljevanje preko modela lukobrana u Hidrotehničkom laboratoriju

Promatrajući podatke na slici 3 (Brebner i Ofuya (1968.)) možemo zaključiti da će rastom odnosa valne dužine i dubine u biti rasti koeficijent transmisije. Taj funkcijski odnos je jednak i u ovom radu, gdje rastom omjera valne dužine koja pripada vršnom periodu i dubine vode raste i koeficijent transmisije. Ali treba uočiti da se taj funkcijski odnos zapravo mijenja s obzirom na dubinu vode na lokaciji pontona. Stoga se može vidjeti da će za najmanju dubinu od 0.27 m u kanalu (zelena boja na slici 17) koeficijenti transmisije biti manji za isti  $L/h$  nego što je to slučaj za dubine vode od 0.35 m i 0.55 m (narančasta i crvena boja na slici 17). Također, nije uočena sedlasta točka na grafu kako se to pokazalo u Brebner i Ofuya (1968.) u području  $1,7 < L/h < 2,0$ .

Došlo je do odvajanja ovih grafova prema kategoriji dubine vode, jer dubina voda u našim mjerenjima se pokazala kao manji utjecaj. To se može još jednom potvrditi, ako se razmotre graf kada na x-osi samo ostavimo valnu dužinu kako je to prikazano na slici 18. U ovom slučaju se ne dolazi do velikog odvajanja skupine točaka, što ukazuje da se je valna dužina dominantni faktor, a dubina vode slabiji faktor koji je proporcionalan s koeficijentom transmisije.



Slika 17 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije  $Kt$  u odnosu na omjer valne dužine koji pripada vršnom periodu vala i dubine vode

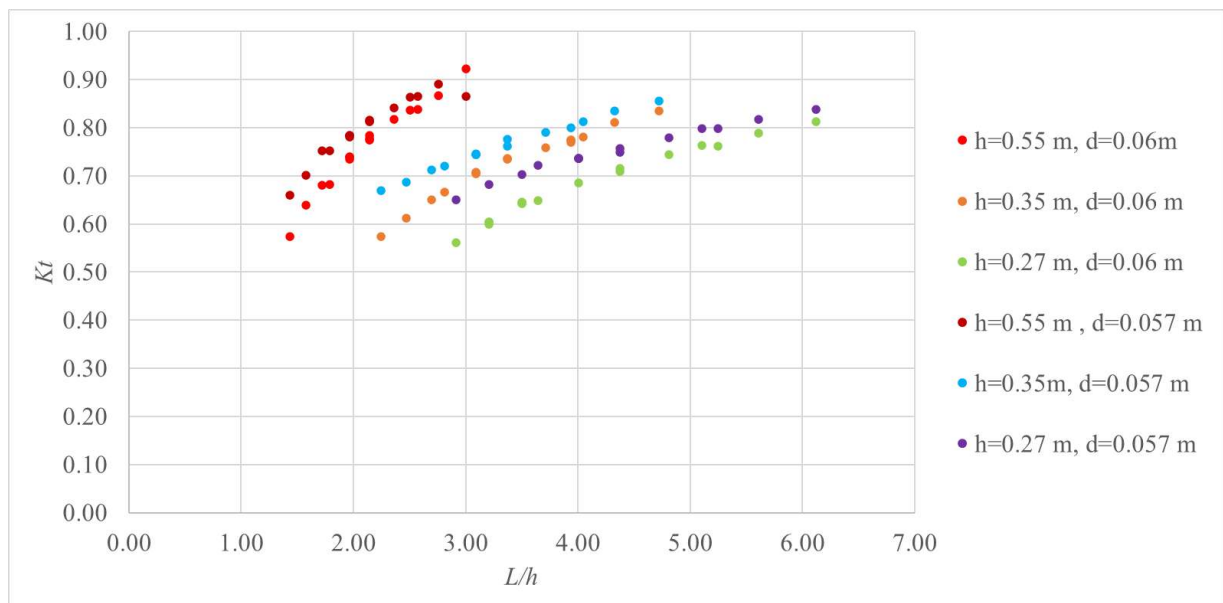


Slika 18 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije  $Kt$  u odnosu na valnu dužinu koji pripada vršnom periodu vala

### 3.3. Utjecaj uronjenosti plutajućeg pontona na transmisiju valne energije

Mjerenja su provedena na plutajućem pontonu na kojem su postavljene teške ploče koje povećavaju masu što je rezultiralo s gazom dubine 0,06 m. Nakon što smo uklonili ploče ponton je isplivao za 0,003 m te gaz iznosi 0,057 m. Kao što možemo uočiti na slici 19, za istu vrijednost dubine vode  $h$  koeficijent transmisije se razlikuje ovisno o gasu  $d$ .

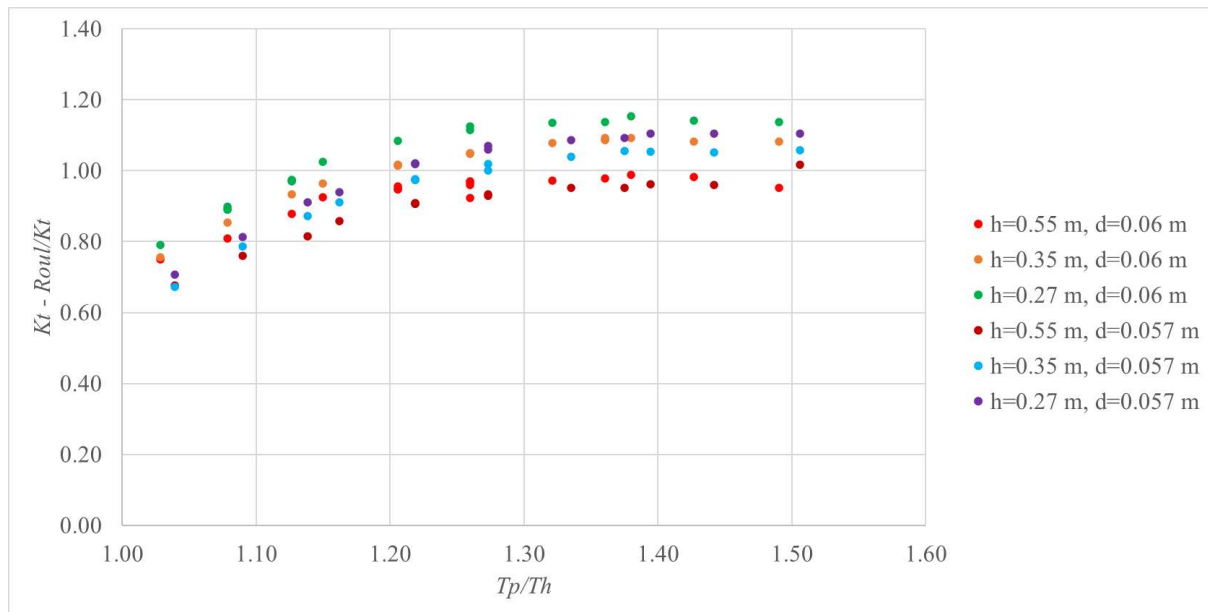
Za dubinu vode 0,55 m koeficijent transmisije je manji kod gaza dubine 0,06 m za sve vrijednosti  $L/h$ , osim za vrijednost  $L/h=3,01$  gdje je koeficijent transmisije manji za gaz dubine 0,057 m. Za dubinu vode  $h=0,35$  m i  $h=0,27$  m primjećuje se trend gdje je za veću vrijednost gaza  $d=0,06$  m koeficijent transmisije manji u odnosu na dubinu gaza 0,057 m. Za dubinu gaza od 0,06 m možemo primijetiti da za istu vrijednost  $L/h$  koeficijent transmisije je nešto manji u odnosu na dubinu gaza od 0,057 m.



Slika 19 Rezultati mjerenja koeficijenta transmisije  $Kt$  u odnosu na valnu dužinu koji pripada vršnom periodu vala i dubine vode



### 3.4. Ispravnost jednadžbe za predviđanje koeficijenta transmisije prema Ruol i sur., 2013.



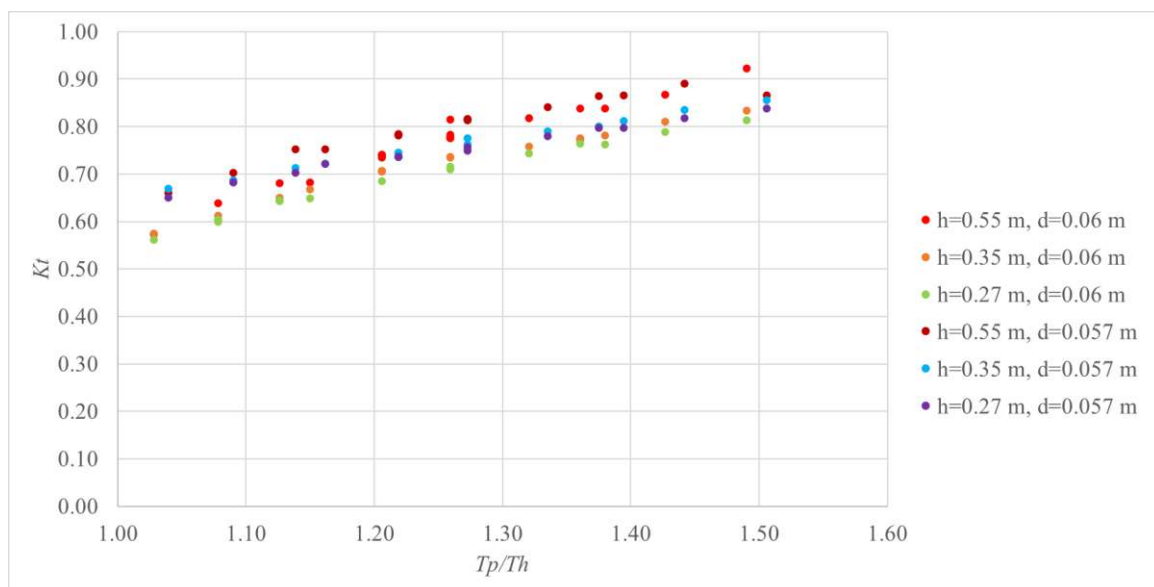
Slika 20 Omjer rezultata mjerenja koeficijenta transmisije  $K_t$  i koeficijenta transmisije predviđenog iz jednadžbe Ruol i sur., 2013. u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana

Na slici 20 prikazan je odnos omjera rezultata mjerenja koeficijenta transmisije  $K_t$  i koeficijenta transmisije predviđenog iz jednadžbe Ruol i sur., 2013. u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana. Za male vrijednosti  $T_p/Th$  ( $1,0 < T_p/Th < 1,20$ ) formula podcjenjuje za otprilike 25%. Za vrijednosti  $1,20 < T_p/Th < 1,30$  možemo primijetiti da formula precjenjuje najviše za dubinu  $h=0,27$  m i gaz  $d=0,06$  m, a podcjenjuje za dubinu  $h=0,55$  m i gaz dubine  $d=0,057$  m. Također možemo primijetiti da za rezultate mjerenja kod kojih je gaz dubine 0,027 m ima nešto veći stupanj pogreške. Za velike  $T_p/Th$  ( $1,30 < T_p/Th < 1,60$ ) i male dubine formula precjenjuje za 15% , dok je za velike dubine formula gotovo u potpunosti točna.

### 3.5. Jednostavna formulacija za predviđanje transmisije valne energije

Jednostavna formulacija se može uspostaviti ukoliko se postavi odnos koeficijenta transmisije i omjera vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana (slika 21 i slika 22).

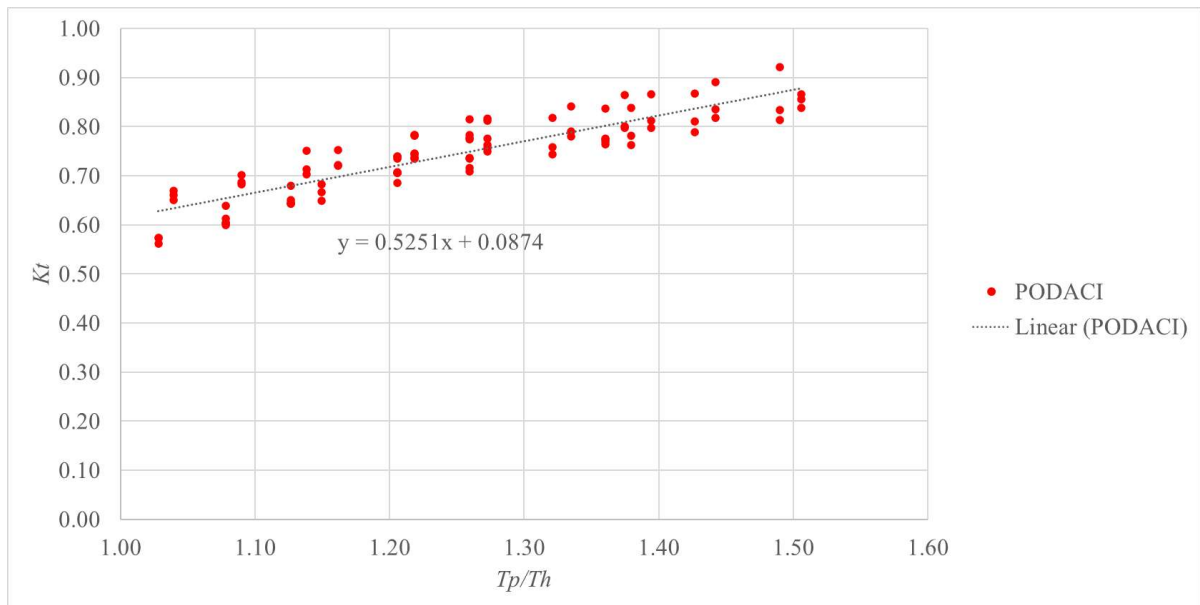
Na slici 21 možemo primijetiti kako porastom  $Tp/Th$  raste i vrijednost koeficijenta transmisije. Najizraženiji je porast koeficijenta transmisije za vrijednost  $h=0,55$  m s dubinom gaza  $d=0,60$  m. Za vrijednosti  $1,0 < Tp/Th < 1,10$  koeficijent transmisije se kreće u rasponu od 0,56 do 0,70. kod raspona vrijednosti  $Tp/Th$  od 1,10 do 1,20 raspon vrijednosti koeficijenta transmisije je od 0,64 do 0,75. Za vrijednosti  $Tp/Th$  od 1,20 do 1,30 koeficijent transmisije se kreće od 0,68 do 0,81. Za vrijednosti  $1,30 < Tp/Th < 1,51$  koeficijent transmisije poprima vrijednosti od 0,74 do 0,92.



Slika 21 Mjereni koeficijenti transmisije  $Kt$  u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana

Na slici 22 prikazan je graf s izrazom za određivanje koeficijenta transmisije za mjerenja provedena u ovom radu uz poznati odnos vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana  $Tp/Th$ . Vrijednost koeficijenta transmisije označen s  $y$  na slici 22, dobiva se umetanjem vrijednosti  $Tp/Th$  umjesto  $x$ . Vrijednost koeficijenta determinacije  $R^2$  iznosi 0,8146 što predstavlja dobru preciznost modela u opisivanju podataka. Jednadžba za određivanje vrijednosti koeficijenta transmisije prikladno je koristiti samo u raspon  $Tp/Th$  za

koje su provedeni testovi, odnosno za vrijednosti  $Tp/Th$  od 1,03 do 1,51. Izvan ovog raspona formula bi mogla davati pogrešne vrijednosti koeficijenta transmisije.



Slika 22 Mjereni koeficijenti transmisije  $Kt$  u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana

## 4. ZAKLJUČAK

Lukobrani imaju ključnu ulogu u zaštiti lučkog akvatorija. Njihova duljina i visina sprječavaju prelijevanje valova i usmjeravaju morske struje, štiteći luku od erozije i nanosa, osiguravajući sigurnost i funkcionalnost. Cilj ovog rada je provjeriti valjanost formule Ruol i sur., 2013. za proračun koeficijenta transmisije ispod pontonskog lukobrana pod utjecajem spektralnih valov. Provedena ispitivanja se odnose na  $\pi$ -tip plutajuće lukobrane i razvoj metode za procjenu koeficijenta transmisije valne energije pod utjecajem spektralnih valova. Rezultati istraživanja pokazuju da postojeće metode za procjenu transmisije nisu uvijek precizne za  $\pi$ -tip plutajućih lukobrana. Ispitivanja su provedena u Hidrotehničkom laboratoriju na modelu mjerila 1:21, pod utjecajem spektralnih valova koji ortogonalno nailaze na model pontona. Za statističku obradu koristila se vremenska serija od 3 minute. Korišteni spektralni valovi karakteriziraju uvjete slične onima u Jadranskom moru.

Analizom rezultata mjerenja utvrđeno je da postoji jasan utjecaj dubine vode na koeficijent transmisije valne energije. Smanjenjem dubine vode, opaža se smanjenje koeficijenta transmisije. Koeficijent transmisije dobiven u skladu s jednadžbom Ruol i sur, 2013. prikazuju blagi, ali suprotan trend. Razlog tome može se prepisati fenomenu prelijevanja preko plutajućeg lukobrana koji se pojavljuje u većini testova, a nisu uzeti u obzir istraživanjem Ruola i sur, 2013. Analizom odnosa valne dužine i dubine vode primjećuje se njegov značajan utjecaj. Što je omjer  $L/h$  veći, to je veći i koeficijent transmisije.

Po pitanju dubine gaza, možemo primijetiti da dublji gaz rezultira nešto nižim vrijednostima koeficijenta transmisije, posebice za manje omjere valne dužine i dubine vode.

Usporedbom omjera koeficijenta transmisije izračunatog prema formuli Ruol i sur, 2013. I koeficijenta transmisije dobivenog mjerenjima u odnosu na omjer vršnog perioda vala i prirodne oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana dolazimo do zaključka da za male vrijednosti  $Tp/Th$  ( $1,0 < Tp/Th < 1,10$ ) formula podcjenjuje za otprilike 25%. Za vrijednosti  $1,20 < Tp/Th < 1,30$  možemo primijetiti da formula precjenjuje najviše za dubinu  $h=0,27$  m i gaz  $d=0,06$  m, a podcjenjuje za dubinu  $h=0,55$  m i gaz dubine  $d=0,057$  m. Za velike  $Tp/Th$  ( $1,30 < Tp/Th < 1,60$ ) i male dubine formula precjenjuje za 15%, dok je za velike dubine formula gotovo u potpunosti točna.

Temeljena na podacima dobivenim mjerenjima u okviru ovog rada, izvedena je jednostavna matematička formulacija kojom se može procijeniti vrijednost koeficijenta transmisije. Porastom koeficijenta transmisije raste i vrijednost omjera vršnog perioda vala i prirodne

oscilacije uzdizanja plutajućeg lukobrana na promatranom rasponu vrijednosti ( $1,03 < T_p / T_h < 1,51$ ).

Autori ovog rada prepoznaju mogućnost za veće koeficijente atenuacije ukoliko smjer valova nije okomit na pravac pružanja pontonskog lukobrana. Ali s obzirom da su se laboratorijska ispitivanja provodila u valnom kanalu, takvo ispitivanje nije bilo moguće provesti. Nadalje, karakteristično je za valove živog mora da valna energija bude disperzirana po smjeru, a što rezultira povećanjem koeficijenta atenuacije u odnosi na one dobivene ispitivanjem u ovom radu. Končano, međusobno sidrenje više sekcija pontona također bi rezultiralo daljnjim povećanjem koeficijenta atenuacije. Također se skreće pažnja da ispitivani pontoni u istraživanom rasponu valnih visina i valnih duljina nisu pokazivali pojavu plivajuće nestabilnosti, niti je uočena pojava pomicanja sidrenih blokova pri nailasku najvećih ispitnih valova.

## 5. PRILOG

### 5.1. Rezultati mjerenja u valnom kanalu

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) | H/L  | Hs (m) | Lp (m) | Tp (s) | L (m) |
|-------------|--------|-------|------|--------|--------|--------|-------|
| 1           | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 2           | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 3           | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 4           | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 5           | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 6           | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 6p          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 6pp         | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 7           | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 8           | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 9           | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 10          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 10p         | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 10pp        | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 11          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 12          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |
| 13          | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 14          | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 15          | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 16          | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 16p         | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 16pp        | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 17          | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 18          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 18p         | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 18pp        | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 19          | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 20          | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 21          | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 22          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 23          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 24          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |
| 25          | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 26          | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 27          | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 28          | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 29          | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 29p         | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 29pp        | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) | H/L  | Hs (m) | Lp (m) | Tp (s) | L (m) |
|-------------|--------|-------|------|--------|--------|--------|-------|
| 30          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 31          | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 32          | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 33          | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 33p         | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 33pp        | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 34          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 35          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 36          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |
| 37          | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 38          | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 39          | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 40          | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 41          | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 42          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 42p         | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 42pp        | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 43          | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 44          | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 45          | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 46          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 47          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 48          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |
| 49          | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 50          | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 51          | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 52          | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 53          | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 54          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 54p         | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 54pp        | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 55          | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 56          | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 57          | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 58          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 59          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 60          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |
| 61          | 1      | 20    | 1/20 | 0.048  | 0.952  | 0.781  | 0.787 |
| 62          | 1      | 25    | 1/25 | 0.048  | 1.190  | 0.873  | 0.984 |
| 63          | 1      | 30    | 1/30 | 0.048  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 64          | 1      | 35    | 1/35 | 0.048  | 1.667  | 1.033  | 1.377 |
| 65          | 1.1    | 22    | 1/20 | 0.052  | 1.048  | 0.819  | 0.866 |
| 66          | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |

| Naziv testa | Hs (m) | L (m) | H/L  | Hs (m) | Lp (m) | Tp (s) | L (m) |
|-------------|--------|-------|------|--------|--------|--------|-------|
| 66p         | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 66pp        | 1.1    | 27.5  | 1/25 | 0.052  | 1.310  | 0.916  | 1.082 |
| 67          | 1.1    | 33    | 1/30 | 0.052  | 1.571  | 1.003  | 1.299 |
| 68          | 1.1    | 38.5  | 1/35 | 0.052  | 1.833  | 1.084  | 1.515 |
| 69          | 1.2    | 24    | 1/20 | 0.057  | 1.143  | 0.856  | 0.945 |
| 70          | 1.2    | 30    | 1/25 | 0.057  | 1.429  | 0.957  | 1.181 |
| 71          | 1.2    | 36    | 1/30 | 0.057  | 1.714  | 1.048  | 1.417 |
| 72          | 1.2    | 42    | 1/35 | 0.057  | 2.000  | 1.132  | 1.653 |

| Naziv testa | h (m) | k     | w     | d     | Kt - Mac | X     | Beta  | Kt - Ruol |
|-------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|
| 1           | 0.550 | 7.983 | 0.238 | 0.060 | 0.546    | 1.028 | 0.787 | 0.43      |
| 2           | 0.550 | 6.386 | 0.238 | 0.060 | 0.669    | 1.150 | 0.945 | 0.63      |
| 3           | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.756    | 1.259 | 0.993 | 0.75      |
| 4           | 0.550 | 4.562 | 0.238 | 0.060 | 0.819    | 1.360 | 1.000 | 0.82      |
| 5           | 0.550 | 7.257 | 0.238 | 0.060 | 0.600    | 1.079 | 0.861 | 0.52      |
| 6           | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.716    | 1.206 | 0.980 | 0.70      |
| 6p          | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.716    | 1.206 | 0.980 | 0.70      |
| 6pp         | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.716    | 1.206 | 0.980 | 0.70      |
| 7           | 0.550 | 4.838 | 0.238 | 0.060 | 0.796    | 1.321 | 0.999 | 0.80      |
| 8           | 0.550 | 4.147 | 0.238 | 0.060 | 0.851    | 1.427 | 1.000 | 0.85      |
| 9           | 0.550 | 6.652 | 0.238 | 0.060 | 0.647    | 1.127 | 0.922 | 0.60      |
| 10          | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.756    | 1.259 | 0.993 | 0.75      |
| 10p         | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.756    | 1.259 | 0.993 | 0.75      |
| 10pp        | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.756    | 1.259 | 0.993 | 0.75      |
| 11          | 0.550 | 4.435 | 0.238 | 0.060 | 0.829    | 1.380 | 1.000 | 0.83      |
| 12          | 0.550 | 3.801 | 0.238 | 0.060 | 0.877    | 1.490 | 1.000 | 0.88      |
| 13          | 0.350 | 7.983 | 0.238 | 0.060 | 0.551    | 1.028 | 0.787 | 0.43      |
| 14          | 0.350 | 6.386 | 0.238 | 0.060 | 0.681    | 1.150 | 0.945 | 0.64      |
| 15          | 0.350 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.776    | 1.259 | 0.993 | 0.77      |
| 16          | 0.350 | 4.562 | 0.238 | 0.060 | 0.843    | 1.360 | 1.000 | 0.84      |
| 16p         | 0.350 | 4.562 | 0.238 | 0.060 | 0.843    | 1.360 | 1.000 | 0.84      |
| 16pp        | 0.350 | 4.562 | 0.238 | 0.060 | 0.843    | 1.360 | 1.000 | 0.84      |
| 17          | 0.350 | 7.257 | 0.238 | 0.060 | 0.607    | 1.079 | 0.861 | 0.52      |
| 18          | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.732    | 1.206 | 0.980 | 0.72      |
| 18p         | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.732    | 1.206 | 0.980 | 0.72      |
| 18pp        | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.732    | 1.206 | 0.980 | 0.72      |
| 19          | 0.350 | 4.838 | 0.238 | 0.060 | 0.819    | 1.321 | 0.999 | 0.82      |
| 20          | 0.350 | 4.147 | 0.238 | 0.060 | 0.877    | 1.427 | 1.000 | 0.88      |
| 21          | 0.350 | 6.652 | 0.238 | 0.060 | 0.658    | 1.127 | 0.922 | 0.61      |
| 22          | 0.350 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.776    | 1.259 | 0.993 | 0.77      |
| 23          | 0.350 | 4.435 | 0.238 | 0.060 | 0.853    | 1.380 | 1.000 | 0.85      |
| 24          | 0.350 | 3.801 | 0.238 | 0.060 | 0.903    | 1.490 | 1.000 | 0.90      |



| Naziv testa | h (m) | k     | w     | d     | Kt - Mac | X     | Beta  | Kt - Ruol |
|-------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|
| 25          | 0.270 | 7.983 | 0.238 | 0.060 | 0.564    | 1.028 | 0.787 | 0.44      |
| 26          | 0.270 | 6.386 | 0.238 | 0.060 | 0.703    | 1.150 | 0.945 | 0.66      |
| 27          | 0.270 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.803    | 1.259 | 0.993 | 0.80      |
| 28          | 0.270 | 4.562 | 0.238 | 0.060 | 0.869    | 1.360 | 1.000 | 0.87      |
| 29          | 0.270 | 7.257 | 0.238 | 0.060 | 0.625    | 1.079 | 0.861 | 0.54      |
| 29p         | 0.270 | 7.257 | 0.238 | 0.060 | 0.625    | 1.079 | 0.861 | 0.54      |
| 29pp        | 0.270 | 7.257 | 0.238 | 0.060 | 0.625    | 1.079 | 0.861 | 0.54      |
| 30          | 0.270 | 5.806 | 0.238 | 0.060 | 0.758    | 1.206 | 0.980 | 0.74      |
| 31          | 0.270 | 4.838 | 0.238 | 0.060 | 0.846    | 1.321 | 0.999 | 0.84      |
| 32          | 0.270 | 4.147 | 0.238 | 0.060 | 0.901    | 1.427 | 1.000 | 0.90      |
| 33          | 0.270 | 6.652 | 0.238 | 0.060 | 0.679    | 1.127 | 0.922 | 0.63      |
| 33p         | 0.270 | 6.652 | 0.238 | 0.060 | 0.679    | 1.127 | 0.922 | 0.63      |
| 33pp        | 0.270 | 6.652 | 0.238 | 0.060 | 0.679    | 1.127 | 0.922 | 0.63      |
| 34          | 0.270 | 5.322 | 0.238 | 0.060 | 0.803    | 1.259 | 0.993 | 0.80      |
| 35          | 0.270 | 4.435 | 0.238 | 0.060 | 0.879    | 1.380 | 1.000 | 0.88      |
| 36          | 0.270 | 3.801 | 0.238 | 0.060 | 0.925    | 1.490 | 1.000 | 0.92      |
| 37          | 0.550 | 7.983 | 0.238 | 0.057 | 0.555    | 1.039 | 0.803 | 0.45      |
| 38          | 0.550 | 6.386 | 0.238 | 0.057 | 0.676    | 1.162 | 0.955 | 0.65      |
| 39          | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.762    | 1.273 | 0.995 | 0.76      |
| 40          | 0.550 | 4.562 | 0.238 | 0.057 | 0.822    | 1.375 | 1.000 | 0.82      |
| 41          | 0.550 | 7.257 | 0.238 | 0.057 | 0.608    | 1.090 | 0.877 | 0.53      |
| 42          | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.722    | 1.219 | 0.984 | 0.71      |
| 42p         | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.722    | 1.219 | 0.984 | 0.71      |
| 42pp        | 0.550 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.722    | 1.219 | 0.984 | 0.71      |
| 43          | 0.550 | 4.838 | 0.238 | 0.057 | 0.800    | 1.335 | 0.999 | 0.80      |
| 44          | 0.550 | 4.147 | 0.238 | 0.057 | 0.854    | 1.442 | 1.000 | 0.85      |
| 45          | 0.550 | 6.652 | 0.238 | 0.057 | 0.655    | 1.138 | 0.935 | 0.61      |
| 46          | 0.550 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.762    | 1.273 | 0.995 | 0.76      |
| 47          | 0.550 | 4.435 | 0.238 | 0.057 | 0.832    | 1.394 | 1.000 | 0.83      |
| 48          | 0.550 | 3.801 | 0.238 | 0.057 | 0.880    | 1.506 | 1.000 | 0.88      |
| 49          | 0.350 | 7.983 | 0.238 | 0.057 | 0.560    | 1.039 | 0.803 | 0.45      |
| 50          | 0.350 | 6.386 | 0.238 | 0.057 | 0.687    | 1.162 | 0.955 | 0.66      |
| 51          | 0.350 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.780    | 1.273 | 0.995 | 0.78      |
| 52          | 0.350 | 4.562 | 0.238 | 0.057 | 0.845    | 1.375 | 1.000 | 0.85      |
| 53          | 0.350 | 7.257 | 0.238 | 0.057 | 0.616    | 1.090 | 0.877 | 0.54      |
| 54          | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.738    | 1.219 | 0.984 | 0.73      |
| 54p         | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.738    | 1.219 | 0.984 | 0.73      |
| 54pp        | 0.350 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.738    | 1.219 | 0.984 | 0.73      |
| 55          | 0.350 | 4.838 | 0.238 | 0.057 | 0.822    | 1.335 | 0.999 | 0.82      |
| 56          | 0.350 | 4.147 | 0.238 | 0.057 | 0.879    | 1.442 | 1.000 | 0.88      |
| 57          | 0.350 | 6.652 | 0.238 | 0.057 | 0.665    | 1.138 | 0.935 | 0.62      |
| 58          | 0.350 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.780    | 1.273 | 0.995 | 0.78      |
| 59          | 0.350 | 4.435 | 0.238 | 0.057 | 0.856    | 1.394 | 1.000 | 0.86      |

| Naziv testa | h (m) | k     | w     | d     | Kt - Mac | X     | Beta  | Kt - Ruol |
|-------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|
| 60          | 0.350 | 3.801 | 0.238 | 0.057 | 0.904    | 1.506 | 1.000 | 0.90      |
| 61          | 0.270 | 7.983 | 0.238 | 0.057 | 0.573    | 1.039 | 0.803 | 0.46      |
| 62          | 0.270 | 6.386 | 0.238 | 0.057 | 0.709    | 1.162 | 0.955 | 0.68      |
| 63          | 0.270 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.806    | 1.273 | 0.995 | 0.80      |
| 64          | 0.270 | 4.562 | 0.238 | 0.057 | 0.871    | 1.375 | 1.000 | 0.87      |
| 65          | 0.270 | 7.257 | 0.238 | 0.057 | 0.632    | 1.090 | 0.877 | 0.55      |
| 66          | 0.270 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.762    | 1.219 | 0.984 | 0.75      |
| 66p         | 0.270 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.762    | 1.219 | 0.984 | 0.75      |
| 66pp        | 0.270 | 5.806 | 0.238 | 0.057 | 0.762    | 1.219 | 0.984 | 0.75      |
| 67          | 0.270 | 4.838 | 0.238 | 0.057 | 0.848    | 1.335 | 0.999 | 0.85      |
| 68          | 0.270 | 4.147 | 0.238 | 0.057 | 0.903    | 1.442 | 1.000 | 0.90      |
| 69          | 0.270 | 6.652 | 0.238 | 0.057 | 0.685    | 1.138 | 0.935 | 0.64      |
| 70          | 0.270 | 5.322 | 0.238 | 0.057 | 0.806    | 1.273 | 0.995 | 0.80      |
| 71          | 0.270 | 4.435 | 0.238 | 0.057 | 0.881    | 1.394 | 1.000 | 0.88      |
| 72          | 0.270 | 3.801 | 0.238 | 0.057 | 0.926    | 1.506 | 1.000 | 0.93      |

| Naziv testa | Hs-i (m) | Kr    | Hs-t (m) | C    | Tp (s) |
|-------------|----------|-------|----------|------|--------|
| 1           | 0.047    | 0.283 | 0.027    | 0.57 | 0.76   |
| 2           | 0.050    | 0.253 | 0.034    | 0.68 | 0.85   |
| 3           | 0.051    | 0.234 | 0.042    | 0.81 | 0.98   |
| 4           | 0.051    | 0.238 | 0.043    | 0.84 | 1.02   |
| 5           | 0.052    | 0.278 | 0.033    | 0.64 | 0.79   |
| 6           | 0.054    | 0.243 | 0.040    | 0.74 | 0.95   |
| 6p          | 0.054    | 0.251 | 0.040    | 0.74 | 0.95   |
| 6pp         | 0.054    | 0.255 | 0.040    | 0.73 | 0.95   |
| 7           | 0.057    | 0.245 | 0.046    | 0.82 | 1.00   |
| 8           | 0.057    | 0.248 | 0.049    | 0.87 | 1.04   |
| 9           | 0.059    | 0.264 | 0.040    | 0.68 | 0.84   |
| 10          | 0.061    | 0.243 | 0.047    | 0.77 | 0.98   |
| 10p         | 0.061    | 0.240 | 0.048    | 0.78 | 0.98   |
| 10pp        | 0.061    | 0.235 | 0.047    | 0.78 | 0.98   |
| 11          | 0.063    | 0.255 | 0.053    | 0.84 | 1.02   |
| 12          | 0.061    | 0.289 | 0.056    | 0.92 | 1.07   |
| 13          | 0.051    | 0.309 | 0.029    | 0.57 | 0.76   |
| 14          | 0.053    | 0.272 | 0.036    | 0.67 | 0.85   |
| 15          | 0.054    | 0.253 | 0.040    | 0.73 | 0.98   |
| 16          | 0.055    | 0.263 | 0.042    | 0.77 | 1.02   |
| 16p         | 0.055    | 0.254 | 0.042    | 0.78 | 1.02   |
| 16pp        | 0.055    | 0.262 | 0.042    | 0.77 | 1.02   |
| 17          | 0.057    | 0.298 | 0.035    | 0.61 | 0.83   |
| 18          | 0.058    | 0.256 | 0.041    | 0.71 | 0.87   |
| 18p         | 0.058    | 0.256 | 0.041    | 0.71 | 0.87   |

| Naziv testa | Hs-i (m) | Kr    | Hs-t (m) | C    | Tp (s) |
|-------------|----------|-------|----------|------|--------|
| 18pp        | 0.058    | 0.260 | 0.041    | 0.71 | 0.87   |
| 19          | 0.059    | 0.258 | 0.045    | 0.76 | 1.00   |
| 20          | 0.059    | 0.241 | 0.048    | 0.81 | 1.04   |
| 21          | 0.063    | 0.261 | 0.041    | 0.65 | 0.84   |
| 22          | 0.064    | 0.255 | 0.047    | 0.74 | 0.98   |
| 23          | 0.065    | 0.257 | 0.051    | 0.78 | 1.02   |
| 24          | 0.064    | 0.238 | 0.054    | 0.83 | 1.11   |
| 25          | 0.053    | 0.284 | 0.030    | 0.56 | 0.80   |
| 26          | 0.054    | 0.255 | 0.035    | 0.65 | 0.85   |
| 27          | 0.054    | 0.256 | 0.039    | 0.72 | 0.98   |
| 28          | 0.054    | 0.251 | 0.041    | 0.76 | 1.02   |
| 29          | 0.057    | 0.301 | 0.035    | 0.60 | 0.83   |
| 29p         | 0.057    | 0.311 | 0.034    | 0.60 | 0.83   |
| 29pp        | 0.058    | 0.295 | 0.035    | 0.60 | 0.83   |
| 30          | 0.058    | 0.271 | 0.040    | 0.68 | 0.87   |
| 31          | 0.059    | 0.277 | 0.044    | 0.74 | 1.00   |
| 32          | 0.058    | 0.247 | 0.046    | 0.79 | 1.04   |
| 33          | 0.063    | 0.263 | 0.041    | 0.64 | 0.84   |
| 33p         | 0.063    | 0.279 | 0.041    | 0.64 | 0.84   |
| 33pp        | 0.063    | 0.274 | 0.041    | 0.64 | 0.84   |
| 34          | 0.065    | 0.275 | 0.046    | 0.71 | 0.98   |
| 35          | 0.065    | 0.269 | 0.050    | 0.76 | 1.02   |
| 36          | 0.064    | 0.247 | 0.052    | 0.81 | 1.11   |
| 37          | 0.048    | 0.241 | 0.032    | 0.66 | 0.76   |
| 38          | 0.050    | 0.228 | 0.038    | 0.75 | 0.85   |
| 39          | 0.052    | 0.208 | 0.042    | 0.81 | 0.98   |
| 40          | 0.052    | 0.221 | 0.045    | 0.86 | 1.02   |
| 41          | 0.053    | 0.244 | 0.037    | 0.70 | 0.81   |
| 42          | 0.055    | 0.227 | 0.043    | 0.78 | 0.97   |
| 42p         | 0.056    | 0.219 | 0.044    | 0.78 | 0.95   |
| 42pp        | 0.056    | 0.226 | 0.043    | 0.78 | 0.95   |
| 43          | 0.057    | 0.221 | 0.048    | 0.84 | 1.00   |
| 44          | 0.057    | 0.225 | 0.051    | 0.89 | 1.04   |
| 45          | 0.058    | 0.228 | 0.044    | 0.75 | 0.84   |
| 46          | 0.061    | 0.217 | 0.050    | 0.82 | 0.98   |
| 47          | 0.063    | 0.223 | 0.055    | 0.87 | 1.02   |
| 48          | 0.063    | 0.063 | 0.055    | 0.87 | 1.02   |
| 49          | 0.051    | 0.234 | 0.034    | 0.67 | 0.76   |
| 50          | 0.054    | 0.221 | 0.039    | 0.72 | 0.85   |
| 51          | 0.055    | 0.222 | 0.042    | 0.76 | 0.98   |
| 52          | 0.055    | 0.221 | 0.044    | 0.80 | 1.02   |
| 53          | 0.057    | 0.243 | 0.039    | 0.69 | 0.83   |
| 54          | 0.059    | 0.218 | 0.044    | 0.75 | 0.87   |

---

| Naziv testa | Hs-i (m) | Kr    | Hs-t (m) | C    | Tp (s) |
|-------------|----------|-------|----------|------|--------|
| 54p         | 0.059    | 0.214 | 0.044    | 0.74 | 0.87   |
| 54pp        | 0.059    | 0.216 | 0.044    | 0.74 | 0.87   |
| 55          | 0.059    | 0.214 | 0.047    | 0.79 | 1.00   |
| 56          | 0.059    | 0.213 | 0.049    | 0.84 | 1.04   |
| 57          | 0.063    | 0.228 | 0.045    | 0.71 | 0.84   |
| 58          | 0.064    | 0.222 | 0.050    | 0.78 | 0.98   |
| 59          | 0.065    | 0.222 | 0.053    | 0.81 | 1.02   |
| 60          | 0.065    | 0.210 | 0.055    | 0.86 | 1.11   |
| 61          | 0.054    | 0.261 | 0.035    | 0.65 | 0.80   |
| 62          | 0.054    | 0.256 | 0.039    | 0.72 | 0.85   |
| 63          | 0.055    | 0.243 | 0.042    | 0.76 | 0.98   |
| 64          | 0.054    | 0.232 | 0.043    | 0.80 | 1.02   |
| 65          | 0.057    | 0.280 | 0.039    | 0.68 | 0.83   |
| 66          | 0.059    | 0.255 | 0.043    | 0.74 | 0.87   |
| 66p         | 0.059    | 0.241 | 0.043    | 0.74 | 0.87   |
| 66pp        | 0.059    | 0.245 | 0.043288 | 0.74 | 0.87   |
| 67          | 0.060    | 0.252 | 0.046    | 0.78 | 1.00   |
| 68          | 0.059    | 0.233 | 0.048    | 0.82 | 1.04   |
| 69          | 0.064    | 0.240 | 0.045    | 0.70 | 0.84   |
| 70          | 0.065    | 0.235 | 0.049    | 0.75 | 0.98   |
| 71          | 0.065    | 0.239 | 0.052    | 0.80 | 1.02   |
| 72          | 0.064    | 0.230 | 0.054    | 0.84 | 1.11   |

## 6. POPIS LITERATURE

akvatorij, lučki. Tehnički leksikon - 2007. (mrežno izdanje). Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2023. Pristupljeno 19. 8. 2023. <https://tl.lzmk.hr/clanak/akvatorij-lucki>

Brebner, A., Ofuya, A.O. (1968.): Floating breakwaters, *In Proceedings of 11th conference on Coastal Engineering*, str. 1055-1094.

Levanat d.o.o (2021.): *Projekt sidrenja valobranskih pontona za potrebe modelskog ispitivanja, TIP PONTONA: M5300BRK I M3300BRK*, Murter

Macagno, E.O. (1954.): Houle dans un canal presentant un pšassage ene charge, *La Houille Blanche*, 1(1), str. 10-37

MARINETEK ADRIATIC (2021.), 'K-series Breakwater 3300K, 4300K, 5300K'. Dostupno: <https://www.marinetek.hr/wp-content/uploads/2021/06/Breakwater-K-3300-4300-5300.pdf> (Pristupljeno 17. 9. 2023.)

Marinetek (2023) *Valobrani s kobilicom – Marinetek Adriatic*. Available at: <https://www.marinetek.hr/valobrani-s-kobilicom/> (Accessed: 22 September 2023).

MINISTARSTVO MORA, PROMETA I INFRASTRUKTURE (2020) 'Pravilnik o brodicama, čamcima i jahtama'. Narodne novine. Available at: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_01\\_13\\_223.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_01_13_223.html) (Accessed: 12 September 2023).

Ruol P., Martinelli L., Pezzutto P. (2012.): Formula to Predict Transmission for P-type Floating Breakwaters, *Journal of Wat., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000153.