

# Analiza vertikalnog tlačnog opterećenja horizontalne armiranobetonske ploče pri udaru valova

---

Lončar, Goran; Carević, Dalibor; Bekić, Damir

Source / Izvornik: **Građevinar, 2015, 67, 985 - 995**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.1384.2015>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:516913>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-17**

Repository / Repozitorij:

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



Primljen / Received: 18.6.2015.

Ispravljen / Corrected: 17.9.2015.

Prihvaćen / Accepted: 12.10.2015.

Dostupno online / Available online: 10.11.2015.

## Analiza vertikalnog tlačnog opterećenja horizontalne armiranobetonske ploče pri udaru valova

### Autor:



Izv.prof.dr.sc. **Goran Lončar**, dipl. ing. građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za hidrotehniku  
[goran.loncar@grad.unizg.hr](mailto:goran.loncar@grad.unizg.hr)



Doc.dr.sc. **Dalibor Carević**, dipl. ing. građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za hidrotehniku  
[car@grad.hr](mailto:car@grad.hr)



Doc.dr.sc. **Damir Bekić**, dipl. ing. građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za hidrotehniku  
[damir.bekic@grad.hr](mailto:damir.bekic@grad.hr)

Stručni rad

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić**

### Analiza vertikalnog tlačnog opterećenja horizontalne armiranobetonske ploče pri udaru valova

U radu se analiziraju tlačna dinamička opterećenja na donju pokrovnu plohu kesonske konstrukcije pri djelovanju valova na primjeru zagrebačke obale u luci Rijeka. Osim mjerenja na fizikalnom modelu, primijenjeni su empirijski obrasci s ulaznim podacima iz linearne teorije valova i iz numeričkog modela. Usporedbom izmjerenih i modeliranih vrijednosti procijenjena je pouzdanost primijenjenih metodologija. Najbolje slaganje modelskih rezultata s izmjeranima postignuto je primjenom linearne valne teorije i empirijskog obrasca prema Kaplanu (1995).

#### Ključne riječi:

sile valova, horizontalna ploča, fizikalni model, numerički model

Professional paper

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić**

### Analysis of vertical pressure load exerted on horizontal RC plates by wave impact

The analysis of dynamic pressure load exerted on the caisson structure bottom cover plate subjected to wave action is presented and illustrated by the example of Zagreb Pier in the Port of Rijeka. In addition to physical model measurements, empirical models are applied using input data from the linear wave theory and numerical model. The reliability of the applied methodology is assessed through comparison of measured and modelled values. The best correspondence between the measured and modelled results is obtained using the linear wave theory and the Kaplan's (1995) empirical model.

#### Key words:

wave forces, horizontal plate, physical model, numerical model

Fachbericht

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić**

### Analyse vertikaler Drucklasten auf horizontalen Stahlbetonplatten bei Wellenaufprall

In dieser Arbeit werden dynamische Drucklasten auf die untere Deckenfläche von Kesselkonstruktionen unter Welleneinwirkungen am Beispiel der Zagreber Küste des Hafens in Rijeka analysiert. Außer Messungen am physikalischen Model wurden empirische Verfahren mit auf der linearen Wellentheorie und dem numerischen Model beruhenden Eingangsparametern angewandt. Aufgrund einer Gegenüberstellung gemessener und modellierter Werte wird die Zuverlässigkeit der angewandten Methoden beurteilt. Die beste Übereinstimmung der Resultate wurde bei Anwendung der linearen Wellentheorie und des empirischen Verfahrens nach Kaplan (1995) erzielt.

#### Schlüsselwörter:

Welleneinwirkungen, horizontale Platte, physikalisches Model, numerisches Model

## 1. Uvod

Vjetrovni valovi pri prolasku kroz složenu obalnu konstrukciju kesonskog tipa (slika 1.) doživljavaju značajne deformacije, prije svega kroz mehanizme difrakcije oko stupova i refleksije od stupova te viskozne disipacije i loma valova. Posljedična promjena valnih visina unutar same konstrukcije može rezultirati i izdizanjem vodnog lica sve do doljnog ruba pokrovne ploče te pojavom impulsnog tlačnog opterećenja. Takvi tlakovi djeluju lokalno, kraćeg su trajanja i znatno premašuju magnitude hidrostatičkih opterećenja [1]. Upravo zbog lokalnog djelovanja ukupna stabilnost pokrovne konstrukcije ne mora biti ugrožena, a za dimenzioniranje konstrukcije bitno je definirati dio površine na kojoj se pojavljuju takva impulsna opterećenja [2].

Istraživanja vezana uz navedenu problematiku inicirana su kao teorijsko – matematičke rasprave [3] koje su se pokazale relativno točnima u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima dobivenim na fizikalnim dvodimenzionalnim modelima [4]. Vergagen [5] je proširio teorijsko-matematički model kojim je obuhvatio i utjecaj kompresije zraka. Pionirska istraživanja vertikalnih sila na ravnu ploču uslijed djelovanja monokromatskih valova proveo je ElGharmy [6] na fizikalnom modelu. Denson i Priest [7] proveli su laboratorijsko istraživanje impulsnog tlačnog djelovanja na horizontalnu tanku ploču uz varijaciju incidentnih valnih visina i vertikalne udaljenosti između mirne morske razine i ploče. Broughton i Horn [8] su za sličnu analizu koristili fizikalni model izveden u mjerilu 1:50, uz varijaciju geometrije ploče. Shih i Anastasiou [9] te Toumazis i sur. [10] analizirali su valovima inducirana tlačna opterećenja na horizontalne plohe primjenom fizikalnih modela velikih mjerila, te su izveli i jednostavne empirijske jednadžbe s ulaznim parametrima u vidu valnih visina i vertikalne udaljenosti mirne morske razine od ploče. Značajan doprinos u formiranju teorijskog modela ostvario je Kaplan [11]. Isaacson i sur. [12] posvetili su se iznalaženju bezdimenzijskih relacija između vertikalnih sila, valnih visina, valnih perioda, valnih duljina, dubine, strmosti valova i geometrije ploče. U novije doba rezultate istraživanja na fizikalnim modelima uspostavljenim s ciljem definiranja odnosa kvazistatičkih i impulsnih tlakova na prednje i srednje dijelove ploče prezentirali su Tirindelli i sur. [13] te Cuomo i sur. [14]. Laboratorijska istraživanja pojave impulsnih tlakova ispod ploča, s posebnim osvrtom na utjecaj kompresije zraka, provedena su na fizikalnom modelu izvedenom u mjerilu sličnom mjerilu prirode tijekom 2009. godine, a rezultati provedenih istraživanja publicirani su u radu Martinelli i sur. [15]. Araki i Deguchi [16] su na fizikalnom modelu analizirali odnose kvazistatičkih i impulsnih tlakova u uvjetima izražene varijacije dubina ispod ploče te ih usporedili s rezultatima empirijskog izraza koji je predložio Cuomo i sur. [14]. Rezultati navedenih istraživanja poslužili su i za usvajanje odgovarajućih jednostavnih izraza u sklopu izrade projektantskih smjernica [17, 18].

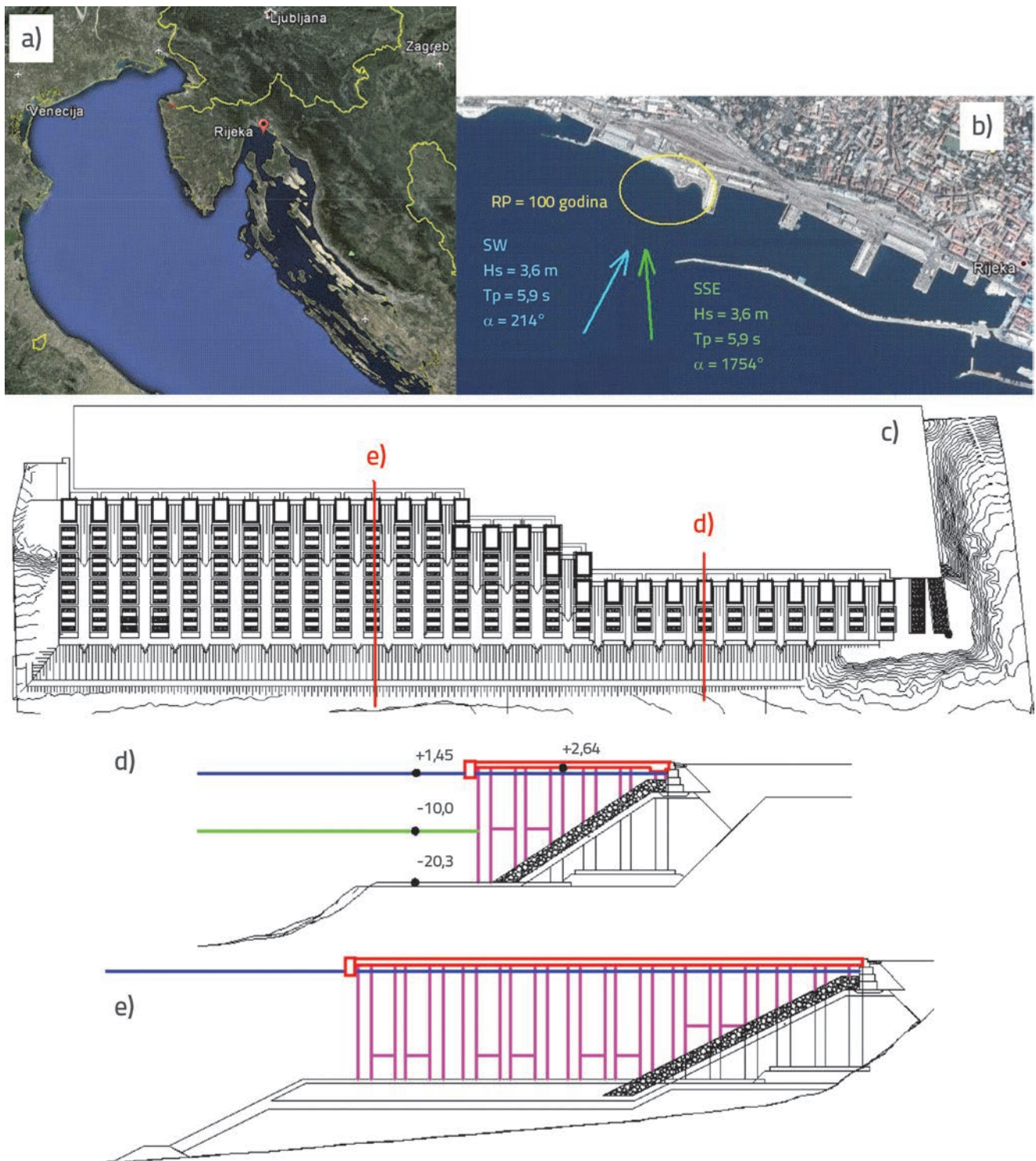
Cilj je ovog rada usporedbom rezultata fizikalnih i numeričkih modela istražiti pouzdanost primjene niza teoretskih modela za procjenu impulsnih tlakova od valovanja na horizontalnu ploču. U ovom radu najprije se prikazuju rezultati laboratorijskog mjerenja (fizikalni model) impulsnih tlačnih opterećenja na pokrovnu ploču kesonske konstrukcije kontejnerskog terminala (slika 1.) Zagrebačka obala – Luka Rijeka, [19]). Projektom predviđena kesonska struktura (slika 1.) ima znatno složenija geometrijska svojstva i valno polje ispod pokrovne ploče od ispitivanih u sklopu prethodno navedenih radova. Stoga se otvara pitanje o pouzdanosti jednostavne primjene predloženih empirijskih izraza za proračun vertikalnih opterećenja horizontalnih pokrovnih ploha. Prema tome izmjereni tlakovi na fizikalnom modelu predstavljaju referentnu točku, a usporedba s rezultatima analitičko-empirijskih modela i numeričko-empirijskih modela služi za procjenu pouzdanosti pojedine primijenjene metodologije. Potrebno je napomenuti da primarni nedostatak mjerenja na fizikalnom modelu predstavlja provedba mjerenja u samo nekoliko točaka. Time se ne dobiva uvid u kontinuiranu prostornu raspodjelu tlakova s donje strane pokrovne ploče.

## 2. Projektna konstrukcija i vjetrovalna obilježja

Razvoj kontejnerskog prometa u sklopu Luke Rijeka želi se ostvariti izvedbom novih operativnih površina. Lokacija planiranog zahvata je Zagrebačka obala – Luka Rijeka (slika 1.), u duljini 700 m uzduž obalne crte, te s maksimalnom širinom 180 m (okomito na obalnu crtu). Projektom predviđena pokrovna konstrukcija se izvodi kao betonska ploča, oslonjena na niz betonskih kesona položenih u redove (uzduž obale) i stupove (okomito na obalu). Za disipaciju valne energije između kesonskih stupova postavlja se školjera (slika 1.). Kao osnovna podloga u sklopu analize djelovanja gravitacijskih morskih valova na konstrukciju poslužila je prethodno izrađena studija dubokovodne valne klime ispred planiranog zahvata [20]. Iz rezultata te studije preuzete su vrijednosti spektralnih valnih parametara za kritične incidentne smjerove valovanja (slika 1.), te su kao takve korištene za rubne uvjete u sklopu istraživanja na fizikalnom i numeričkom modelu.

## 3. Fizikalni model

Fizikalni model izrađen je od drveta u mjerilu 1:35, uzimajući u obzir Froudove sličnosti (slika 2.). Ispitivanja su provedena u bazenu s valnim generatorom koji pokreće ploču 6m širine. Fizikalnim modelom su obuhvaćene 3 karakteristične "duže" konstrukcijske sekcije s 5 redova kesona, te 4 "kraće" sekcije s 2 reda kesona (slika 2.). U praksi hidrauličkog modeliranja valovi se obično generiraju mehanički, a klipni (eng. *piston*) valni generator preporuča se u odnosu na ostale generatore jer točnije simulira kružno gibanje čestica vode. Generiranje

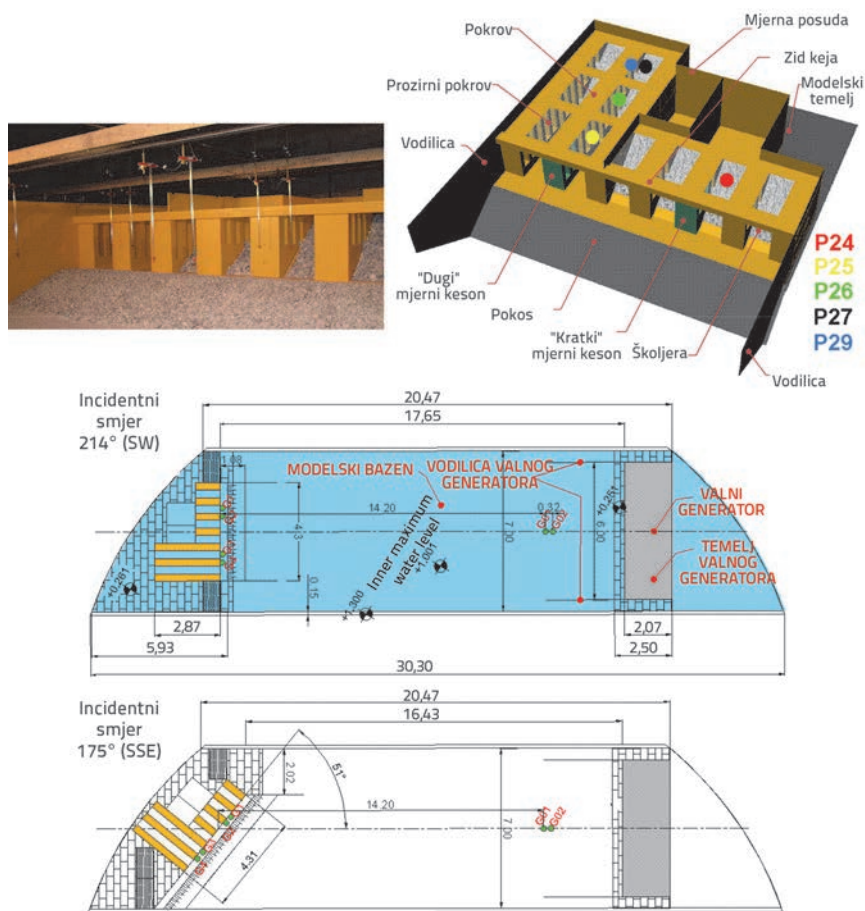


Slika 1. Zagrebačka obala - Luka Rijeka: a) pozicija planiranog zahvata; b) kritični smjerovi s odgovarajućim dubokovodnim valnim obilježjima stogodišnjeg povratnog perioda; c) horizontalni presjek; d i e) vertikalni presjek kroz konstrukciju

valnog spektra se bazira na tehnici superpozicije sinusnih valova različitih visina i duljine u valni spektar. U ovom primjeru fizikalnog modela korišten je elektromehanički klipni valni generator. Omogućio je generiranje sljedećih valova: pravilnih

valova (Stokeov val 1. reda, knoidalni i solitarni); nepravilnih valova (Pierson-Moskowitz, Jonswap, ISSC, TMA, jadranski spektar) i generiranje izmjerenih valova. Ova istraživanja su izrađena primjenom Jonswapova valnog spektra ( $g = 3,3$ ,  $s$ ,





Slika 2. Fizikalni model i prostorni smještaj mjerne opreme

= 0,07,  $s_2 = 0,09$ ). Valni generator se sastojao od dva modula (sekcije), a svaka je veličine  $l \times b \times h = 3,00 \times 2,07 \times 0,85$  m, u ukupnoj duljini od 6 m kada se postave u liniju. Svaki modul imao je nezavisnu mehaničku konstrukciju, pogon i kontrolnu jedinicu, a upravljana je računalom. Dvodimenzionalno valno polje je generirano oko 600 m od konstrukcije u dubokovodnom području, a što je više od preporučenog minimuma 5 do 6 valnih duljina od svih valnih duljina iz valnog spektra. Incidentni valni spektri praćeni su s dvije valne sonde G01 i G02 (slika 2.), mjerenjem denivelacije slobodne površine na udaljenosti dvije karakteristične valne duljine od ploča valnog generatora te 14 m od modela same konstrukcije (500 m u mjerilu prirode). Kapacitivne sonde G1-G4 (slika 2.) postavljene su u liniji paralelno s vanjskom konturom konstrukcije na udaljenosti 0,1m. Sonde G2 i G4 smještene su ispred stupova kesona, a sonde G1 i G3 ispred ulaza u tunele između stupova kesona. Registrirane vremenske serije denivelacije površine vodnog lica poslužile su za definiranje funkcije spektralne gustoće primjenjujući Fourierovu transformaciju. Vrijednosti značajnih valnih visina  $H_s$  izvedene su iz izmjenjenog energetskog spektra za svaku od pozicija mjernih sondi. Separacija incidentnog i reflektiranog valnog polja omogućena je mjerenjem na

sondama G01 i G02 uz primjenu Godinog postupka [21]. Valni vršni periodi dobiveni su spektralnom analizom. U akviziciji podataka s kapacitivnih sondi primijenjena je frekvencija uzorkovanja od 40 Hz. Vremensko trajanje svakog eksperimenta je 10 min (1 sat u mjerilu prirode) a čime je obuhvaćen dovoljan broj valnih perioda (približno 600) za pravilno modeliranje stohastičke spektralne prirode procesa [27].

Tlačna opterećenja na donjnj rub pokrovne konstrukcije praćena su za uvjete više visoke žive razine (+1,45 m.n.m). Pozicije pet tlakomjera tvrtke Honeywell 26PCBFA6D (P24-P29), postavljenih na fizikalnom modelu, prikazane su na slici 4. Frekvencija uzorkovanja iznosila je 1 kHz. U tablici 1. prikazani su koeficijenti refleksije dobiveni mjerenjem na pozicijama sondi (G1-G4) pri incidentnim smjerovima SW i SSE. Na slici 3. prikazan je redoslijed izmjerenih vremenskih serija razina vodnog lica na mjernim sondama G1 i G3 te pripadne izmjerene vremenske serije tlakova na pozicijama P24-P27 pri incidentnom smjeru SW. Na slici 4 dan je isti prikaz za incidentni smjer SSE. Maksimalni izmjereni tlakovi na pozicijama P24-P29 prikazani su u tablici 2.

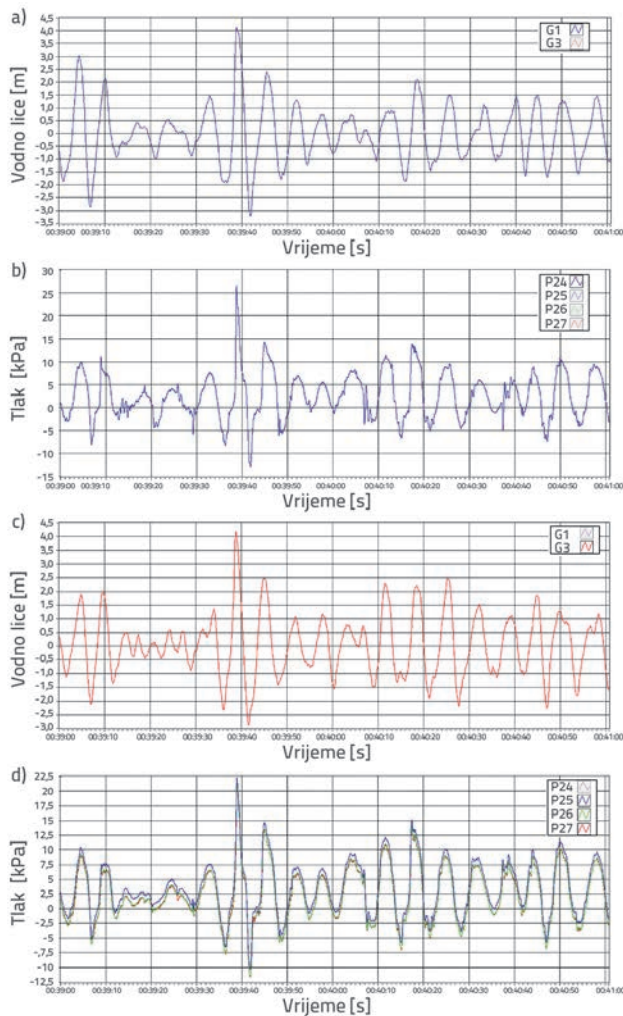
Na slikama 3. i 4. razvidno je da pojava najvećih valnih visina ispred konstrukcije korespondira s pojavom najvećih tlakova ispod pokrovne ploče, a što će se koristiti i kao smjernica u daljnjoj provedbi numeričkog modeliranja i obradi rezultata.

Tablica 1. Koeficijenti refleksije dobiveni mjerenjem na pozicijama sondi (G1-G4)

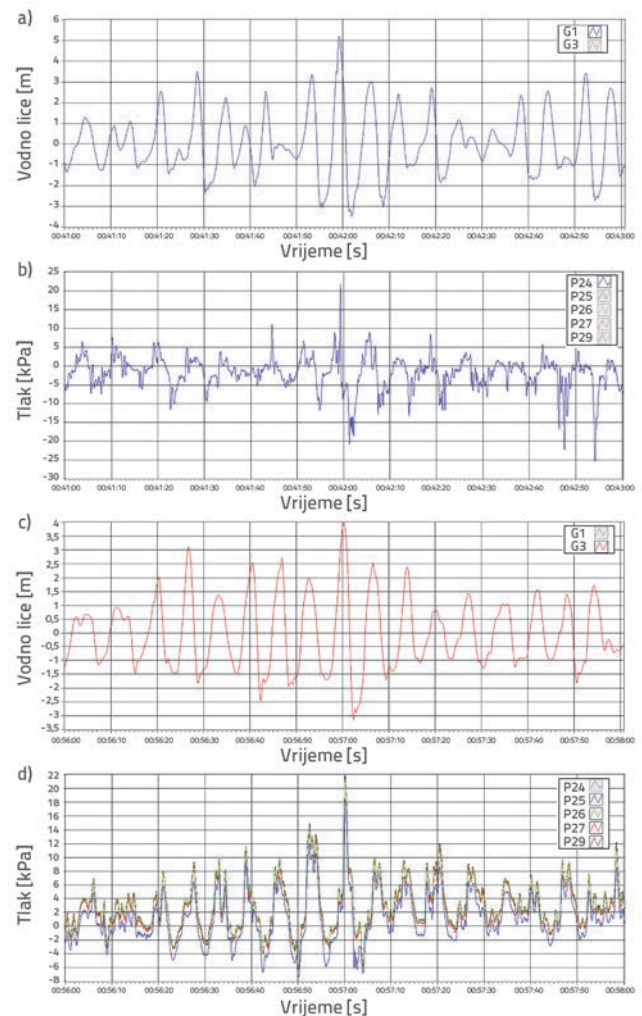
smjer	$K_R$			
	G1	G2	G3	G4
SW	0,23	0,30	0,26	0,29
SSE	0,25	0,28	0,26	0,28

Tablica 2. Maksimalni izmjereni tlakovi na pozicijama P24-P29

smjer	$P_{MAX}$ [kPa]			
	P24	P25	P26	P27 / P29
SW	26,7	22,3	21,6	21,8
SSE	21,7	18,4	21,2	21,4 / 21,8



Slika 3. Slijed izmjerenih vremenskih serija razina vodnog lica (a, c) na mjernim sondama G1 (a) i G3 (c) te pripadne izmjerene vremenske serije tlakova (b, d) na pozicijama P24 (b) i P25-P27 (d) pri incidentnom smjeru SW



Slika 4. Slijed izmjerenih vremenskih serija razina vodnog lica (a, c) na mjernim sondama G1 (a) i G3 (c) te pripadne izmjerene vremenske serije tlakova (b, d) na pozicijama P24 (b), P25-P27 (d) pri incidentnom smjeru SSE

## 4. Empirijski modeli

### 4.1. Kaplan (1995)

Kaplan [11] je svoje istraživanje usredotočio na iznalaženje empirijskog modela za proračun tlakova i sila pri udaru valova na ravne horizontalne plohe. Ukupno djelovanje izrazio je kombinacijom inercijskog člana, sile otpora tijela i uzgona. Pri određivanju vertikalne komponente djelovanja oslanja se na Morisonovu jednadžbu te prepoznaje da odnos između vertikalne udaljenosti od mirne razine do donjnjeg ruba ploče i valne visine ima primarnu ulogu u pojavi impulsnih tlakova. Ponuđeni empirijski izraz glasi [11]:

$$p_{\text{kap}} = \rho \frac{\pi}{8} \frac{l}{[1+(l/b)^2]^{1/2}} \alpha_w + \rho \frac{\pi}{4} c \frac{1+\frac{1}{2}(l/b)^2}{[1+(l/b)^2]} w + \frac{\rho}{2} C_d w |w| + \rho g a \quad (1)$$

gdje su:  $\rho$  gustoća mora (usvojeno  $1028 \text{ kg/m}^3$ ),  $b$  širina ploče okomito na smjer propagacije vala (usvojeno  $12,3 \text{ m}$ ),  $l$  dužina ploče u smjeru propagacije vala (usvojeno  $12,3 \text{ m}$ ),  $a$  debljina ploče (usvojeno  $1,2 \text{ m}$ ),  $c$  brzina propagacije vala,  $a_w$  vertikalna komponenta ubrzanja čestice u površinskoj strujnici,  $w$  vertikalna komponenta brzine čestice u površinskoj strujnici,  $C_d$  koeficijent otpora oblika (usvojeno 2 prema [11]). Za korištenje izraza (1) potrebno je odrediti kinematičke parametre  $c$ ,  $w$  i  $a_w$ . Te su vrijednosti izračunane jednadžbama (2,3,4), preuzetim iz linearne teorije valova [22]. Pri tome je za valnu amplitudu  $\eta_s$  usvojena vrijednost  $\eta_s = H_s / 2 = 1,8 \text{ m}$  (polovica značajne valne visine incidentnog spektra SW i SSE smjera), za valni period  $T = T_p = 5,9 \text{ s}$ . Iznos vertikalne komponente brzine  $w$  i ubrzanja  $a_w$  u izrazima 3 i 4 definira se za trenutak u kojem valni profil doseže kotu donjeg ruba ploče  $+2,64 \text{ m}$ , uz mirnu razine na koti  $+1,45 \text{ m}$  ( $\eta = 2,64 - 1,45 = 1,19 \text{ m}$ ):

$$c = gT / 2\pi = 9,2 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$w = A\omega \frac{\sinh(k(h+z))}{\sin(kh)} \cos(\omega t - kx) = 1,44 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$\alpha_w = -A\omega^2 \frac{\sin(k(h+z))}{\sin(kh)} \sin(\omega t - kx) = -1,34 \text{ m/s} \quad (4)$$

Oznaka  $k = 2\pi / L$  ima značenje valnog broja,  $\omega = 2\pi / T$  valne frekvencije. Ovakvim pristupom zanemareno je prelijevanje i niz komponenti valnih deformacija koje se pojavljuju nailaskom na kesonsku konstrukciju i prolaskom kroz nju (refleksija od fenderske grede i stupova kesona, difrakcija i refleksija unutar kesonske konstrukcije). Primjenom izračunanih vrijednosti  $c$ ,  $w$  i  $a_w$  iz izraza (2, 3, 4) u izraz (1) dobivena je vrijednost impulsnog tlaka od  $p_{kap} = 22,1$  kPa.

#### 4.2. USACE (2006) i DNV (2010)

Projektantske preporuke-smjernice [17, 18] za proračun srednjih tlakova  $p_{dnv}$  na doljnu plohu ploče izložene djelovanju valova dane su jednostavnom jednačom

$$p_{dnv} = C_{dnv} \rho \frac{\omega^2}{2} \quad (5)$$

Kao i u prethodnom slučaju, za primjenu izraza (5) potrebno je poznavati vertikalnu komponentu brzine  $w$  u trenutku kontakta vala s doljnom konturom pokrovne ploče. Za iste uvjete razina i valnog profila kao i u prethodnom pristupu dobiva se ista vrijednost  $w = 1,44$  m/s. Za koeficijent  $C_{dnv}$  usvaja se vrijednost 10, prema preporukama [18].

Praktična primjena izraza (5) sadržana je u tome da proračunate vrijednosti  $p_{dnv}$  predstavljaju srednje vrijednosti tlaka ispod "omočene" površine ploče koja se izračunava na način kako je pobliže opisan u [18]. Umnoškom srednjih vrijednosti tlakova  $p_{dnv}$  i "omočene" površine ploče  $A_{dnv}$  dobiva se ukupna vertikalna sila na ploču za potrebe proračuna stabilnosti.

Odnos srednjih tlakova  $p_{dnv}$  relevantnih za proračun maksimalne vertikalne sile na ploču, i impulsnih tlakova  $p_{mng}$  koji se pojavljuju lokalno, prema Mengu [23] iznosi  $p_{mng} / p_{dnv} = 2$ . Potrebno je napomenuti da se prema [23] maksimalni tlakovi pojavljuju na početku ploče. Usvajanjem vrijednosti  $w = 1,44$  m/s,  $C_{dnv} = 10$  i  $p_{mng} / p_{dnv} = 2$ , proračunano impulsno djelovanje tlaka je  $p_{mng} = 21,3$  kPa.

#### 4.3. Cuomo (2007)

Cuomo [14] predlaže primjenu empirijskih obrazaca (6, 7, 8) za definiranje kvazistatičkih (6, 7) i impulsnih tlakova (8) u ovisnosti o incidentnim značajnim valnim visinama  $H_s$  i vertikalnoj udaljenosti između mirne razine i doljnog ruba ploče  $c_r$ . Prema rezultatima provedenog eksperimentalnog laboratorijskog istraživanja [14], predložena su dva izraza (6, 7) za pozicije

prednjeg-vanjskog dijela ploče (jednačba 6) i srednjeg-unutarnjeg dijela ploče (jednačba 7):

$$p_{cuo-ST} = \rho g H_s (2,31 (\frac{\eta_{max} - c_1}{d}) + 0,05) \quad (6)$$

$$p_{cuo-ST} = \rho g H_s (0,83 (\frac{\eta_{max} - c_1}{d}) + 0,13) \quad (7)$$

$$p_{cuo} = 2,26 p_{cuo-ST} - 0,0438 \quad (8)$$

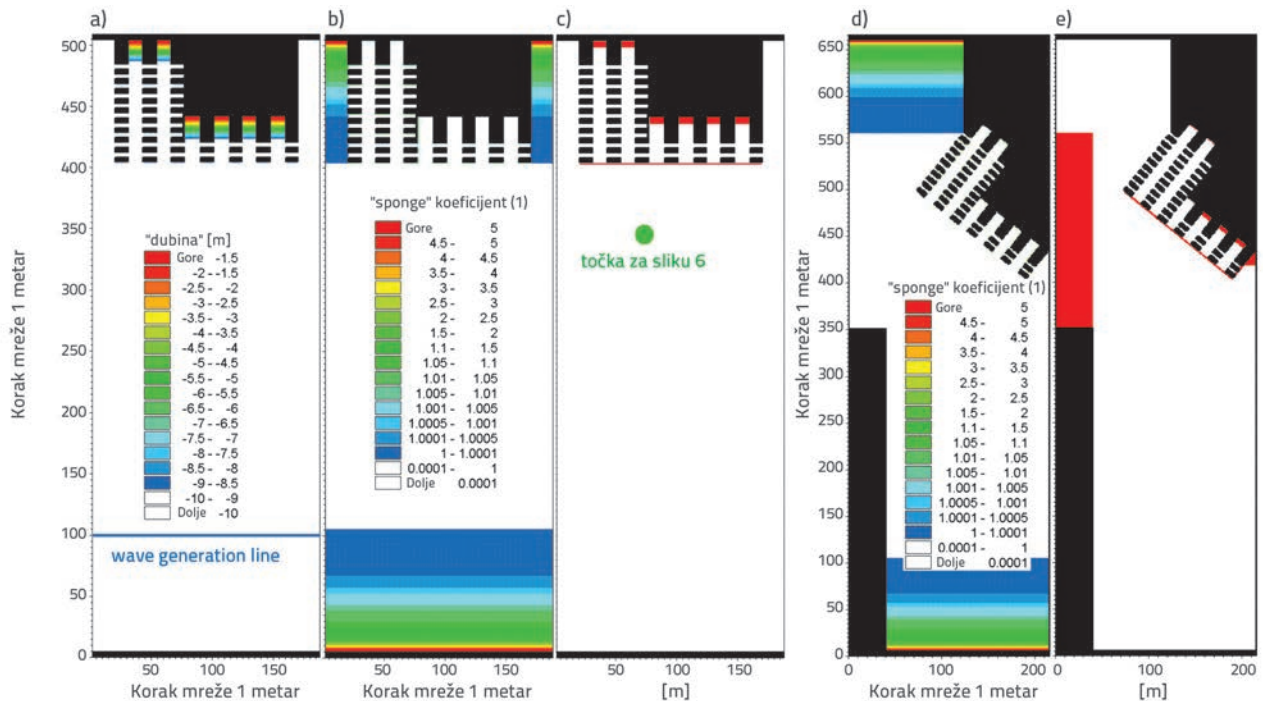
Vrijednost maksimalne amplitude incidentnog vala  $\eta_{max}$  definirana je usvojenim odnosom maksimalnih i značajnih valnih visina  $H_{MAX} / H_s = 1,8$ . Za oba analizirana incidentna smjera  $H_s$  poprima vrijednost 3,6m, pa se uz odnos  $H_{MAX} / \eta_{max} = 2$  dobiva vrijednost  $\eta_{max} = 3,24$  m. Kote donjeg ruba ploče i mirne razine su na +2,64 m i +1,45 m, što daje  $c_r = 1,19$  m. Za dubinu  $d$  usvojena je vrijednost 20m. Primjenom izraza (6, 7, 8) proračunate su vrijednosti impulsnih tlakova za vanjski-prednji dio ploče  $p_{cuo(EXT)} = 23,1$  kPa i srednji-unutarnji dio ploče  $p_{cuo(INT)} = 17,3$  kPa.

### 5. Numerički model valnih deformacija

Pri provedbi numeričkog modeliranja korištena je prostorna domena s obuhvatom i dispozicijom iste sekcije kesonske konstrukcije kao i u kanalu fizikalnog modela (slike 2. i 5.). Položaj linije generiranja valnog spektra u numeričkom modelu istovjetan je poziciji ploče valnog generatora u fizikalnom modelu (u mjerilu prirode), odnosno nalazi se na jednakoj udaljenosti od profila ispitivane strukture. Na liniji valnog generiranja u numeričkom modelu primijenjen je unidirekcijski valni spektar, kao i u slučaju ispitivanja na fizikalnom modelu. Korišten je ekvidistantan prostorni raster numeričkih čvorova s inkrementom  $\Delta x = \Delta y = 1$  m. Ovime je omogućena i parametrizacija-baždarenje numeričkog modela s ciljem postizanja odgovarajućeg stupnja refleksije, transmisije i disipacije. Dubina u numeričkom kanalu je konstantna (10 m), osim na mjestu školjere gdje je korišten projektnom dokumentacijom definirani nagib 2:3. Time je omogućena modelska interpretacija valnog spektra za komponente s duljinama većim od  $L = 20$  m (minimalni valni period  $T_{min} = 3,58$  s). Usvojena pretpostavka je da "izgubljeni" dio valnog spektra u području valova s periodima manjima od 3,58 s neće uzrokovati znatnu distorziju rezultata valnih deformacija u području kesona ispod ploče. Osim toga, energija stvarnog valnog spektra za periode  $T < 3,58$  s u modelu je posve prebačena u područje valnog spektra s  $T > 3,58$  s. To podrazumijeva da je pripadna površina ispod spektra za periode  $T < 3,58$  linearno raspoređena na dio spektra s periodima  $T > 3,58$  s. Na taj način je zadržana vrijednost značajne valne visine unatoč redukciji spektra.

Korišten model je dvodimenzionalan u horizontalnoj ravnini te se njime ne provodi direktna analiza utjecaja pokrovne ploče na valne deformacije s posljedičnom raspodjelom tlakova po doljnoj plohi pokrovne ploče. Prema tome, horizontalna AB ploča nije tretirana kao rubni uvjet. Numeričkim simulacijama





Slika 5. a) Prostorna domena numeričkog kanala; b, d) apsorbirajući numerički slojevi; c i e) refleksijsko-transmisijsko-disipativni numerički slojevi s odgovarajućim koefijentom poroznosti za SW (c) i (e) SSE incidentni smjer valovanja

dobiva se nestacionarno i složeno 2D polje denivelacije morskih razina u zoni kesona (ispod ploče), iz kojeg se eksternom numeričkom rutinom izračunavaju vertikalna komponenta brzine  $w$  i ubrzanja  $a_w$  za česticu valnog profila u trenutku dosizanja kote +2,64 m (doljni rub pokrovne ploče). Pripadne vrijednosti impulsnih tlakova se dobivaju primjenom empirijskih obrazaca predstavljenih u prethodnom poglavlju. Osim pozicija tlakomjera P24-P29, prate se i sve druge pozicije na kojima morska razina povremeno dosiže kotu +2,64 m. Na ovaj način može se racionalnije procijeniti ukupna površina ploče na koju djeluje impulsno opterećenje te na bolji način dimenzionirati konstrukciju.

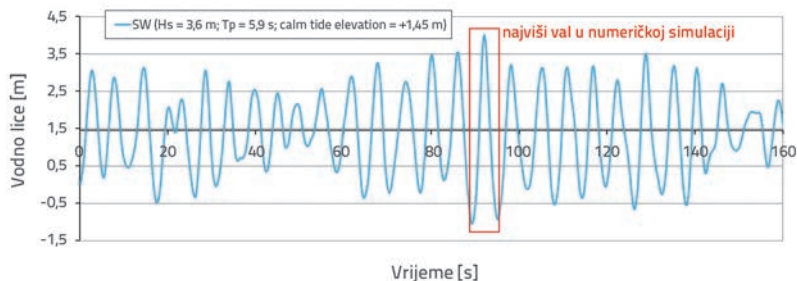
Numeričkim modelom želi se osigurati odgovarajuća sličnost s refleksijsko-disipacijskim svojstvima kesonske strukture, dobivenim temeljem mjerenja na fizikalnom modelu. Opis željenog stupnja refleksije i/ili disipacije energije vala u prostornoj domeni numeričkog modela ostvarena je upotrebom apsorbirajućih slojeva (eng. *sponge layers*) i refleksijsko-disipativnih slojeva (eng. *porosity layers*) s baždarnim numeričkim koeficijentima (slika 5.). Apsorbirajućim slojevima se onemogućuje refleksija valova od krutih granica numeričkog modela koje nisu prisutne u stvarnosti, odnosno širenje valne energije izvan područja primarnog interesa. Principijelne varijable koje se variraju u modelskoj parametrizaciji su koeficijent poroznosti (eng. *porosity coefficient*), koeficijenti laminarnog i turbulentnog otpora te promjer krute čestice ispune.

Incidentna valna energija se pri nailasku na kesonsku konstrukciju dijelom reflektira od zida i fenderske grede, dijelom

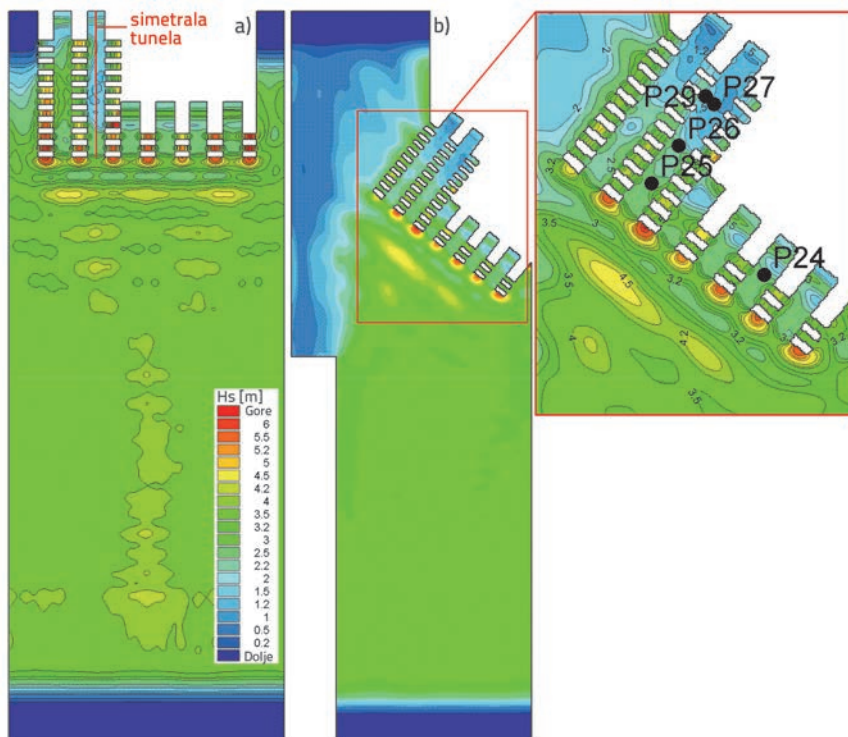
se transmitira ispod fenderske grede u zonu kesona te se jedan dio gubi i kroz proces prelijevanja. Dio incidentne valne energije koji se "potroši" na prelijevanje procijenjen je koeficijentom transmisije pri prelijevanju [24]. Takvim pristupom za koeficijent transmisije uslijed prelijevanja dobiva se vrijednost  $K_{TP} = 0,18$ . Koeficijent transmisije ispod fenderske grede (u zonu kesona) procijenjen je na vrijednost  $K_{TP} = 0,8$  [25]. Usvojili se konzervativni oblik odnosa incidentne, reflektirane i transmitirane energije, za koeficijente vrijedi relacija  $K_T^2 + K_{TP}^2 + K_R^2 = 1$ . Time je definiran i koeficijent refleksije za dio konstrukcije ispred tunela između stupova kesona  $K_R = 0,2$  (primjerice za poziciju mjerne sonde G3). Budući da analizirana složena struktura ima i disipativno svojstvo, u numeričkom modelu je usvojena blago umanjena vrijednost  $K_R = 0,15$ . S druge strane, ispred stupa kesona (pozicija mjerne sonde G4) pojavljuje se pojačana refleksija, te je u sklopu numeričkih simulacija usvojena vrijednost  $K_R = 0,45$ . Srednja vrijednost koeficijenta refleksije za cijelokupno područje ispred fenderske grede u numeričkom modelu iznosi  $K_R = 0,3$ . Bliske vrijednosti dobivene su i ispitivanjem na fizikalnom modelu (srednja vrijednost  $K_R = 0,27$ , vidi tablicu 1.).

Istraživanje valnog polja s dinamikom valnih deformacija provedeno je pomoću numeričkog modela Mike 21/BW (www.dhigroup.com). Numerički model Mike 21/BW baziran je na rješavanju vremenske domene u Bousinesqovim jednadžbama. Bousinesqove jednadžbe sadrže članove kojima je obuhvaćen i utjecaj frekvencijske disperzije i nelinearnosti. Frekvencijska disperzija uzeta je u obzir u jednadžbama količine gibanja u kojima je uzet u obzir i efekt vertikalnog ubrzanja na distribuciju tlakova. Jednadžbe se rješavaju primjenom fluksformulacije





Slika 6. Slijed morskih razina u točki ispred kesonske konstrukcije (JONSWAP spektar;  $\gamma = 3,3$ ;  $H_{s,PPS} = 3,6 \text{ m}$ ;  $T_p = 5,9 \text{ s}$ )



Slika 7. Polja značajnih valnih visina za incidentni smjer valovanja: a) SW; b) SSE

Tablica 3. Proračunane vrijednosti vertikalne komponente brzine  $w$  i ubrzanja  $a_w$  za česticu valnog profila u trenutku dosizanja donjnjeg ruba pokrovne ploče (kota +2,64 m), za pozicije P24-P29

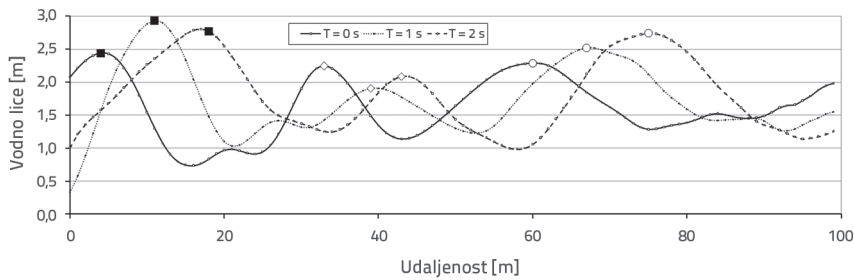
		$w$ [m/s]			
smjer		P24	P25	P26	P27 / P29
SW		1,76	1,53	0,4	1,08/2,04
SSE		1,44	1,72	1,93	0,5/1,01
		$a_w$ [m/s <sup>2</sup> ]			
smjer		P24	P25	P26	P27 / P29
SW		-0,034	-0,032	-0,031	-0,024/-0,031
SSE		-0,024	-0,032	-0,029	-0,03/-0,036

(brzina x dubina) s poboljšanim linearnim disperzijskim karakteristikama [26]. Jednadžbe se u numeričkom modelu rješavaju implicitnom tehnikom konačnih diferencija. Ovim numeričkim modelom obuhvaćene su sve kombinacije relevantnih utjecaja na deformacije valova poput refrakcije, difrakcije, trenja sa dnom, parcijalne refleksije i transmisije, nelinearne interakcije između dva ili više valova i frekvencijsko širenje, te nelinearni fenomeni poput formiranja viših i nižih harmonika. Za detaljniji pregled o numeričkim formulacijama numeričkog modela Mike 21/BW upućuje se na [26].

S obzirom na to što se već u sklopu istraživanja na fizikalnom modelu prepoznalo da upravo najveći val iz valne serije uzrokuje najveća impulsna opterećenja, u ovom je dijelu modeliranja posebna pažnja je usmjerena na propagaciju najvećeg vala kroz kesonsku konstrukciju. Na slici 6 prikazan je vremenski slijed morskih razina za jednu točku ispred konstrukcije (slika 5.) pri incidentnom smjeru SW (JONSWAP spektar;  $g = 3,3$ ;  $H_s = 3,6 \text{ m}$ ;  $T_p = 5,9 \text{ s}$ ). Rezultantna polja značajnih valnih visina  $H_s$  za situacije incidentnog valovanja SW i SSE prikazana su na slici 7.

Brzina propagacije vala  $c$  u zoni kesonske konstrukcije izračunana je temeljem praćenja valnih grebena uzduž simetrale "tunela" između dvije susjedne linije kesonskih stupova (slika 7.). Srednja brzina propagacije iznosi  $c = 6,3 \text{ m/s}$ . Na slici 8 prikazana je propagacija valnog profila u simetrali "tunela" s pomakom od 1 sekunde.

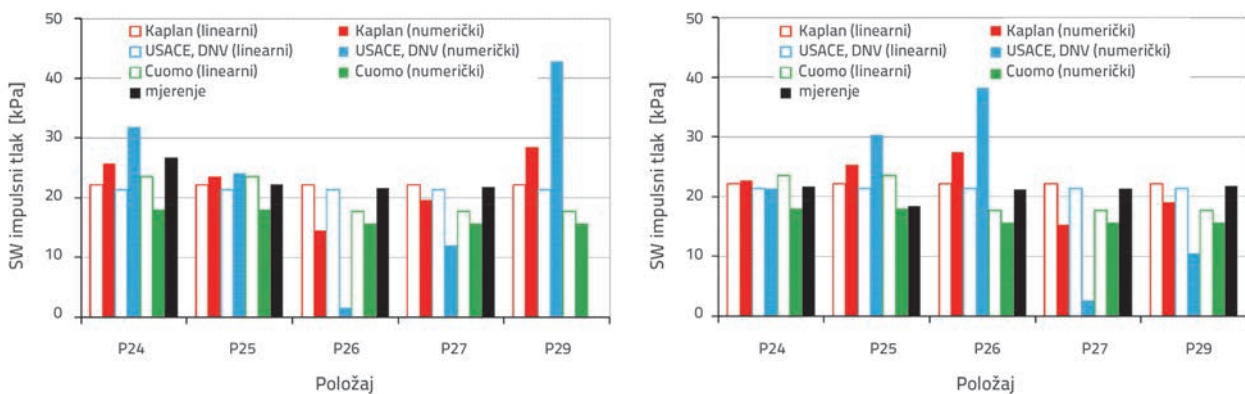
Proračunane vrijednosti vertikalne komponente brzine  $w$  i ubrzanja  $a_w$  za česticu valnog profila u trenutku dosizanja donjnjeg ruba pokrovne ploče (kota +2,64 m), za pozicije tlakomjera P24-P29 prikazane su u tablici 3. Pripadne vrijednosti impulsnih tlakova prema empirijskim izrazima iz poglavlja 4, uz primjenu numeričkim modelom dobivenih vrijednosti  $c, w$  i  $a_w$ , prikazane su na slici 9. Potrebno je napomenuti da su predložene vrijednosti tlakova vezane uz najveći val iz cjelokupnog simulacijskog razdoblja od 30 minuta.



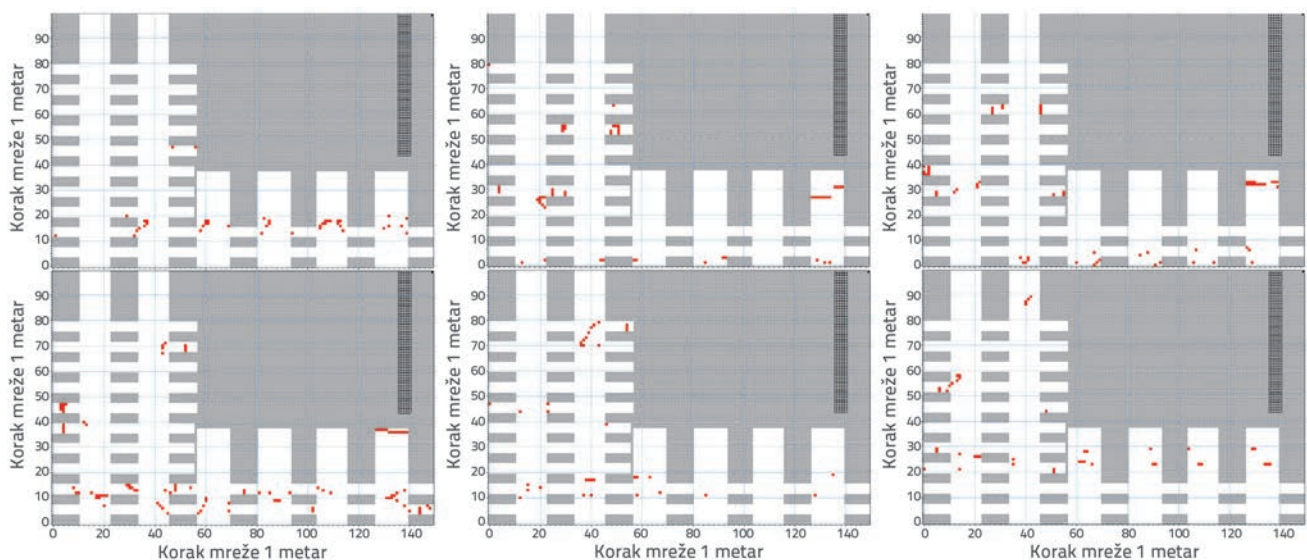
Slika 8. Prikaz propagacije valnog profila u simetrični "tunela" s pomakom od 1 sekunde

Na slici 10. prikazane su pozicije na kojima morska razina istovremeno doseže kotu +2,64 m (doljni rub ploče), a time se može procijeniti i ukupno impulsno opterećenje na cjelokupnu

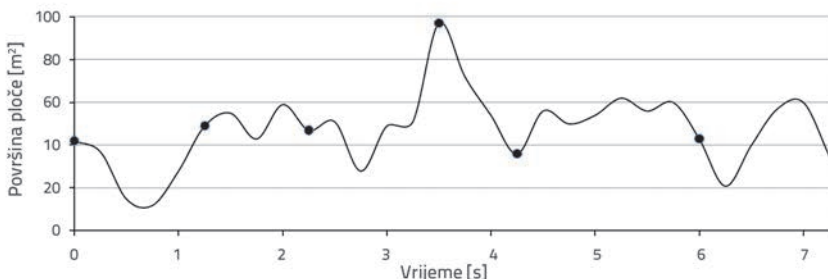
površinu ploče. Na slici 11. prikazana je vremenska serija ukupne površine ploče na koju se pojavljuje impulsno djelovanje tlaka pri prolasku najvećeg vala iz simulacijskog razdoblja. Ako se pretpostavi da je tlak dobiven mjerenjem na fizikalnom modelu mjerodavan odnosno pouzdan, procjena pouzdanosti primijenjenih metodologija može se temeljiti na statističkim parametrima srednje greška *AE* (eng: *average error*), relativne srednje pogreške *rAE* i korijena srednje kvadratne greške *RMSE* (eng: *root mean square error*) za varijablu impulsnog tlaka (slika 12).



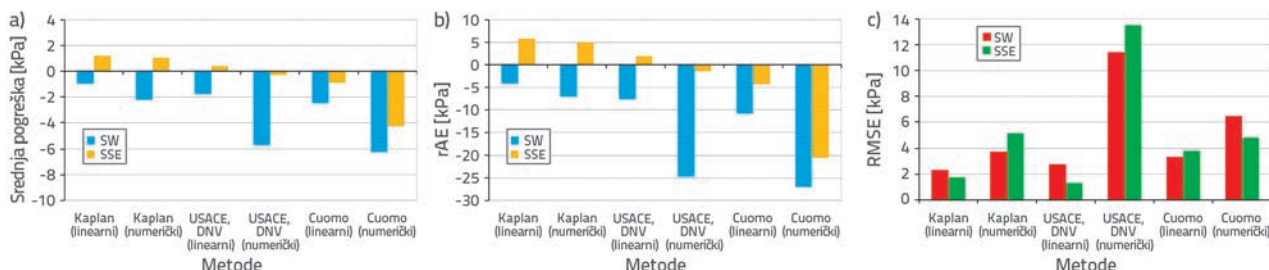
Slika 9. Maksimalni impulsni tlakovi izmjereni na tlakomjerima P24-P29 te proračunani empirijskim izrazima iz poglavlja 4, uz primjenu vrijednosti  $c, w$  i  $a_w$  iz linearne valne teorije (poglavlje 4) i rezultata numeričkih simulacija (ovo poglavlje)



Slika 10. Pozicije (crvene točke) na kojima morska razina istovremeno doseže kotu +2,64 m (doljni rub ploče) pri prolasku najvećeg vala iz simulacijskog razdoblja (SW incidentni smjer)



Slika 11. Vremenska serija ukupne površine ploče na koju se pojavljuje impulsno djelovanje tlaka pri prolasku najvećeg vala iz simulacijskog razdoblja (SW incidentni smjer). Točkama označeni trenuci za koje je dan prikaz na slici 10.



Slika 12. Varijabla impulsnog tlaka po primijenjenim metodologijama: a) srednje pogreške AE; b) relativne srednje greške rAE; c) korijeni srednje kvadratne pogreške RMSE (srednja pogreška, eng. *average error - AE*)

## 6. Zaključak

Analizirani su impulsni tlakovi na pokrovnu ploču kesonske konstrukcije pri djelovanju vjetrovnih valova. Referentne vrijednosti impulsnog djelovanja tlaka s donje strane ploče dobivene su mjerenjem na fizikalnom modelu na nekoliko pozicija i pri dva relevantna incidentna smjera valovanja (SW i SSE). Izmjerene vrijednosti uspoređene su s proračunanim vrijednostima dobivenima temeljem empirijskih obrazaca. Budući da primjena empirijskih obrazaca pretpostavlja poznavanje kinematičkih parametara valnog profila, oni su najprije proračunani iz linearne valne teorije a potom i iz rezultata numeričkog modela valnih deformacija.

Usporedba modeliranih i izmjerenih rezultata pokazuje na sljedeće:

- primjena linearne teorije za proračun kinematičkih parametara valnog profila omogućuje iznalaženje samo jedne vrijednosti impulsnog djelovanja tlaka, ne razlučujući njegovu prostornu raspodjelu ispod pokrovne ploče;
- impulsni tlakovi pojavljuju se samo lokalno, a prema rezultatima numeričkog modela nešto manje od 1% ukupne pokrovne površine istovremeno je izloženo djelovanju impulsnog tlačnog opterećenja;

- tlakovi dobiveni empirijskim prema obrascima Kaplanu (1995) i DNV (2010), uz primjenu linearne teorije valova, najbolje odgovaraju izmjerenim vrijednostima;
- tlakovi dobiveni empirijskim obrascima uz primjenu linearne teorije valova daju manje srednje pogreške (AE) i korijene srednje kvadratne pogreške (RMSE) u odnosu na rezultate dobivene empirijskim obrascima uz primjenu rezultata numeričkog modela;
- srednje pogreške (AE) manje su u slučaju SSE incidentnog smjera valovanja u odnosu na SW smjer;
- srednje pogreške (AE) u svim primijenjenim metodologijama su negativne vrijednosti u slučaju SW incidentnog smjera. Time proračunate vrijednosti nisu na strani sigurnosti. Pozitivne vrijednosti AE postignute su u slučaju primjene izraza prema Kaplanu (1995) i uvjetima SSE incidentnog smjera valovanja;
- najbolje slaganje proračunskih i izmjerenih vrijednosti impulsnog tlaka postignuto je primjenom linearne valne teorije i empirijskog obrasca prema Kaplan (1995), pri čemu relativna srednja pogreška iznosi pet posto.

Zaključno, primjena linearne valne teorije i empirijskog izraza prema Kaplanu (1995.) daje inženjerski prihvatljivu procjenu impulsnih tlakova na pokrovnu ploču uslijed djelovanja valova.

## LITERATURA

- [1] Lai, C.P., Lee, J.J.: Finite Amplitude Wave Uplift on Platforms or Docks, *Journal of Waterways, Ports, Coastal & Ocean Engineering*, ASCE, 115 (1989) 1, pp. 19-39, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:1\(1\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:1(1))
- [2] Bhat, S.S.: *Wave slamming on the horizontal plate*, A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science, The University of British Columbia, 1994.
- [3] Wagner, H.: *Landing of Seaplanes*, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No. 622., 1932.
- [4] Chuang, S.L.: Experiments on slamming of wedge-shaped bodies with variable dead rise angle, *J. Ship Research*, 11(1967) 4, pp. 190-198.
- [5] Verhagen, J.H.G. (1967): The impact of flat plate on a water surface, *J. Ship Research*, 11(1967) 4, pp. 211-223.
- [6] El Gharmy, O.A.: *Wave force on a dock*, Report no. HEL-9-1, Inst. Of Engg. Research, Hydraulic Engg. Lab., University of California, Berkeley, California. 1963.
- [7] Denson, K.H., Priest, M.S.: Wave pressure on the underside of a horizontal platform, *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, USA, pp. 555-570, 1971., <http://dx.doi.org/10.4043/1385-MS>
- [8] Broughton, P., Horn, E.: Ekofish Platform 2/4C: Re-analysis Due to Subsidence, *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 82 (1987), pp. 949-979, <http://dx.doi.org/10.1680/iicp.1987.488>
- [9] Shih, R.W.K., Anastasiou, K.: A Laboratory Study of the Wave-induced Vertical Loading on Platform Decks, *Proc. ICE, Water Maritime and Energy*, 96 (1992) 1, pp. 19-33, <http://dx.doi.org/10.1680/iwtme.1992.18495>
- [10] Toumazis, A.D., Shih, W.K. & Anastasiou, K.: Wave Impact Loading on Horizontal and Vertical Plates, *Proc. IAHR 89 Conf.*, Ottawa, Canada, pp. 209-216, 1989.
- [11] Kaplan, P., Murray J.J., Yu W.C.: Theoretical Analysis of Wave Impact Forces on Platform Deck Structures, *Volume 1-A Offshore Technology, OMAE - Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, Copenhagen, pp. 189-198, 1995.
- [12] Isaacson, M., Allyn, N., Ackerman, C.: Design wave loads for a Jetty at Plymouth, Montserrat, *International Symposium: Waves-physical and numerical modelling*, University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 1153-1162, 1994.
- [13] Tirindelli, M., Cuomo, G., Allsop, N.W.H., Lamberti, A.: Wave-in-Deck Forces on Jetties and Related Structures, *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, pp. 562-569, 2003.
- [14] Cuomo, G., Tirindelli, M., Allsop, N.W.H.: Wave-in-deck loads on exposed jetties, *Coastal Engineering*, 54 (2007) 9, pp. 657-679.
- [15] Martinelli, L., Lamberti, A., Gaeta, M., Tirindelli, M., Alderson, J., Schimmels, S.: Wave loads on exposed jetties: description of large scale experiments and preliminary results, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), structures.18 (2011), doi:<http://dx.doi.org/10.9753/icce.v32.structures.18>
- [16] Araki, S., Deguchi, I.: Prediction of wave force acting on horizontal plate above still water level, *Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering*, Santander, Spain, pp. 1-12, 2012.
- [17] USACE: *Coastal Engineering Manual \_ Part 6, Chapter 5, Fundamentals of Design*. 2006.
- [18] Det Norske Veritas: *Recommended Practice - Environmental Conditions and Environmental Loads*, DNV-RP-C205, 2010.
- [19] Brodarski institute: *Zagreb Container Terminal Pier Structure - Hydraulic investigations on physical model and numerical analysis of the wave field in front of the structure - Final report*, Technical report no. 6359-H, Zagreb, 2013.
- [20] Hydroexpert: *Wind and wave climate for the Port of Rijeka - Zagreb Pier*, Technical report, Zagreb, 2013.
- [21] Goda, Y., Suzuki, Y.: Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering*, Hawaii, pp. 828-845, 1976.
- [22] Mei C.C.: *The applied dynamics of ocean surface waves*, Advanced series on ocean engineering, World scientific Ed., New Jersey, 1989.
- [23] Meng, Y., Chen, G., & Yan, S.: Wave interaction with deck of jetty on a slope *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), posters.21 (2011), doi:<http://dx.doi.org/10.9753/icce.v32.posters.21>
- [24] Goda, Y.: *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced series on ocean engineering, World Scientific Ed., New Jersey, 2000.
- [25] Wiegel, R.L.: Transmission of waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, *J. of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, (1960) 6, pp. 1-12.
- [26] Madsen, P.A., Murray, R., Sorensen, O.R.: A new form the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, *Coastal Engineering*, (1991) 15, pp. 371-388, [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90017-B](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(91)90017-B)
- [27] Journée, J.M.J., Massie, W.W., Offshore Hydromechanics, First edition. Delft University of Technology, (2001), pp. 5-43 (<http://www.shipmotions.nl>).